

Nicola Kelleners

Kinematik des kraniozervikalen Übergangs beim Chihuahua

Eine Untersuchung mittels biplanarer
Röntgenvideographie und Scientific Rotoscoping

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 den 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.

1st 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

www.doktorverlag.de

Klinikum Veterinärmedizin
Klinik für Kleintiere – Neurochirurgie
Neuroradiologie und klinische Neurologie
der Justus-Liebig-Universität Gießen
Betreuer: Prof. Dr. Martin Schmidt

**Kinematik des kraniozervikalen Übergangs
beim Chihuahua
- eine Untersuchung mittels biplanarer Röntgenvideographie
und Scientific Rotoscopy**

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

Eingereicht von

Nicola Kelleners
Tierärztin aus Krefeld

Gießen 2019

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

Dekan:

Prof. Dr. Dr. h. c. Martin Kramer

Gutachter:

Prof. Dr. Martin Schmidt

Prof. Dr. Dr. h. c. Martin S. Fischer

Prüfer:

Prof. Dr. Carsten Staszuk

Tag der Disputation: 12.07.2019

Gewidmet meiner Mutter

Die Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Zoologie und Evolutionsforschung der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Die Studie wurde durch die AOVET gefördert

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	I
2	Abkürzungsverzeichnis	III
3	Abbildungsverzeichnis	IV
4	Tabellenverzeichnis	VII
5	Einleitung	1
6	Ziel der Studie	2
7	Literaturübersicht	3
7.1	Anatomie des Okzipitoatlantoaxialgelenks	3
7.1.1	Knöchernen Strukturen	3
7.1.2	Bandapparat	7
7.1.3	Muskulatur	8
7.2	Biomechanik des Okzipitoatlantoaxialgelenks	10
7.3	Ausgewählte Anomalien des kraniozervikalen Überganges	12
7.3.1	Atlantoaxiale Instabilität	12
7.3.2	Atlantookzipitale Überlappung	17
7.4	Grundlagen der instrumentierten Ganganalyse	19
7.4.1	Überblick über die Ganganalysemethoden	19
7.5	XROMM und Scientific Rotoscoping	21
7.6	Definition der Gangarten im Rahmen der Ganganalyse	22
7.6.1	Schritt	24
7.6.2	Trab	25
8	Material und Methoden	26
8.1	Tierversuchsgenehmigung	26
8.2	Studienteilnehmer	26
8.3	Untersuchungsbestandteile und Abfolge	27
8.3.1	Klinische Untersuchung und Schnittbildverfahren	28
8.3.2	Biplanare Röntgenvideographie	29
8.3.3	Scientific Rotoscoping	31
8.4	Datenanalyse	41
8.4.1	Schrittanalyse – Berechnung vom Duty-Faktor	42
8.4.2	Schrittanalyse – Betrachtung der Fußfallmuster	43

8.4.3	Schrittnormierung.....	44
8.5	Eigener Messfehler.....	45
8.5.1	Korrelation der Bewegungsdaten.....	46
8.5.2	Simi Motion®	47
8.5.3	Dreidimensionaler Druck einer Gelenkkette.....	48
9	Ergebnisse	50
9.1	Ganganalyse im Hochgeschwindigkeitsvideo.....	50
9.1.1	Schritt.....	50
9.1.2	Trab	52
9.2	Datenanalyse der virtuellen Gelenke im Schritt.....	53
9.2.1	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C3	53
9.2.2	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C2	77
9.2.3	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C2/C1	77
9.2.4	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C1/Schädel	85
9.3	Datenanalyse der virtuellen Gelenke im Trab.....	96
9.3.1	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C3	96
9.3.2	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C2	115
9.3.3	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C2/C1	115
9.3.4	Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C1/Schädel	121
9.4	Korrelation der Bewegungsdaten	128
9.5	Simi-Motion® Analyse	130
9.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	131
10	Diskussion	134
10.1	Auswahl des Scientific Rotoscoping als Messmethode	134
10.2	Probandenauswahl.....	135
10.3	Gangbildanalyse und Einfluss des Laufbandes auf das Gangbild.....	136
10.4	Dreidimensionale Bewegungen mit Schrittzklusabhängigkeit.....	138
10.5	Dreidimensionale Bewegungen bei aktiven Kopfbewegungen	144
10.6	Tiermedizinische Relevanz und Ausblick für die Forschung.....	148
11	Zusammenfassung	151
12	Summary	154
13	Anhang	157
14	Literaturverzeichnis.....	175

2 Abkürzungsverzeichnis

C1	1. Halswirbel/Atlas
C2	2. Halswirbel/Axis
C3	3. Halswirbel
C4	4. Halswirbel
C5	5. Halswirbel
C6	6. Halswirbel
C7	7. Halswirbel
cm	Zentimeter
3D	dreidimensional
HL	Linke Hintergliedmaße
HR	Rechte Hintergliedmaße
kg	Kilogramm
kV	Kilovolt
M	Mittelwert
mAs	Milliamperesekunde
m/s	Meter pro Sekunde
ROM	Range of Motion
ROM _{max}	maximal gemessene Range of Motion
SD	Standardabweichung
VL	linke Vordergliedmaße
VR	rechte Vordergliedmaße
XROMM	X-Ray Reconstruction of Moving Morphology

3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modell eines kaninen Schädels.	3
Abbildung 2: Modell eines kaninen Atlas.	5
Abbildung 3: Modell eines kaninen Axis.	6
Abbildung 4: Kraniozervikaler Bandapparat.	7
Abbildung 5: Röntgenaufnahmen der kranialen Halswirbelsäule eines Chihuahuas mit diagnostizierter atlantoaxialer Instabilität.	14
Abbildung 6: Messtechnik zur Beurteilung einer atlantookzipitalen Überlappung	18
Abbildung 7: Unterteilung des Schrittzklus in Stemm- und Schwungphase	23
Abbildung 8: Fußfallmuster im Schritt.	24
Abbildung 9: Idealisiertes Fußfallmuster im Trab.	25
Abbildung 10: Arbeitsschritte des Scientific Rotoscoping.	27
Abbildung 11: Lagerung des Hundes für die Computertomographie.	29
Abbildung 12: Versuchsaufbau für die Röntgenvideographie in 90° Einstellung.	31
Abbildung 13: Dreidimensionale Knochenrekonstruktion	33
Abbildung 14: Hierarchische Gelenkkette, konstruiert mit Autodesk Maya®	35
Abbildung 15: Grid	36
Abbildung 16: Kalibrierkörper	37
Abbildung 17: Kalibration des 3D- Raums	38
Abbildung 18: Elemente der Animationsszene	39
Abbildung 19: Animationsszene	39
Abbildung 20: Ansicht der Animationsszene aus dem Blickwinkel der Kameras.	40
Abbildung 21: Schrittzklus und Fußfallmuster der Probanden im Schritt	43
Abbildung 22: Schrittzklus und Fußfallmuster der Probanden im Trab	44
Abbildung 23: Tracking mit Simi Motion®	48
Abbildung 24: 3D-Druck.	49
Abbildung 25: Horizontale Translation des Gelenks C3/C3	54
Abbildung 26: Diagramme der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	57
Abbildung 27: Vertikale Translation des Gelenks C3/C3	58
Abbildung 28: Diagramme der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	61
Abbildung 29: Laterale Translation des Gelenks C3/C3	62
Abbildung 30: Diagramme der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	64
Abbildung 31: Axiale Rotation des Gelenks C3/C3.	66
Abbildung 32: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	68
Abbildung 33: Laterale Rotation des Gelenks C3/C3	69
Abbildung 34: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	71
Abbildung 35: Sagittale Rotation des Gelenks C3/C3	71
Abbildung 36: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	74
Abbildung 37: Diagramm der Korrelation zwischen horizontaler Translation (Tx) und vertikaler Translation (Ty) des Gelenks C3/C3 im Schritt.	75
Abbildung 38: Diagramm der Korrelation zwischen vertikaler Translation (Ty) und sagittaler Rotation (Rz) des Gelenks C3/C3 im Schritt.	75

Abbildung 39: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (R_x), vertikaler Translation (T_y) und lateraler Translation (T_z) des Gelenks C3/C3 im Schritt.....	76
Abbildung 40: Sagittale Rotation des Gelenks C2/C1	77
Abbildung 41: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt....	79
Abbildung 42: Laterale Rotation des Gelenks C2/C1	80
Abbildung 43: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt.	81
Abbildung 44: Axiale Rotation des Gelenks C2/C1.....	82
Abbildung 45: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt.....	84
Abbildung 46: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (R_y) und lateraler Rotation (R_z) des Gelenks C2/C1 im Schritt.....	85
Abbildung 47: Axiale Rotation des Gelenks C1/Schädel	86
Abbildung 48: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt.	87
Abbildung 49: Laterale Rotation des Gelenks C1/Schädel.....	88
Abbildung 50: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt.	90
Abbildung 51: Sagittale Rotation des Gelenks C1/Schädel.....	91
Abbildung 52: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt.	94
Abbildung 53: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (R_x) und lateraler Rotation (R_y) des Gelenks C1/Schädel im Schritt.	95
Abbildung 54: Diagramme der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab.	98
Abbildung 55: Diagramme der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab.	101
Abbildung 56: Diagramme der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab..	104
Abbildung 57: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab.	106
Abbildung 58: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab.	108
Abbildung 59: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab. ...	110
Abbildung 60: Diagramm der Korrelation zwischen horizontaler Translation (T_x) und vertikaler Translation (T_y) des Gelenks C3/C3 im Trab.....	111
Abbildung 61: Diagramm der entkoppelten Korrelation zwischen horizontaler Translation (T_x) und vertikaler Translation (T_y) des Gelenks C3/C3 im Trab.....	112
Abbildung 62: Diagramm der Korrelation zwischen vertikaler Translation (T_y) und sagittaler Rotation (R_z) des Gelenks C3/C3 im Trab.....	113
Abbildung 63: Diagramm der reduzierten Korrelation zwischen vertikaler Translation (T_y) und Sagittaler Rotation (R_z) des Gelenks C3/C3 im Trab.....	113
Abbildung 64: Diagramm der Korrelation zwischen vertikaler Translation (T_y), lateraler Translation (T_z) und axialer Rotation (R_x) des Gelenks C3/C3 im Trab...	114
Abbildung 65: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab. ...	116
Abbildung 66: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab.	118
Abbildung 67: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab.	119
Abbildung 68: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (R_y) und lateraler Rotation (R_z) des Gelenks C3/C3 im Trab.	120
Abbildung 69: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab.	122

Abbildung 70: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab.	123
Abbildung 71: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab.	126
Abbildung 72: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (Rx) und lateraler Rotation (Ry) des Gelenks C1/Schädel im Trab.	127
Abbildung 73: Diagramm der Korrelation zwischen sagittaler Rotation des Gelenks C3/C3 und des Gelenks C1/Schädel im Trab.	132
Abbildung 74: Rotationsbewegungen von Hund 3 während Schritt 4 im Trab.	133
Abbildung 75: Diagramm der Translationsbewegungen der Gelenkkette im Schritt	157
Abbildung 76: Diagramm der Translationsbewegungen der Gelenkkette im Trab..	158
Abbildung 77: Diagramm der Rotationsbewegungen der Gelenkkette im Schritt ...	159
Abbildung 78: Diagramm der Rotationsbewegungen der Gelenkkette im Trab	160
Abbildung 79: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantoaxialgelenks im Schritt	161
Abbildung 80: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantoaxialgelenks im Trab	162
Abbildung 81: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantookzipitalgelenks im Schritt	163
Abbildung 82: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantookzipitalgelenks im Trab	164
Abbildung 83: Teil 1 der Berechnung der Strecken zwischen den Trackingpunkten mittels der mit Simi Motion® ermittelten Koordinaten.	171
Abbildung 84: Teil 2 der Berechnung der Strecken zwischen den Trackingpunkten mittels der mit Simi Motion® ermittelten Koordinaten.	172

4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Patientenübersicht	26
Tabelle 2: Duty-Faktor der Probanden	42
Tabelle 3: Schrittnormierung.....	44
Tabelle 4: Messgenauigkeit.....	46
Tabelle 5: Auf- und Abfußungszeitpunkte im Schritt.....	51
Tabelle 6: Auf- und Abfußungszeitpunkte im Trab.....	53
Tabelle 7: Range of Motion der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	56
Tabelle 8: Range of Motion der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	60
Tabelle 9: Range of Motion der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	64
Tabelle 10: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	68
Tabelle 11: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	70
Tabelle 12: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt.	73
Tabelle 13: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt.	78
Tabelle 14: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt.	81
Tabelle 15: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt.	83
Tabelle 16: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt.	87
Tabelle 17: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt.	89
Tabelle 18: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt.	93
Tabelle 19: Range of Motion der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab.	98
Tabelle 20: Range of Motion der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab.	101
Tabelle 21: Range of Motion der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab.	104
Tabelle 22: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab.	106
Tabelle 23: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab.	107
Tabelle 24: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab.	109
Tabelle 25: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab.	116
Tabelle 26: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab.	117
Tabelle 27: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab.	119
Tabelle 28: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab.	121
Tabelle 29: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab.	123
Tabelle 30: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab.	125

Tabelle 31: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich der Probanden untereinander.	129
Tabelle 32: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich der einzelnen Schritte der Probanden.	129
Tabelle 33: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich der Rotationsbewegungen der Gelenke C3/C3, C2/C1 und C1/Schädel in x-,y- und z-Achse.....	130
Tabelle 34: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich ausgewählter Rotationsbewegungen verschiedener Rotationsachsen, unterschiedlicher Gelenke oder von einem Gelenk.	130
Tabelle 35: Vergleich der Range of Motion vom Atlantookzipitalgelenk und Atlantoaxialgelenk aus der Literatur mit den Maximalwerten der Range of Motion, die im Rahmen dieser Arbeit gemessen wurden.	147
Tabelle 36: Schrittanalyse der Gangart Schritt von Hund 1 und Hund 2	165
Tabelle 37: Schrittanalyse der Gangart Schritt von Hund 3 und Hund 4	166
Tabelle 38: Schrittanalyse der Gangart Trab von Hund 1 und Hund 2	167
Tabelle 39: Schrittanalyse der Gangart Trab von Hund 3 und Hund 4	168
Tabelle 40: Ermittlung der Messgenauigkeit (nach Wachs 2015)- Teil 1	169
Tabelle 41: Ermittlung der Messgenauigkeit (nach Wachs 2015)- Teil 2	170
Tabelle 42: Spearman Korrelation – Vergleich der Schritte der einzelnen Hunde in Schritt und Trab.	173
Tabelle 43: Spearman Korrelation – Vergleich der Gelenkbewegungen in Schritt und Trab.	173
Tabelle 44: Spearman Korrelation – Vergleich ausgewählter Gelenkbewegungen in Schritt und Trab.	173
Tabelle 45: Spearman Korrelation – Vergleich der untersuchten Hunde im Schritt	174
Tabelle 46: Spearman Korrelation – Vergleich der untersuchten Hunde im Trab...	174

5 Einleitung

Die Wirbel des kraniozervikalen Übergangs unterscheiden sich in Morphologie und Biomechanik erheblich von anderen Wirbelsäulenabschnitten. Aufgrund der mobilen Gelenkkonformation, die vor allen Dingen aus Bandverbindungen besteht, ist diese Region häufig von einer Reihe von Erkrankungen betroffen, die auf einer unzureichenden Kongruenz der oberen Halswirbel und des Okziputs beruhen. Bei Toy-Hunderassen wirkt sich das Minderwachstum zusätzlich negativ auf die Festigkeit und Stabilität der Ligamente aus, sodass sich bei diesen Rassen häufig ein Spektrum von klinischen Symptomen einstellt, das mit verschiedenen Begriffen beschrieben wird (atlantoaxiale Instabilität, atlantookzipitale Überlappung oder Overlapping und Chiari-ähnliche Malformation). All diese Erkrankungen umfasst auch der englische Begriff „craniocervical junction abnormalities“ (Cerde-Gonzalez et al. 2009, Cerde-Gonzalez and Dewey 2010, Dewey et al. 2013). Die Diagnose einer solchen kraniozervikalen Instabilität kann bei schweren Veränderungen, die mit einer Kompression des Rückenmarks und entsprechenden klinischen Symptomen einhergehen, einfach sein. Subtilere Instabilitäten, die nicht zu klassischen neurologischen Ausfällen führen und ggf. lediglich Schmerzen hervorrufen, können dagegen eine diagnostische Herausforderung darstellen. Die reine Hypermobilität der Gelenkverbindung ist bei fixierter Lagerung des Kopfes in Streckstellung unter Standardbedingungen oft nicht zu erkennen. Darüber hinaus stellt die Untersuchung mit den bildgebenden Verfahren immer nur eine Momentaufnahme dar, welche die tatsächliche Bewegungsspanne unter physiologischen Bedingungen nicht in vollem Ausmaß abbilden kann. Um diese physiologischen Bewegungsabläufe zu untersuchen, erfolgt in dieser Studie eine dreidimensionale in vivo Untersuchung des kraniozervikalen Übergangs beim Hund. Die ausgewählte Methode, das Scientific Rotoscoping, wird in der Grundlagenforschung, und seit einigen Jahren auch in der Tiermedizin, zur Analyse von Bewegungsabläufen bei verschiedensten Tierarten eingesetzt. Die Untersuchung gesunder Chihuahuas in Bewegung soll Erkenntnisse über Bewegungsmuster und Bewegungsumfang des kraniozervikalen Übergangs in verschiedenen Gangarten unter physiologischer Muskelaktivität liefern.

6 Ziel der Studie

Ziel der Studie ist die Untersuchung in vivo der dreidimensionalen Kinematik des kraniozervikalen Übergangs beim Chihuahua in den Gangarten Schritt und Trab. Es erfolgt eine Analyse von Bewegungen, die mittels Fluoroskopie und synchroner Hochgeschwindigkeitsvideographie aufgezeichnet werden und die Grundlage für das Scientific Rotoscoping darstellen. Die aufgezeichneten Bewegungen beinhalten die Fortbewegung an sich und aktive Kopfbewegungen, die während der Fortbewegung auftraten. Mittels Scientific Rotoscoping produzierte dreidimensionale Bewegungsdaten der untersuchten Gelenkkette und intervertebraler Bewegungen werden hinsichtlich ihres Musters, Ausmaßes und ihrer Korrelation zum Schrittzklus oder zu einer aktiven Kopfbewegung analysiert. Diese Daten werden dann zwischen den Individuen und den Gangarten Schritt und Trab verglichen.

7 Literaturübersicht

7.1 Anatomie des Okzipitoatlantoaxialgelenks

Das Okzipitoatlantoaxialgelenk kann als eine morphologische und funktionelle Einheit betrachtet werden, da die Gelenkhöhle des Atlantookzipitalgelenks mit der Gelenkhöhle des Atlantoaxialgelenks kommuniziert. Der anatomische Verknüpfungspunkt ist ventral der Densspitze. Die zusammengesetzte Gelenkhöhle weist eine Sanduhrform auf (Watson et al. 1986, Evans and de Lahunta 2013)

7.1.1 Knöcherne Strukturen

7.1.1.1 Os occipitale

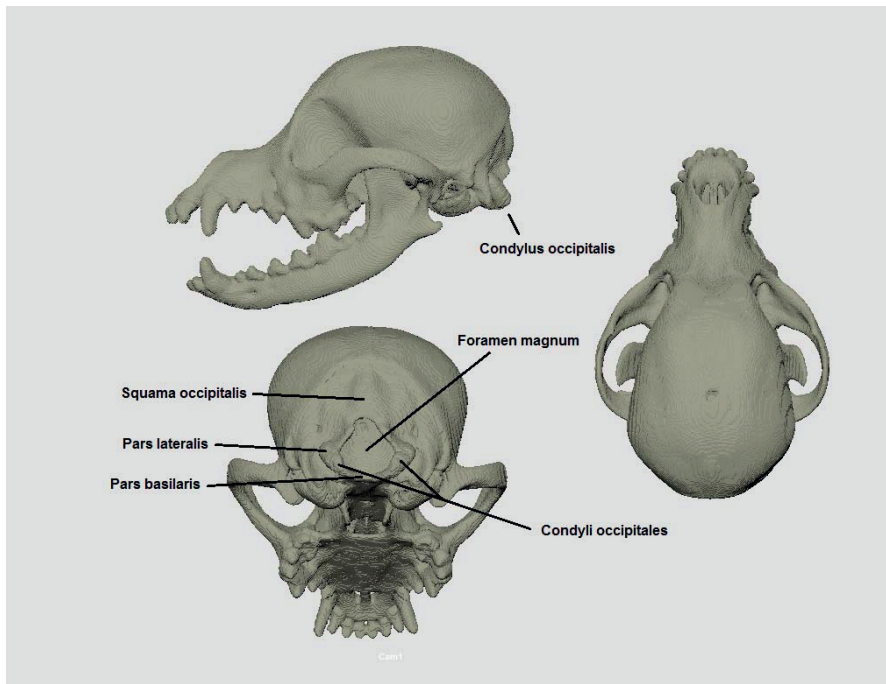


Abbildung 1: Modell eines kaninen Schädels. Dreidimensionale Ansicht von lateral, dorsal und kaudal.

Das Hinterhauptbein oder Os occipitale bildet die kaudale Begrenzung des Schädels und formt mit seinen Anteilen Pars basilaris, Pars lateralis und Squama occipitalis wichtige Elemente des ersten Kopfgelenkes. Die Pars basilaris und die Partes laterales umrahmen das Foramen magnum, wobei die Partes laterales beidseits die Condyli occipitales bilden und die Squama occipitalis vor allem als Insertionsstelle für die Streckmuskeln des ersten Kopfgelenkes dient (Salomon et al. 2005, Evans and de Lahunta 2013). Bei Zwergrassen unterscheidet sich das Foramen magnum von dem normalgroßer Hunderassen. Hunde brachycephaler Zwergrassen können als Folge einer unvollständigen Ossifikation eine dorsale Ausziehung des Foramen magnum an der Squama occipitalis haben, die in der Regel als Normvariante oder physiologische Variation eingestuft und als „dorsal notch“ bezeichnet wird (Watson et al. 1989, Simoens et al. 1994, Bagley et al. 1996). Meist besitzt dieser Teil des Foramen magnum eine Membran aus Dura mater und Bindegewebe, so dass das Foramen magnum weiterhin queroval und dessen physiologische Funktion trotz der abweichenden knöchernen Anatomie erhalten bleibt (Parker and Park 1974, Watson et al. 1989, Simoens et al. 1994, Cerda-Gonzalez et al. 2009). Die Größenvariation des Foramen magnum wird, pathologisch betrachtet, als okzipitale Dysplasie bezeichnet und in Abhängigkeit von der Größe der dorsalen Ausziehung im Verhältnis zur normalen Höhe des Foramen magnum in Dysplasiegrad 1 bis Dysplasiegrad 3 eingeteilt. Über entsprechende Messungen kann der sogenannte Okzipitale Index berechnet werden, der für oder gegen eine Dysplasie spricht (Parker and Park 1974, Watson et al. 1989, Simoens et al. 1994).

7.1.1.2 Atlas

Der 1. Halswirbel oder Atlas besteht aus zwei breiten Querfortsätzen bzw. Flügeln, den Alae atlantes, die miteinander durch einen dorsalen Bogen, Arcus dorsalis, und einen ventralen Bogen, Arcus ventralis, verbunden sind. Am Arcus dorsalis ist ein Knochenvorsprung, das Tuberculum dorsale, ausgebildet, am Arcus ventralis ein Tuberculum ventrale. Am kranialen Ende des Atlas befinden sich zur Artikulation mit den Kondylen des Okziput die Gelenkflächen, die Foveae articulares craniales. Am kaudalen Ende des Arcus ventralis, zur Artikulation mit dem 2. Halswirbel, sind die

Foveae articulares caudales ausgebildet. Diese dehnen sich auf der dorsalen Oberfläche des Arcus ventralis zur Fovea dentis aus (Salomon et al. 2005).

Je nach Körpergewicht ist die Morphologie und Knochenstruktur des Atlas anders ausgelegt. Bei mittelgroßen und großen Hunden zeigt sich im Knochen des Atlasbogens eine zweilagige Kompakta mit dazwischen gelegener Trabekelstruktur und die relative Länge der Alae atlantis nimmt zu (Parry et al. 2010).

Bei Toyrassen zeigt der Atlas gehäuft einen verkürzten kraniokaudalen und verlängerten dorsoventralen Durchmesser, so dass der Wirbelkanal eine hochovale Form einnimmt. Großwüchsige Hunderassen zeigen einen querovalen bis runden Wirbelkanaldurchmesser (Schlegel et al. 2010, Spörl 2014).

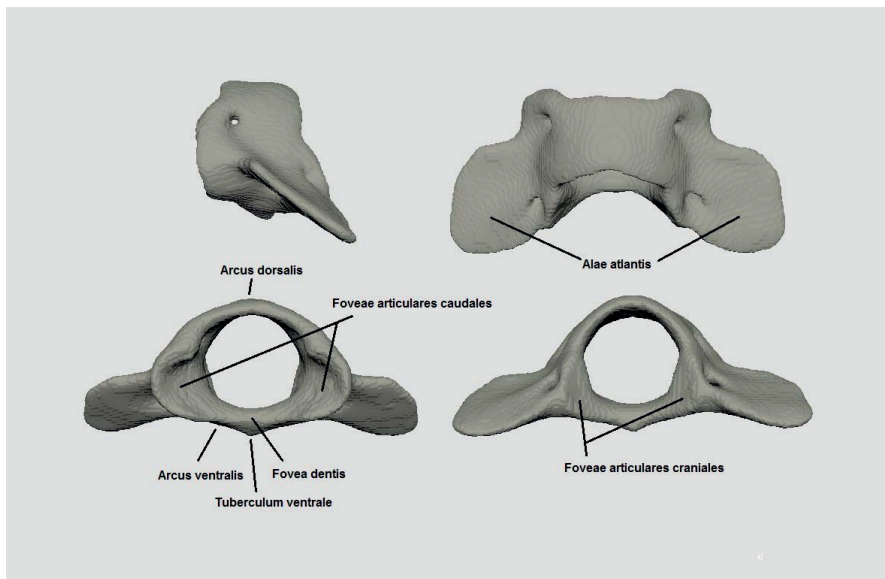


Abbildung 2: Modell eines kaninen Atlas. Dreidimensionale Ansicht von lateral, dorsal, kaudal und kranial.

7.1.1.3 Axis

Der Axis ist der längste Halswirbel (Nickel et al. 1968). Der Dornfortsatz, *Processus spinosus*, hat eine Kammform und ragt weit nach kranial und kaudal. Der Wirbelkörper trägt kranial den *Dens axis*, und dieser ragt in die *Fovea dentis* des Atlas. Am kranialen Rand des Wirbelkörpers, rechts und links vom *Dens axis*, befinden sich die Gelenkflächen zur Artikulation mit dem Atlas, die *Processus articulares craniales*. Die Gelenkflächen zur Artikulation mit dem dritten Halswirbel, die *Processus articulares caudales*, befinden sich kaudodorsal am kammförmigen *Processus spinosus*. Die Querfortsätze des Axis sind nur schwach entwickelt und sind nach kaudal gerichtet (Salomon et al. 2005).

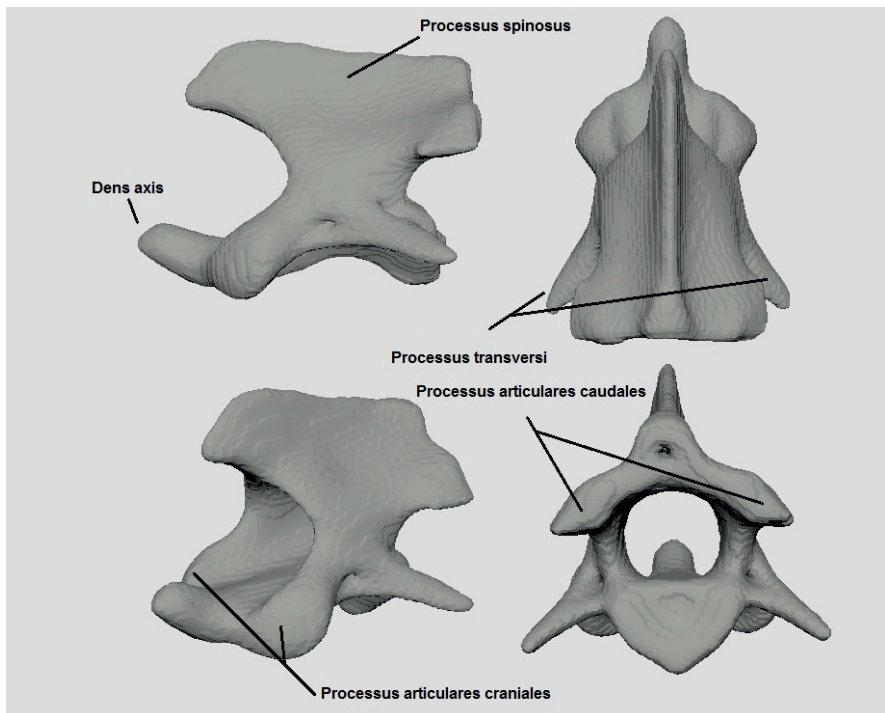


Abbildung 3: Modell eines kaninen Axis. Dreidimensionale Ansicht von lateral, dorsal, kranio-lateral und kaudal.

7.1.2 Bandapparat

Der Bandapparat besteht aus Bändern oder Ligamenta, die zwischen dem Okziput und dem Atlas, dem Atlas und dem Axis sowie zwischen dem Okziput und dem Axis verlaufen. Die Ligamenta lateralia verlaufen zwischen dem lateralen Anteil des Arcus dorsalis bzw. den Alae atlantes und den Processus paracondylares (Salomon et al. 2005, Evans and de Lahunta 2013), die Ligamenta alaria ziehen von den Seitenflächen des Dens axis zu den Medialflächen der Condyli occipitales (Evans and de Lahunta 2013) und das Ligamentum apicis dentis verläuft von der Densspitze zur Pars basilaris des Okziput (Salomon et al. 2005). Das Ligamentum transversum atlantis verläuft quer über den Dens axis, von einer Seite des Arcus ventralis des Atlas zur anderen Seite des Arcus ventralis. Das Ligamentum atlantoaxiale dorsale verbindet den Processus spinosus des Axis mit dem Tuberculum dorsale des Atlas (Salomon et al. 2005). Außerdem sind drei weitere paarige Bänder beschrieben: Das Ligamentum dorsale atlantis dextrum und sinistrum, das Ligamentum collaterale atlantis internum craniale dextrum und sinistrum sowie das Ligamentum collaterale internum caudale dextrum und sinistrum (Kupczynska et al. 2012).

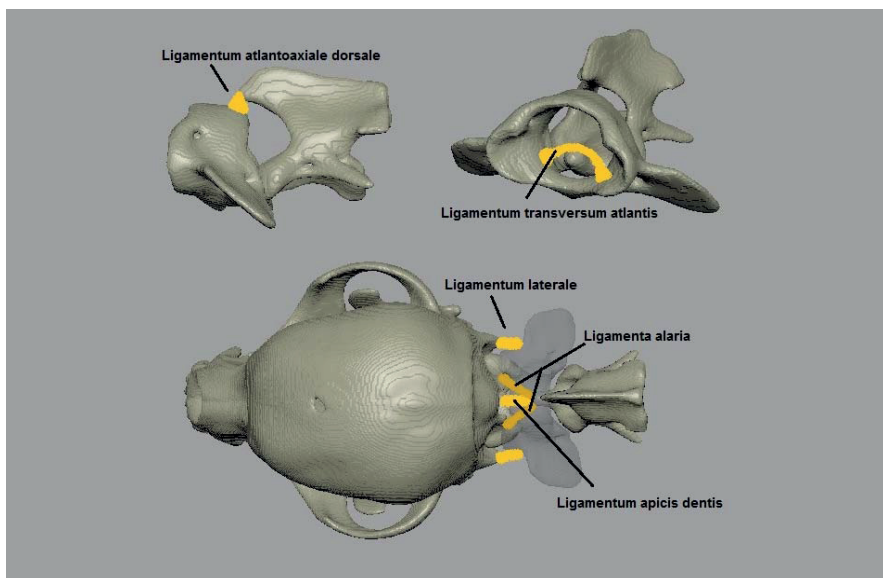


Abbildung 4: Kraniozervikaler Bandapparat - Modell eines kaninen kraniozervikalen Übergangs mit eingezeichneten Bändern. Dreidimensionale Ansicht von lateral, kranio lateral und dorsal.

7.1.3 Muskulatur

Für die Kopfbewegung sind zum einen die sogenannten besonderen Kopfbeweger zuständig, insbesondere für die Bewegung des Atlantookzipital- und Atlantoaxialgelenks. Zum anderen tragen Muskeln des Stammes, die vom Stamm zum Kopf ziehen, direkt oder indirekt zur Bewegung bei (Nickel et al. 1968). Im Gegensatz zum Menschen ist beim Hund der Massenmittelpunkt des Kopfes vor der Wirbelsäule. Schon allein um das Kopfgewicht zu tragen, ist aktive Muskelkraft nötig (Graf et al. 1995, Sharir et al. 2006). Zu den besonderen Bewegern des Kopfes gehören folgende Muskeln:

- Der *Musculus rectus capitis dorsalis major* und der *Musculus rectus capitis dorsalis minor* sind Strecker des Atlantookzipitalgelenkes. Sie liegen übereinander und ziehen dorsal vom *Processus spinosus* des *Axis* bzw. vom *Tuberculum dorsale* des *Atlas* an die *Squama occipitalis* (Nickel et al. 1968, Salomon et al. 2005).
- Der *Musculus rectus capitis ventralis* und der *Musculus rectus capitis lateralis* sind Beuger des Atlantookzipitalgelenkes. Sie ziehen vom *Arcus ventralis* des *Atlas* zur Schädelbasis bzw. den *Processus paracondylares*, wobei der *Musculus rectus capitis lateralis* auch eine Lateralbewegung des Atlantookzipitalgelenkes ausüben kann (Nickel et al. 1968, Salomon et al. 2005).
- Der *Musculus obliquus capitis cranialis* ist Strecker und Seitwärtsbeweger des Atlantookzipitalgelenkes. Er verläuft vom kranialen Rand der *Ala atlantis* zur *Squama occipitalis* (Salomon et al. 2005).
- Der *Musculus obliquus capitis caudalis* ist Dreher des Atlantoaxialgelenkes. Er zieht vom *Processus spinosus* des *Axis* zur *Ala atlantis* (Nickel et al. 1968, Salomon et al. 2005).
- Der *Musculus longus capitis* ist ein Beuger des Kopfes und der von ihm ebenfalls überbrückten Halswirbel. Er zieht von den Querfortsätzen des dritten bis sechsten Halswirbels zur Schädelbasis (Nickel et al. 1968, Salomon et al. 2005).

Des Weiteren an der Kopfbewegung beteiligt sind die Musculi brachiocephalicus, sternocephalicus, longissimus capitis et semispinalis capitis (Nickel et al. 1968) mit folgenden Anteilen und Funktionen:

- Der Musculus brachiocephalicus ist ein dreiteiliger Muskel, zusammengesetzt aus den Musculi cleidocervicalis, cleidomastoideus et cleidobrachialis. Er erstreckt sich vom Kopf zum Humerus. Bei festgestellter Extremität kann der Musculus brachiocephalicus als Niederzieher oder Seitwärtsbieger des Kopfes agieren. Werden Kopf und Hals durch andere Muskeln fixiert, streckt der Muskel das Schultergelenk und ist am Vorwärtsführen der Gliedmaße beteiligt (Nickel et al. 1968, Salomon et al. 2005).
- Der Musculus sternocephalicus ist ein zweiteiliger Muskel, bestehend aus dem Musculus sternomastoideus und dem Musculus sternooccipitalis. Er entspringt am Manubrium sterni und zieht zum Processus mastoideus des Os temporale bzw. zur Crista nuchae (Nickel et al. 1968, Salomon et al. 2005, Evans and de Lahunta 2013). Der Muskel dient als Seitwärtsbeweger und Beuger von Hals und Kopf (Salomon et al. 2005).
- Der Musculus longissimus capitis entspringt an den Gelenkfortsätzen bzw. Querfortsätzen der letzten Hals-/Brustwirbel und zieht zum Processus mastoideus vom Os temporale. Er fungiert als Strecker des Atlantoakzipitalgelenkes und Dreher des Atlantoaxialgelenkes (Nickel et al. 1968, Evans and de Lahunta 2013).
- Der Musculus semispinalis capitis ist ein zweigeteilter Muskel und besteht aus dem Musculus biventer cervicis und dem Musculus complexus. Er ist die Fortsetzung der Musculi spinalis et semispinalis thoracis et cervicis und zieht von den Gelenkfortsätzen bzw. Querfortsätzen der letzten Hals-/Brustwirbel zum Okziput. Seine Funktion ist die Seitwärtsbiegung und Streckung von Kopf und Hals (Nickel et al. 1968, Evans and de Lahunta 2013).

7.2 Biomechanik des Okzipitoatlantoaxialgelenks

Klassischerweise wird die Halswirbelsäule in zwei Abschnitte unterteilt: die obere und die untere Halswirbelsäule, funktionell wird sie aber dreigeteilt betrachtet (Graf et al. 1995, Arnold et al. 2016). Zur Beschreibung der Bewegungen zwischen den Wirbelgelenken werden drei Körperachsen definiert: eine Sagittalebene, eine Horizontalebene oder Längsachse und eine Transversalebene. Bewegungen entlang dieser Körperachsen werden als Translationsbewegungen bezeichnet. Bewegungen um eine Körperachse herum werden als Rotationsbewegungen bezeichnet. Je nach Gelenktyp ermöglicht ein Gelenk unterschiedliche Bewegungsmöglichkeiten und -dimensionen um diese beschriebenen Körperachsen. Die Bewegung um jede Achse nennt man „Freiheitsgrad“ eines Gelenks. Bei Bewegungen in jeweils positiver oder negativer Richtung ergeben sich also sechs Freiheitsgrade oder „Degrees of Freedom“ (Hofstetter et al. 2009, Wachs 2015). Die Bewegungsmuster in der Halswirbelsäule bei Hunden stimmen im Wesentlichen mit denen des Menschen überein (Penning and Badoux 1987).

Hauptbewegung des Atlantookzipitalgelenkes ist die sagittale Rotation, die zu einer Extensions- oder Flexionsbewegung führt. Die laterale Rotation, auch als laterale Biegung bezeichnet, ist ein Zusammenspiel des gesamten Okzipitoatlantoaxialgelenkes, mit gleichmäßig verteiltem Ausmaß. Zu diesem Zweck bewegen sich Atlasbogen und Dens axis jeweils in die entgegengesetzte Richtung. Hauptbewegung des Atlantoaxialgelenkes ist die axiale Rotation. Eine sagittale Rotation im Atlantoaxialgelenk ist nur in geringem Ausmaß möglich (Morgan et al. 1986, Penning and Badoux 1987, Goel et al. 1988, Panjabi et al. 1988, Wolfla 2006, Spörl 2014). Ein geringes Ausmaß an axialer Rotation ist im Atlantookzipitalgelenk beim Menschen dokumentiert (Dvorak et al. 1988, Goel et al. 1988, Panjabi et al. 1988). Während die sagittale Rotation von anderen Rotationen unabhängig ist, wurde für die mittlere und untere Halswirbelsäule eine Kopplung der lateralen und axialen Rotation nachgewiesen (Onan et al. 1998, Breit and Kunzel 2002, Hofstetter et al. 2009). Für den kraniozervikalen Übergang beim Menschen ist die Kopplung zwischen axialer und lateraler Rotation ebenfalls bekannt (Goel et al. 1988).

Bewegungen an Gelenken und auch an der Wirbelsäule sind zusammengesetzte Bewegungen aus Rotation und Translation. Das in Bewegungsanalysen bestimmte

aktuelle Rotationszentrum oder englisch auch „Instantaneous Center of Rotation“ berücksichtigt beide Bewegungskomponenten (Penning and Badoux 1987, Bogduk and Mercer 2000, König and Spetzger 2014). Per Definition kann damit jede Bewegung als momentane Drehung betrachtet werden, wobei der Drehpunkt oder eigentlich Momentanpol seine Position verändert (Rizzi et al. 1977). Wird als Rotationszentrum einer Bewegung eine fixe Rotationsachse definiert, unterscheiden sich die Ergebnisse der Bewegungsanalyse unter Anwendung eines aktuellen Rotationszentrums (Grant 1973). Nimmt bei einer Bewegung der Anteil an Translation zu, zum Beispiel aufgrund einer Bandscheibendegeneration in der Lendenwirbelsäule oder einer Instabilität der Halswirbelsäule, verlagert sich der Rotationspunkt (Krismer et al. 1997, Lee et al. 1997).

Die „Instantaneous Centers of Rotation“ in der Halswirbelsäule beim Hund wurden mittels Röntgenbildern im laterolateralen und ventrodorsalen Strahlengang bestimmt. Untersucht wurden die sagittale und laterale Rotation (Penning and Badoux 1987). Als Maß an Beweglichkeit an Gelenken und somit auch an der Halswirbelsäule wird der Bewegungsumfang oder „Range of Motion“ (ROM) angegeben (Morgan et al. 1986, Penning and Badoux 1987, Hofstetter et al. 2009, Johnson et al. 2011). Bei Flexion und Extension befindet sich das aktuelle Rotationszentrum des Atlantookzipitalgelenks mittig in den Condylus occipitales, beim Atlantoaxialgelenk im Dens axis. Beim dritten bis zum siebten Halswirbel liegt das aktuelle Rotationszentrum jeweils hinter den Bandscheiben. In diesen Gelenken unterscheiden sich die Rotationszentren bei Mensch und Hund (Penning and Badoux 1987). Bei Lateralflexion ergeben sich aufgrund des Zusammenspiels des gesamten Okzipitoatlantoaxialgelenkes drei aktuelle Rotationszentren. Das Rotationszentrum des Atlantookzipitalgelenkes befindet sich kaudal in der Schädelbasis zwischen den Condylus occipitales, während das des Atlantoaxialgelenkes mittig im Wirbelkörper des Axis liegt und das des Okzipitoatlantoaxialgelenkes im Ganzen in der Densspitze. In den hinteren Halswirbeln befinden sich die Rotationszentren auf Bandscheibenhöhe oder auf den angrenzenden Wirbelenden. Aufgrund der beim Menschen mit der Lateralflexion gekoppelten axialen Rotation konnte kein Vergleich zwischen Mensch und Hund gezogen werden (Penning and Badoux 1987). Aber auch bei Hunden ist die Fähigkeit der axialen Rotation und Kopplung mit der lateralen Rotation dokumentiert (Breit and Kunzel 2002, Hofstetter et al. 2009, Johnson et al. 2011).

7.3 Ausgewählte Anomalien des kraniozervikalen Überganges

Der Begriff der Anomalien des kraniozervikalen Überganges oder „craniocervical junction abnormalities“ umfasst eine Reihe von Erkrankungen, die diese Region betreffen: Atlantookzipitales Overlapping, atlantoaxiale Instabilität, Chiari-ähnliche Malformation und dorsale Kompression von C1/C2 (Dewey et al. 2013). Dieser Begriff ist daraus entstanden, dass bei Hunden mit atlantoaxialer Instabilität auch andere Erkrankungen des kraniozervikalen Überganges diagnostiziert wurden (Cerdeja-Gonzalez et al. 2009, Marino et al. 2012). Die gemeinsame embryologische Entwicklung des kraniozervikalen Überganges erklärt diesen Zusammenhang (Watson et al. 1986, Watson and Stewart 1990, Dewey et al. 2013).

7.3.1 Atlantoaxiale Instabilität

Unter dem Begriff der atlantoaxialen Instabilität wird zunächst die klinisch relevante atlantoaxiale Subluxation definiert, die bei Hunden zum ersten Mal im Jahr 1967 beschrieben wurde (Geary et al. 1967). Diese beschreibt das Versagen der stabilisierenden Strukturen eines Gelenks. Heute versteht man unter atlantoaxialer Instabilität eine übermäßige atlantoaxiale Beweglichkeit bei Zwergrassen im Vergleich zu größeren Hunderassen. Dieser übermäßigen Beweglichkeit kann eine kongenitale Ursache, eine traumatische Ursache, eine Entwicklungsstörung oder eine Kombination aus diesen zu Grunde liegen (Gilmore 1984, McCarthy et al. 1995, Beaver et al. 2000, Havig et al. 2005). Zum Teil wird auch eine degenerative oder gefäßassoziierte ischämische Komponente bei der Densentwicklung diskutiert (Watson and Stewart 1990, Beaver et al. 2000, De Lahunta et al. 2014). Ein Spektrum von Wachstumsstörungen beteiligter knöcherner und verbindender Strukturen wurde identifiziert. Ossifikationsstörungen des Atlas, die auch als prädisponierender Faktor bei großen Rassen beschrieben wurden (Parry et al. 2010) und Denspathologien wie Aplasie, Hypoplasie oder Fraktur bilden die Hauptursachen für eine atlantoaxiale Instabilität (Gilmore 1984, Beaver et al. 2000, Platt et al. 2004, Havig et al. 2005, Middleton et al. 2012, Aikawa et al. 2013, Stigen et al. 2013). Im

Hinblick auf Densanomalien bei atlantoaxialer Instabilität teilen sich die Pathologien prozentual auf in 39 % Densaplasie, 35 % Denshypoplasie und 6 % Densfraktur. Des Weiteren liegt bei 2 % eine dorsale Densangulation vor und bei 18 % eine normale Densmorphologie (Afonso 2014) Weitere Pathologien betreffen den Bandapparat. Hier wurde das Fehlen oder die Fehlentwicklung des Ligamentum transversum atlantis (Watson AG 1989, Middleton et al. 2012) und des Ligamentum apicis dentis nachgewiesen. Für das Letztere wurden auch eine Elongation und unregelmäßige Verdickung des Ligaments dokumentiert. Eine Verdickung konnte ebenfalls auch für die Ligamenta alaria nachgewiesen werden (Middleton et al. 2012).

Prädisponiert für eine atlantoaxiale Instabilität sind Zwergrassen, von denen vor allem Yorkshire Terrier, Zwerg-/Toy-Pudel, Pekinesen, Zwergspitze und Chihuahuas in der Literatur gehäuft genannt werden (McCarthy et al. 1995, Beaver et al. 2000, Havig et al. 2005, Cerda-Gonzalez and Dewey 2010, Aikawa et al. 2013, Afonso 2014, Spörl 2014).

Vorgestellt werden die Patienten in einem jungen Alter, oft unter 2 Jahren. Ein chronisch progressiver Verlauf der Erkrankung ist möglich, oft ist ein Bagateltrauma wie ein Treppensturz, ein Sofasturz, ein Griff in den Nacken oder eine Beißerei Teil der Anamnese (Beaver et al. 2000, Platt et al. 2004, Havig et al. 2005, Dewey et al. 2013). Die klinische Symptomatik der vorgestellten Hunde variiert von Schmerzen über Ataxie bis hin zur Tetraplegie, die von Atemproblemen begleitet sein kann. (Thomas et al. 1991, McCarthy et al. 1995, Beaver et al. 2000, Cerda-Gonzalez and Dewey 2010, Dewey et al. 2013). Im Rahmen der bildgebenden Diagnostik kann bei übermäßiger Instabilität bzw. Subluxation die Verdachtsdiagnose bereits in der Röntgenuntersuchung bestätigt werden. Dazu werden Bilder im laterolateralen Strahlengang angefertigt, um die abnorme Position von Atlas und Axis in Relation zueinander darzustellen, aber auch im ventrodorsalen Strahlengang, um die Möglichkeit einer der Instabilität zugrundeliegenden Denspathologie zu klären (Gage and Smallwood 1970, Gilmore 1984, Wheeler 1986).

Die Befunde der laterolateralen Röntgenaufnahmen der kranialen Halswirbelsäule ergeben eine vergrößerte Distanz zwischen Processus spinosus des Axis und dorsalem Atlasbogen und/oder eine Deviation des Axis nach dorsal im Verhältnis zum Atlas (Wheeler 1986, Kent et al. 2010, Stalin et al. 2015). Objektive Messungen, die eine verringerte C1-C2-Überlappung ergeben, erhärten den Verdacht auf eine

atlantoaxiale Instabilität (Cummings et al. 2018). Sind die Befunde weiter unklar, kann zusätzlich mit gebeugtem Kopf geröntgt werden. Dies sollte vorsichtig durchgeführt werden, weil bei Flexion das Rückenmark weiter geschädigt werden kann (Geary et al. 1967, Gage and Smallwood 1970, Oliver and Lewis 1973, McCarthy et al. 1995, Cerda-Gonzalez and Dewey 2010, Kent et al. 2010), möglichst ohne Sedation oder Narkose. Eine Untersuchung am wachen Patienten kann dazu beitragen, eine weitere Rückenmarksschädigung zu vermeiden, da der Hund mit eigener Muskelkraft eine übermäßige Flexion aufgrund der zu erwartenden Schmerzen verhindert (Oliver and Lewis 1973, Spörl 2014) Die dynamische Untersuchung kann auch mittels Fluoroskopie erfolgen (Shores and Tepper 2007).

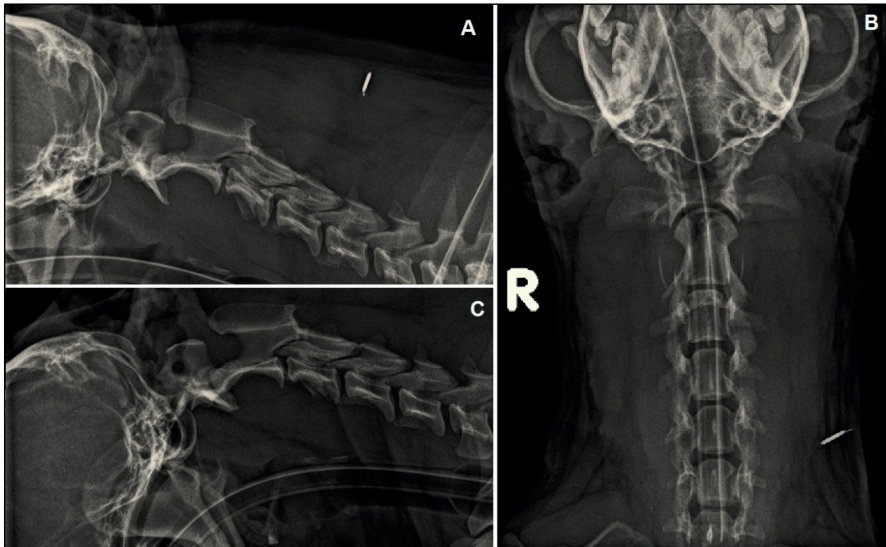


Abbildung 5: Röntgenaufnahmen der kranialen Halswirbelsäule eines Chihuahuas mit diagnostizierter atlantoaxialer Instabilität. Es zeigt sich eine vergrößerte Distanz zwischen der kaudalen Kontur des dorsalen Atlasbogens und der kranialen Kontur des Processus spinosus des Axis. Der Dens axis ist nicht abgrenzbar. A: Laterolaterale Röntgenaufnahme mit neutraler Kopfposition, B: Ventrodorsale Aufnahme, C: Laterolaterale Aufnahme mit geringgradiger Flexion des Kopfes.

In den ventrodorsalen Röntgenaufnahmen können Densanomalien oder das Fehlen des Dens axis identifiziert werden (Oliver and Lewis 1973, Wheeler and Sharp 1994, McCarthy et al. 1995) Durch Überlagerungen im Röntgenbild kann die Beurteilung limitiert sein. In diesem Fall können laterolaterale Schrägaufnahmen hilfreich sein (Cook and Oliver 1981, Stalin et al. 2015).

Auch für die Diagnostik hinsichtlich des Vorliegens einer atlantoaxialen Instabilität sind Messungen publiziert. Im Zuge der Messungen werden der Denswinkel und das Längenverhältnis vom Dens axis zum Axiswirbelkörper bestimmt (Takahashi et al. 2017). Die Beurteilung des Dens axis hinsichtlich morphologischer Abweichungen wird durch die überlagerungsfreie Darstellung in der Computertomographie vereinfacht, und in Kombination mit einer Myelographie kann eine Myelokompression dargestellt werden (McCarthy et al. 1995, Kent et al. 2010). Zur direkten Beurteilung von Rückenmark und Bandapparat ist eine Magnetresonanztomographie nötig (Middleton et al. 2012, Dewey et al. 2013). Der Einsatz beider Modalitäten, Computertomographie und Magnetresonanztomographie, ermöglicht eine ganzheitliche Beurteilung des kraniozervikalen Überganges und ist nötig, um Kombinationserkrankungen zu diagnostizieren (Cerde-Gonzalez et al. 2009, Dewey et al. 2013, Cerde-Gonzalez et al. 2016).

7.3.1.1 Behandlungsstrategien bei atlantoaxialer Instabilität

Für die Therapie der atlantoaxialen Instabilität stehen prinzipiell konservative und chirurgische Methoden zur Verfügung. Eine konservative Therapie der Erkrankung beinhaltet einen mit einer Schiene verstärkten Halsverband, Ruhighaltung und Kortikosteroidgabe. Sie kommt für Patienten mit nur geringgradig ausgeprägter klinischer Symptomatik in Frage (Gilmore 1984, Lorinson et al. 1998, Havig et al. 2005). Fasst man die publizierten Fälle mit insgesamt 31 konservativ behandelten Patienten zusammen, war die Therapie bei 68 % erfolgreich (Wiedmer and Forterre 2016). Die chirurgische Therapie besteht aus Stabilisationstechniken, entweder von dorsal oder von ventral, zur Fixation und dauerhaften Versteifung des atlantoaxialen Übergangs. Für die Stabilisationstechniken von ventral wird im Vergleich häufiger ein positives Resultat beschrieben. Der Vergleich wird dennoch als schwierig gewertet,

da in den Publikationen ein positives Ergebnis unterschiedlich definiert wird, unterschiedliche Follow-up-Zeiträume evaluiert wurden und zusätzlich Faktoren wie neurologischer Status, Alter der Patienten und Chronizität der klinischen Symptomatik die Erfolgsquote beeinflussen (Wiedmer and Forterre 2016). Im Folgenden werden die verschiedenen chirurgischen Stabilisationstechniken vorgestellt.

Dorsale Stabilisationstechniken verwenden Drähte, Fäden oder das Ligamentum nuchae, um mit diesen den dorsalen Atlasbogen mit dem Processus spinosus des Axis zu verbinden (Geary et al. 1967, Oliver and Lewis 1973, Chambers 1977, LeCouteur et al. 1980, Denny et al. 1988, Thomas et al. 1991, Lorinson et al. 1998). Der Kishigami Retraktor macht sich die gleichen Fixationsorte zu Nutze (Kishigami 1984, Van Ee et al. 1989, Pujol et al. 2010). Es ist sowohl eine Fadenstabilisationstechnik in der umgebenden Muskulatur beschrieben (Sanchez-Masian et al. 2014) als auch eine dorsale Technik unter Verwendung von Pins und Polymethylmethacrylat, bei der die Pins vom Processus spinosus des Axis zu den Atlasflügeln ziehen (Jeffery 1996).

Ventrale Stabilisationstechniken verwenden transartikulär gesetzte Schrauben oder Pins, die vom Axiskörper zu den Atlasflügeln ziehen (Denny et al. 1988, Johnson and Hulse 1989, Thomas et al. 1991, Rochat and Shores 1999, Shores and Tepper 2007, Jeserevics et al. 2008, Ozak et al. 2009), Pins und Polymethylmethacrylat, bei der die Pins ventral parasagittal in den Atlas bzw. in den Axis platziert werden (Schulz et al. 1997, Platt et al. 2004, Sanders et al. 2004, Kent et al. 2010, Aikawa et al. 2013) oder Knochenplatten, die den Wirbelkörper des Axis mit dem ventralen Atlasbogen verbinden (Stead et al. 1993, Voss et al. 2006, Dickomeit et al. 2011, Forterre et al. 2012).

Die Prognose ist abhängig von der Schwere der ursprünglichen neurologischen Defizite, wobei insbesondere das positive oder negative Schmerzempfinden ein wichtiger prognostischer Faktor ist. Aber auch die Dauer der klinischen Symptomatik spielt eine Rolle (Beaver et al. 2000, Havig et al. 2005, Cerda-Gonzalez and Dewey 2010, Dewey et al. 2013). Die verschiedenen Denspathologien haben auf das Ergebnis keinen Einfluss (Beaver et al. 2000, Havig et al. 2005, Middleton et al. 2012).

7.3.2 Atlantookzipitale Überlappung

Die atlantookzipitale Überlappung ist durch eine verminderte Distanz zwischen dorsalem Atlasbogen und Okziput charakterisiert. Dabei kann der Atlasbogen im Foramen magnum oder direkt angrenzend an das Foramen magnum liegen (Cerde-Gonzalez et al. 2009, Dewey et al. 2009, Cerda-Gonzalez et al. 2016). Dieses Phänomen der Überlappung grenzt sich sowohl von den beschriebenen Okzipitoatlantoaxialen Malformationen ab, weil keine Fusion mit dem Okziput und auch keine Dysplasie von Atlas oder Axis besteht (Watson et al. 1988, Cerda-Gonzalez et al. 2009), als auch von den beschriebenen atlantookzipitalen Subluxationen (Greenwood and Oliver 1978, Steffen et al. 2003, Rylander and Robles 2007, Cerda-Gonzalez et al. 2009).

Das Ausmaß der Überlappung zeigt einen Zusammenhang mit der Kopfposition. Mit der Extensionsstellung des Kopfes nimmt die Überlappung zu (Dewey et al. 2009, Cerda-Gonzalez et al. 2016). Sie führt zum Abknicken und damit zur Kompression der Medulla oblongata, zur Kompression der zerebellomedullären Zisterne und zum Masseneffekt auf das Kleinhirn (Cerde-Gonzalez et al. 2009, Cerda-Gonzalez et al. 2016).

Zur objektiven Beurteilung der Okziput-Atlas-Position zueinander ist eine Messmethode in der Magnetresonanztomographie beschrieben. Bei der Methode werden vier Messungen im midsagittalen Schnitt von T1-gewichteten Sequenzen des kraniozervikalen Überganges vorgenommen. Anhand der Atlas-Position in Relation zum Okziput wird die atlantookzipitale Überlappung in der Studie in drei Grade eingeteilt (Cerde-Gonzalez et al. 2016).

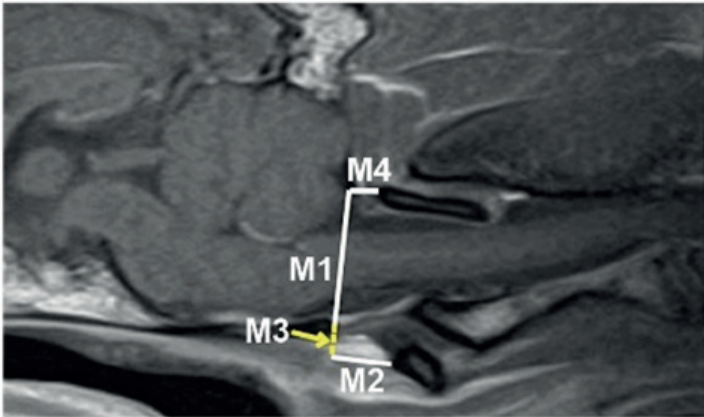


Abbildung 6: Messtechnik zur Beurteilung einer atlantookzipitalen Überlappung nach Cerda-Gonzalez et al. 2016 in der Magnetresonanztomographie, in einem midsagittalen (medianen) Schnitt in T1-gewichteten Aufnahmen des morphologisch normalen kraniozervikalen Übergangs.

Die beste Evaluation des kraniozervikalen Überganges gelingt mit einer Kombination aus Computertomographie und Magnetresonanztomographie. Aufgrund der besseren Beurteilung beteiligter Weichteilstrukturen ist für diese Indikation die Magnetresonanztomographie der Computertomographie vorzuziehen (Cerda-Gonzalez et al. 2016).

Eine hohe Prävalenz der atlantookzipitalen Überlappung konnte bei Zwergrassen, wie dem Yorkshire Terrier und Chihuahua, sowie beim Cavalier King Charles Spaniel nachgewiesen werden. Dabei kann diese mit weiteren kraniozervikalen Anomalien, im Englischen „cranio-cervical junction anomalies“, vergesellschaftet sein (Cerda-Gonzalez and Dewey 2010, Marino et al. 2012, Cerda-Gonzalez et al. 2016). Ein Fallbericht einer chirurgischen Foramen magnum Dekompression mit Stabilisation des Atlantookzipitalgelenkes bei einem Zwergspitz ist beschrieben. Dokumentiert ist der klinische Verlauf bis zur 5-Monats-Kontrolle, bis dahin war die Behandlung erfolgreich (Dewey et al. 2009).

7.4 Grundlagen der instrumentierten Ganganalyse

Nach Erläuterung der Morphologie und Pathomorphologie des kraniozervikalen Übergangs soll hier nun die Ganganalyse vorgestellt werden. Eine objektive und quantitative Erfassung und Bewertung des Gangbildes erfordert eine instrumentierte Ganganalyse (Saleh and Murdoch 1985). Erste objektive Beobachtungen ermöglichte die Fotografie, die zur Ganganalyse bei verschiedenen Tierarten eingesetzt wurde (Muybridge 1887).

7.4.1 Überblick über die Ganganalysemethoden

Im Rahmen der Bewegungsanalyse sind zahlreiche in vivo und in vitro Methoden publiziert. Je nach Messverfahren werden in Bewegungsstudien kinetische und/oder kinematische Daten erfasst. Dabei bezieht sich die Kinetik auf die auf einen Körper einwirkenden Kräfte und die sich daraus ergebende Bewegung, während sich die Kinematik auf die rein geometrische Beschreibung einer Bewegung bezieht (DeCamp 1997, Off and Matis 1997).

In der kinetischen Ganganalyse werden die bei der Fortbewegung entstehenden Bodenreaktionskräfte gemessen. Das Verteilungsmuster der Bodenreaktionskräfte und die Bodenkontaktzeit an den vier Gliedmaßen verändern sich bei pathologischen Prozessen (Griffon et al. 1994, Voss et al. 2007). Die Messung erfolgt mittels Kraftmessplatten. In der Quantifizierung von Lahmheiten stellt die Verwendung von Kraftmessplatten den „Gold Standard“ dar (Bockstahler et al. 2008). Der Mechanismus der Kraftmessplatten beruht auf dem piezoelektrischen Effekt, d.h. die mechanische Beanspruchung bei Belastung erzeugt eine elektrische Ladungsveränderung proportional zur einwirkenden Kraft. In den Bewegungsstudien werden drei Bodenreaktionskräfte erhoben, die nach Raumrichtung der auftretenden Kräfte benannt sind: die Vertikalkraft, die Horizontalkraft oder kraniokaudale Kraft und die Mediolateralkraft (Budsberg et al. 1987, Rumph et al. 1994, DeCamp 1997,

Off and Matis 1997). Die erhobenen Daten werden als Kraft/Zeit-Kurve dargestellt (McLaughlin 2001).

Kinematische Ganganalysen erfassen Bewegungen im Raum unabhängig von der Kraft- und Körpermasse (Clements et al. 2005). Was mit der Fotografie begann, entwickelte sich über die Chronofotografie zur Videokinematografie (Aubert 2002). Computergestützte Videokinematografie ermöglicht eine dreidimensionale Bewegungsanalyse. Marker-basierte Techniken verwenden Hautmarker, im Rahmen des Verfahrens als Landmarks bezeichnet, die an anatomisch definierten Knochenpunkten angebracht werden (Gillette and Angle 2008). Hautverschiebungen über den anatomischen Knochenpunkten während der Bewegung führen allerdings zu Messungenauigkeiten (Van den Bogert et al. 1990, Schwencke et al. 2012). Die Röntgenvideokinematografie nutzt die Fluoroskopie als Grundlage. Die dreidimensionale Untersuchung durch biplanar aufgenommene Röntgenaufnahmen machte sich bereits die Stereoradiographie zu Nutze (Pearcy 1985). Zahlreiche mono- und biplanare videofluoroskopische Untersuchungen, auch mit mobilen Fluoroskopen, sind in der Humanmedizin zum Beispiel zur Evaluation der Kniebewegung verwendet worden (Hitz et al. 2018). XROMM und Scientific Rotoscoping kombinieren Aufnahmen der biplanaren Röntgenvideokinematografie mit aus CT-Datensätzen gewonnenen Knochenmodellen (Brainerd et al. 2010, Gatesy et al. 2010).

Eine Kombination aus Kinetik und Kinematik macht sich die inverse Dynamik zu Nutze. Bei der inversen Dynamik werden kinetische, kinematische und morphometrische Daten erfasst, um das Nettomoment eines Gelenkes zu bestimmen. Es handelt sich um das Nettodrehmoment, das von den Muskeln erzeugt wird, um auf den Drehpunkt eines Gelenkes einzuwirken. So kann die Bewegungsursache ermittelt werden, d.h., welche Muskelgruppe für eine Gelenkbewegung verantwortlich ist (Bresler 1950, Seireg and Arvikar 1973, Meershoek and Van den Bogert 2001, Zsoldos et al. 2010, Headrick 2012, Andrada et al. 2017).

7.5 XROMM und Scientific Rotoscoping

XROMM (X-Ray Reconstruction of Moving Morphology) ist ein virtuelles kinematisches Ganganalyseverfahren, das sich biplanare Röntgenvideographie und Computertomographie zu Nutze macht. Mittels Segmentierung werden die entsprechenden Knochen dreidimensional rekonstruiert und eine hierarchische Knochenmarionette gebaut (Brainerd et al. 2010).

Die biplanare Röntgenvideographie zeichnet die zu untersuchende Bewegung synchron mit Hochgeschwindigkeits-Live-Kameras auf. Die kissenförmige Verzeichnung, die bei den Fluoroskopieaufnahmen aufgrund des gewölbten Eingangsfensters und flachen Ausgangsbildschirms des Bildverstärkers entsteht (Wang and Blackburn 2000, Bushberg et al. 2002), muss vor Weiterverwendung der Videos korrigiert werden. Außerdem können die Videos in Bezug auf Helligkeit und Schärfe weiter optimiert werden.

Durch den Einsatz eines Kalibrationswürfels und entsprechender Software-Berechnung wird der 3D-Raum kalibriert. Das ermöglicht das Nachstellen des Versuchsaufbaus als virtuelle Szene. Diese besteht aus den Röntgenkameras und dem jeweils gegenüber projizierten Röntgenfilm, sowie der Knochenmarionette in deren Zentrum (Brainerd et al. 2010, Gatesy et al. 2010). Die Marker-basierte XROMM-Technik arbeitet mit implantierten Tantalkügelchen, von denen mindestens drei, in maximalem Abstand zueinander, in das zu untersuchende Knochensegment implantiert werden. Die Ermittlung der Markerkoordinaten führt zur Rekonstruktion der 3D-Knochenbewegung (Brainerd et al. 2010). Die Marker-lose XROMM-Technik wird als Scientific Rotoscoping bezeichnet. Die Anpassung der Knochenmarionette an die Bilder der Röntgenvideos erfolgt manuell. Die Knochen des Modells werden deckungsgleich mit der Knochensilhouette in beiden Röntgenebenen positioniert (Gatesy et al. 2010). Es entsteht eine virtuelle sich bewegende Knochenmarionette, den in vivo Bewegungen der Röntgenfilme entsprechend. Damit können zum Beispiel die Daten der Bewegung im Raum und die Bewegungen der Knochen in Relation zueinander erhoben werden (Brainerd et al. 2010, Gatesy et al. 2010).

In Anlehnung an die Studien der Lendenwirbelsäulenbewegung beim Beagle (Wachs 2015) und beim Deutschen Schäferhund (Kopp 2019) mittels Scientific Rotoscoping wurde dieses Verfahren auch für die vorliegende Arbeit gewählt.

7.6 Definition der Gangarten im Rahmen der Ganganalyse

Die Fortbewegung kann in verschiedenen Gangarten, z.B. Schritt, Trab, usw., erfolgen. Alle sind durch eine sich wiederholende Abfolge von Auf- und Abfüßen der vier Gliedmaßen charakterisiert. Je nach Gangart variiert das Fußfallmuster in Rhythmus und Frequenz (Hildebrand 1966, Nunamaker and Blauner 1985, Fischer and Lilje 2011). Der Geschwindigkeitsbereich, in dem die Gangarten gezeigt werden, variiert (Brown and Dalzell 1986, Fischer and Lilje 2011) und das Gangbild an sich variiert auch. Die Variation des Gangbildes ist stark körpergrößenabhängig, sie ist aber auch individuell. Kleine Hunde zeigen die größten Variationen in ihrem Gang (Hildebrand 1952, Hildebrand 1968, Nunamaker and Blauner 1985).

Sogenannte symmetrische Gangarten sind Schritt, Trab und Pass. Die Symmetrie bezieht sich auf die Tatsache, dass sich die Gliedmaßenbewegung der einen Seite auf der kontralateralen Seite zeitlich versetzt wiederholt. Die Abstände der Auffußungszeitpunkte sind annähernd gleichmäßig verteilt (Hildebrand 1966, Nunamaker and Blauner 1985). Die symmetrischen Gangarten stellen ein Kontinuum dar – so gibt es einen schnellen oder passartigen Schritt und einen trabähnlichen Schritt (Fischer and Lilje 2011). Zu den asymmetrischen Gangarten zählt der Galopp, der durch eine Flugphase gekennzeichnet ist. In der sich wiederholenden Bewegungsabfolge bilden die beiden Vorder- und Hintergliedmaßen jeweils eine Einheit. Allerdings ist auch hier das Auffußen geringgradig zeitversetzt (Hildebrand 1965, Nunamaker and Blauner 1985, Fischer and Lilje 2011). Unterschiedliche Galopparten wie langsamer Galopp oder Kanter und schnelle Galopparten wie zyklischer und diagonaler Galopp können unterschieden werden. Gibt es zwei Flugphasen, spricht man von Renngalopp (Brown and Dalzell 1986, Fischer and Lilje 2011).

In der Ganganalyse wird der sich wiederholende Bewegungszyklus als Schritt definiert (Nunamaker and Blauner 1985). In einem Bewegungszyklus sind alle

Bewegungen der Gliedmaßen enthalten, die sich zwischen einer bestimmten Stellung einer Gliedmaße und der Rückkehr dieser Gliedmaße zur initialen Stellung ereignen - in der älteren Literatur auch als Bewegungseinheit oder Bewegungsfolge bezeichnet (Schmaltz 1922, Krüger 1937, Corbin 2004).

Jeder Schritt kann in eine Stemmphase und eine Schwungphase unterteilt werden. Die Stemmphase ist der Anteil vom AufFußen bis zum AbFußen, dies bedeutet, die Gliedmaße hat Bodenkontakt. Die Schwungphase ist der Anteil vom AbFußen bis zum AufFußen, d.h., es ist der Schrittanteil, in dem die Gliedmaße vorgeführt wird (Hildebrand 1966, Hildebrand 1968, Nunamaker and Blauner 1985). Der prozentuale Anteil der Stemmphase am Gesamtschrittzzyklus wird Duty-Faktor genannt und ist neben dem Fußfallmuster ein weiteres Kriterium, um eine Gangart zu definieren. Im Schritt ist aufgrund der im Vergleich zum Trab längeren Stemmphasendauer der Duty-Faktor größer (Hildebrand 1965, Hildebrand 1966, Blaszczyk and Dobrzecka 1989).

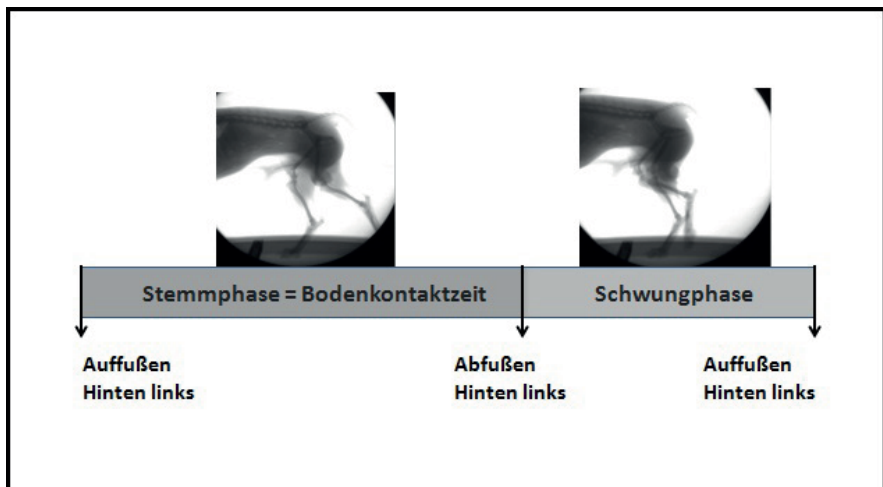


Abbildung 7: Unterteilung des Schrittzzyklus in Stemm- und Schwungphase mit Auf- und AbFußen der linken Hintergliedmaße als Referenzgliedmaße.

Auf Basis der Ganganalyse in der vorliegenden Arbeit wird auf Fußfallmuster und Duty-Faktor von Schritt und Trab in der Folge noch näher eingegangen.

7.6.1 Schritt

Als Referenzgliedmaße dient hinten links, und somit ist das entsprechende Fußfallmuster im Schritt: Auffußen von hinten links gefolgt von vorne links, dann hinten rechts und vorne rechts. Mindestens zwei, meistens drei Gliedmaßen zeigen gleichzeitig Bodenkontakt, wobei sich der Bodenkontakt der diagonalen Vorder- und Hintergliedmaßen überschneidet. Ein Dreibeinstütz wechselt sich mit einem sagittalen und einem diagonalen Zweibeinstütz ab. Der Dreibeinstütz im Schritt hält den Körperschwerpunkt innerhalb des so gebildeten Unterstützungsdreieckes, wodurch der Schritt eine stabile Gangart darstellt (Nunamaker and Blauner 1985, Fischer and Lilje 2011). Mit dem Auffußen der Vordergliedmaßen zu Beginn der jeweiligen Stemmphase ist eine Abwärtsbewegung des Kopfes und des Halses verbunden, während eine Aufwärtsbewegung mit dem Vorschwingen verbunden ist. Der Kopf und der Hals zeigen daher je Schritt zwei Bewegungsspitzen (Nunamaker and Blauner 1985).

In Bezug auf die Stemmphasendauer ist für den Schritt ein Duty-Faktor von über 50 % definiert (Hildebrand 1966, Hildebrand 1968). Die meisten Hunde erreichen einen Duty-Faktor von 59-68 % bei Geschwindigkeiten von 0,5-1,5 m/s. Diese Geschwindigkeiten wurden allerdings für bereits müde Hunde dokumentiert (Blaszczyk and Dobrzecka 1989). In einer anderen Arbeit wurde für Schritt eine Laufbandgeschwindigkeit von 1.32 ± 0.04 m/s beschrieben (Deban et al. 2012).

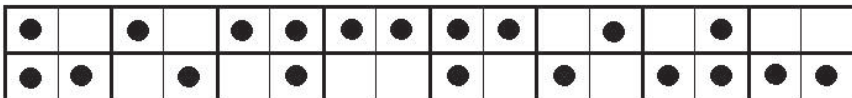


Abbildung 8: Fußfallmuster im Schritt. Der Dreibeinstütz wechselt sich mit einem diagonalen und einem parallelen Zweibeinstütz ab.

7.6.2 Trab

Mit der Referenzgliedmaße hinten links stellt sich das Fußfallmuster vom Trab wie folgt dar: Hinten links und vorne rechts gefolgt von hinten rechts und vorne links. Die Stemm- und Schwungphase der diagonalen Gliedmaßen sind gekoppelt, so dass meist zwei Gliedmaßen in Bodenkontakt sind. Der Körperschwerpunkt befindet sich auf der Unterstützungslinie, die jeweils durch die diagonalen Gliedmaßenpaare gebildet wird (Nunamaker and Blauner 1985, Fischer and Lilje 2011). Der Bodenkontakt der Hintergliedmaßen kann im Vergleich zu dem der Vordergliedmaßen geringgradig länger ausfallen, so dass auch kein exakt synchroner Auffußungszeitpunkt der Gliedmaßenpaare beobachtet wird. Diese Trabform wird auch als 4-Takt-Trab bezeichnet (Hildebrand 1976, Nunamaker and Blauner 1985).

Für den Trab ist ein Duty-Faktor unter oder gleich 50 % definiert (Hildebrand 1966). Die Gangart Trab wurde von Hunden bei einer Geschwindigkeit zwischen 1,2 und 3,1 m/s gezeigt, mit eigenen Präferenzen hinsichtlich ihrer Trabgeschwindigkeit über eine längere Distanz und eng korreliert mit der jeweiligen Länge der Hintergliedmaßen (Błaszczuk and Dobrzecka 1989). Bei einer weiteren Arbeit wurde für Trab eine Laufbandgeschwindigkeit von $2,43 \pm 0,04$ m/s beschrieben (Deban et al. 2012).

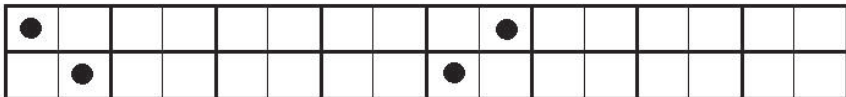


Abbildung 9: Idealisiertes Fußfallmuster im Trab. Es erfolgt ein absolut paralleler Wechsel der diagonalen Gliedmaßenpaare.

8 Material und Methoden

8.1 Tierversuchsgenehmigung

Im Rahmen der Studie wurden gesunde Hunde untersucht. Die Studie wurde von der Ethikkommission der Bundesländer Thüringen und Hessen geprüft und genehmigt: TLV Reg. Nr: 22-2684-04-02-075/14.

8.2 Studienteilnehmer

Die Hunde in dieser Studie sind vier Chihuahuas. Zum Zeitpunkt der Untersuchung waren die Hunde in einem Alter von $37,8 \pm 20,4$ Monaten, hatten ein Gewicht von $2,68 \pm 0,8$ kg und ein Stockmaß von $21,5 \pm 2,38$ cm. Die Hunde sind aus Privathaltung und wurden oder werden zur Zucht eingesetzt. Die Geschlechterverteilung ist 1 Rüde zu 3 Hündinnen.

Tabelle 1: Patientenübersicht mit Angabe von Geschlecht, Stockmaß, Gewicht und Alter.

Patient	Geschlecht	Stockmaß (cm)	Gewicht (kg)	Alter
Hund 1	Weiblich	21	2,8	59
Hund 2	Weiblich	25	3,7	11
Hund 3	Männlich	20	2,1	35
Hund 4	Weiblich	20	2,1	46

8.3 Untersuchungsbestandteile und Abfolge

Die Studie besteht aus drei Bestandteilen:

- Klinische Untersuchung und Schnittbilddiagnostik in der Klinik für Kleintiere, Chirurgie der Justus-Liebig-Universität in Gießen
- Biplanare Röntgenvideographie im Bewegungslabor am Institut für Zoologie und Evolutionsforschung der Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Scientific Rotoscoping und Datenanalyse

Die Studienabfolge und Methodik richtet sich nach der Studie zur „Kinematik des Beckens und der kaudalen Lendenwirbelsäule beim Deutschen Schäferhund – eine Untersuchung mittels biplanarer Röntgenvideographie und Scientific Rotoscoping“ (Kopp 2019) und der Studie „Kinematische Analyse von 3D-rekonstruierten Bewegungen der Lendenwirbelsäule und des Beckens beim Beagle in Schritt und Trab“ (Wachs 2015).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Methodik Scientific Rotoscoping für die Halswirbelsäule beim Chihuahua angewendet.

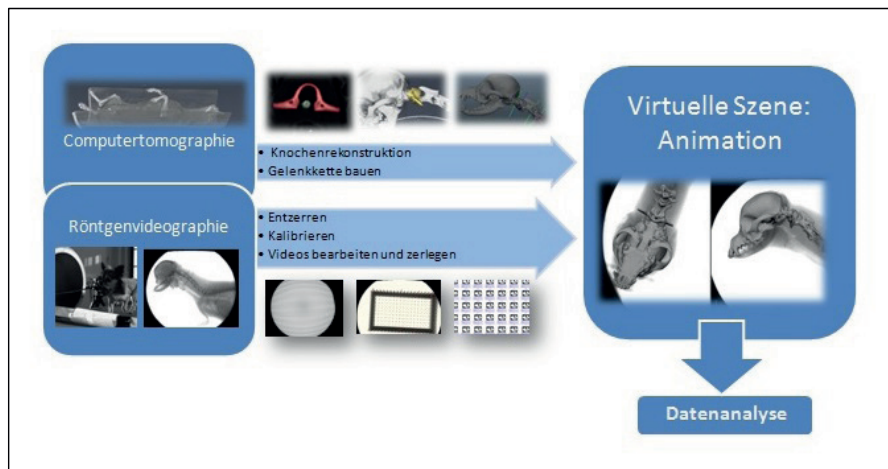


Abbildung 10: Arbeitsschritte des Scientific Rotoscopings.

8.3.1 Klinische Untersuchung und Schnittbildverfahren

An der Klinik für Kleintiere, Chirurgie der Justus-Liebig-Universität in Gießen wurde zunächst eine klinische Untersuchung durchgeführt.

Im Rahmen einer allgemeinen und präanästhetischen Untersuchung wurde der Patient anhand der Einteilung der American Society of Anesthesiologists als narkosefähig (ASA I oder II) und klinisch gesund eingestuft. Es folgte eine Lahmheitsuntersuchung mit orthopädischem und neurologischem Untersuchungsgang. Nur Patienten mit Normalbefund wurden in die Studie eingeschlossen.

Die zu untersuchenden Hunde wurden für die Wirbelsäulendarstellung mittels Computertomographie (CT 16-Slice helical scanner Brilliance Philips) in Narkose gelegt. In den Scan wurden Schädel und Becken mit eingeschlossen. Die Hunde wurden in Rückenlage mit dem Kopf Richtung Gantry in eine Lagerungshilfe gelegt. Es wurde ein Weichteilfenster in 1 mm Schichtdicke gefahren, unter Anwendung von 120 kV und 200 mAs. Ein entsprechendes Knochenfenster wurde errechnet.

Zusätzlich wurde direkt im Anschluss eine Magnetresonanztomographie (MRI 1.0 Tesla superconducting system Intera Philips) der Wirbelsäule angefertigt, deren Daten für Folgestudien zur Verfügung stehen. Die Lagerung erfolgte hier ebenfalls in Rückenlage und Kopf voran. Für die Wirbelsäulendarstellung wurden T2-gewichtete Sequenzen ausgewählt: Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule im Sagittalschnitt, der kraniozervikale und lumbosakrale Übergang im Transversalschnitt.



Abbildung 11: Lagerung des Hundes für die Computertomographie. Der Hund befindet sich in einer Lagerungshilfe, in Rückenlage positioniert mit dem Kopf Richtung Gantry. A: Foto des Hundes von oben, B: Foto des Hundes von der Gantry aus, C: Virtuelle Ansicht mit Vollrekonstruktion von Amira®.

8.3.2 Biplanare Röntgenvideographie

Die biplanare Röntgenvideographie wurde im Bewegungslabor am Institut für Zoologie und Evolutionsforschung der Friedrich-Schiller-Universität Jena durchgeführt. Der Versuchsaufbau entspricht dem Aufbau der Studie „Kinematische Analyse von 3D-rekonstruierten Bewegungen der Lendenwirbelsäule und des Beckens beim Beagle in Schritt und Trab“ (Wachs 2015).

Die Röntgenvideographie-Anlage (Neurostar Siemens AG, München), die mit Bildverstärkersystemen von ca. 40 cm Durchmesser und Hochgeschwindigkeitskameras (Visario Speedcam, Weinberger GmbH, Nürnberg) ausgestattet ist, ist in ihrer Winkelung verstellbar. In der vorliegenden Studie wurde ein Winkel von 90 Grad ausgewählt. Aufgrund dieser Anordnung entsteht ein Video

im laterolateralen und ein weiteres im ventrodorsalen Strahlengang. Ein Shutter mit 500 μ s verhindert Bewegungsunschärfe.

Vor Aufzeichnung der Röntgenvideos wurden die Hunde an die Räumlichkeiten und das Laufen auf dem Laufband gewöhnt und angelert. Eine individuelle Eingewöhnungsphase muss jedem Hunde gewährt werden. Eine Einschätzung der Individuen hinsichtlich Wohlbefinden und Lernfortschritt ist vor Beginn der Aufzeichnung wichtig, damit die Hunde ein möglichst freies, lockeres und gleichmäßiges Gangbild zeigen. Sie dient dem Untersucher außerdem zur Einschätzung der Komfortgeschwindigkeit für Schritt und Trab. Die Hunde zeigten einen gleichmäßigen Schritt bei einer Geschwindigkeit von $0,41 \pm 0,08$ m/s und einen gleichmäßigen Trab bei einer Geschwindigkeit von $0,77 \pm 0,12$ m/s.

Die Aufzeichnung erfolgte unter Anwendung von 80 kV, 40 mA und einer Bildrate von 500 Bildern pro Sekunde. Auf einem höhenverstellbaren Laufband wurden von den Hunden Videos der Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule im Schritt und Trab aufgezeichnet, jeweils mit mindestens fünf aufeinanderfolgenden Schritten. Der Besitzer führte dabei seinen Hund locker an der Leine. Die Laufbandgeschwindigkeit wurde durch den Untersucher im Raum gesteuert und dabei an den laufenden Hund mit Kontrolle seines Gangbildes und Verhaltens angepasst. So konnten dem Besitzer die jeweiligen Anweisungen für die Beeinflussung der Hundeposition auf dem Laufband gegeben werden. Bei Verlassen der Bildebenen wurde die Aufzeichnung abgebrochen und erneut begonnen.

Zum Strahlenschutz diente eine Bleischeibe, Strahlenschutzkleidung und direkt ablesbare Dosimeter. Die Steuerung des Laufbandes konnte zusätzlich unter größtmöglicher Abstandshaltung zur Röntgenanlagen vorgenommen werden.

Synchron zu den Röntgenvideos wurde die Untersuchung von Standard-Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen (Visario SpeedCam MiniVis[®], High Speed Vision GmbH, Ettlingen, Germany). Dadurch können zum einen das Laufbild und andere gegebenenfalls beeinflussende Bewegungen evaluiert werden. Zum anderen werden Auf- und Abfußungszeitpunkte dokumentiert, anhand derer später der Duty-Faktor bestimmt wird.

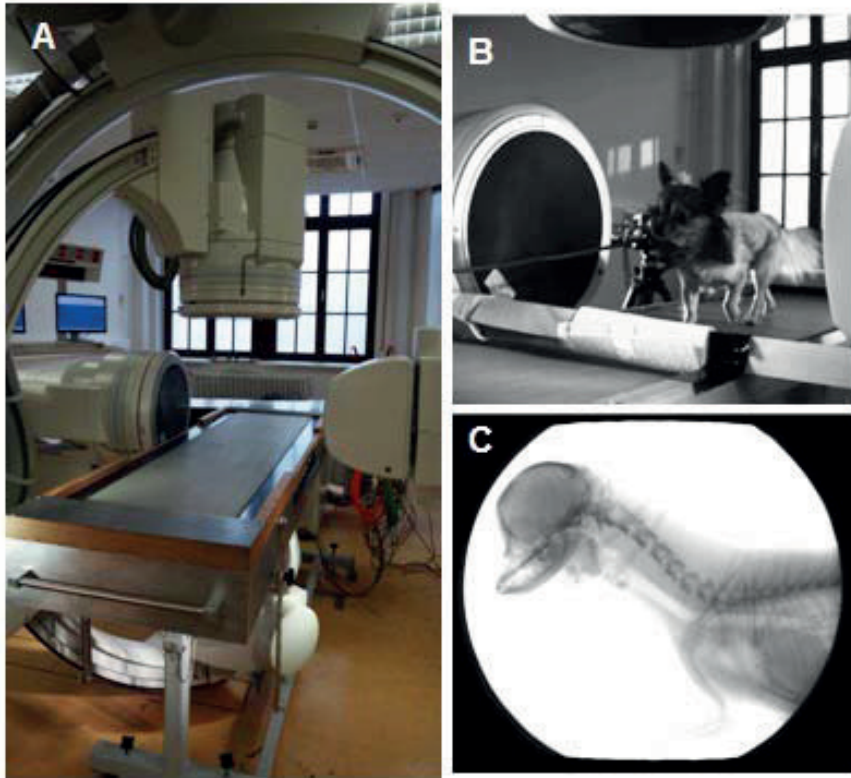


Abbildung 12: Versuchsaufbau für die Röntgenvideographie in 90° Einstellung. A: 90° Einstellung der Röntgenvideographie-Anlage für die Aufzeichnung im laterolateralen und ventrodorsalen Strahlengang mit dem Laufband im Zentrum, B: Chihuahua auf dem Laufband im Strahlengang. Eine Barriere vor dem Hund hat diesem Studienteilnehmer das Halten der gewünschten Position erleichtert, C: Ansicht des laterolateralen Strahlenganges.

8.3.3 Scientific Rotoscoping

Beim Scientific Rotoscoping wird der Versuchsaufbau in einem virtuellen 3D-Raum unter Berücksichtigung und Nutzung der Datensätze aus der computertomographischen Untersuchung und der Röntgenvideographie nachgestellt. Es ist ein nicht-invasives markerloses Verfahren der X-Ray Reconstruction of Moving Morphology (XROMM) und setzt sich aus mehreren Teilschritten zusammen (Brainerd et al. 2010), die nachfolgend zusammengefasst beschrieben werden.

Aus den CT-Datensätzen werden die zu untersuchenden Knochen dreidimensional rekonstruiert und im weiteren Verlauf wird aus diesen eine Knochenmarionette gebaut. Die Videos von der Röntgenvideographie müssen entzerrt, kalibriert und zerlegt werden. Aus der Knochenmarionette und den weiterverarbeiteten Röntgenvideos kann dann der Versuchsaufbau nachgestellt werden, und die Anpassung der Marionette an die Silhouette im Röntgenvideo kann beginnen. Die Daten der angepassten Marionette können zur Analyse exportiert und genutzt werden.

8.3.3.1 Dreidimensionale Knochenrekonstruktion

Die dreidimensionale Rekonstruktion der entsprechenden Knochen wurde mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware Amira 5.5.2® bzw. Amira 6® (Visage Imaging, Berlin, Germany) vorgenommen. Für den Bau der Gelenkkette, in der die Knochen gegeneinander beweglich sein sollen, müssen die Knochen getrennt voneinander rekonstruiert werden. Das Verfahren der Rekonstruktion wird auch als Segmentieren bezeichnet.

Nach Import des Dicom-Datensatzes aus der Computertomographie in das Programm werden im Rahmen des Segmentierens die anatomischen Strukturen im Bild manuell markiert und sogenannten „Materialen“ zugeordnet. Das bedeutet, dass der Knochen in jeder CT-Schnittebene zugehörig zum Schädel, ersten Halswirbel (C1), zweiten Halswirbel (C2) oder dritten Halswirbel (C3) markiert wurde und zum Material 1, 2, 3 oder 4 hinzugefügt wurde. Der Unterkiefer wurde ebenfalls getrennt segmentiert und einem weiteren Material zugeordnet. Aus jedem Material (entsprechend Schädel, C1, C2, C3) wurde ein Polygonmodell erstellt, welches dann für die Weiterverwendung als .obj-Datei gespeichert wurde.

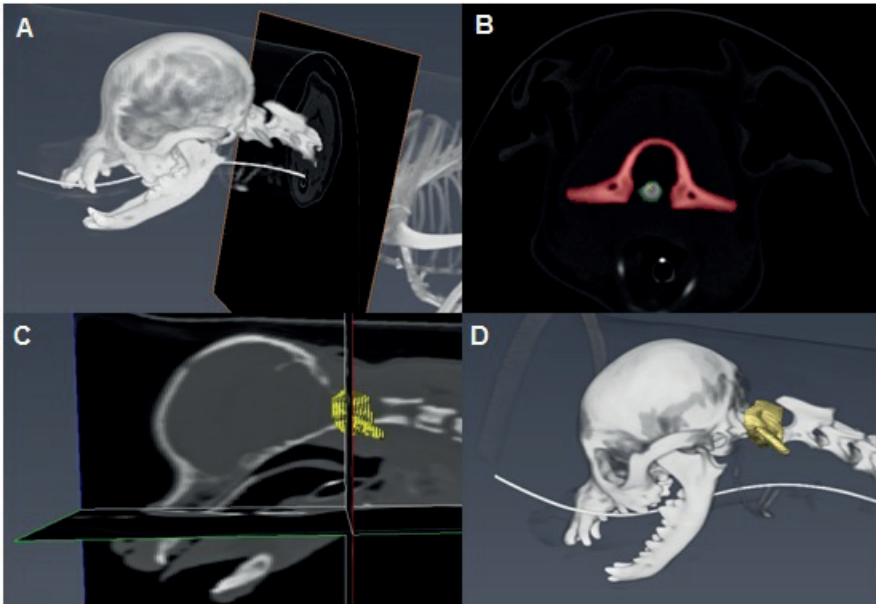


Abbildung 13: Dreidimensionale Knochenrekonstruktion durch Segmentation mit Amira®. A: Darstellung des Datensatzes in Volren- und Orthoslice-Funktion, B: Segmentation durch Markieren der anatomischen Strukturen in jeder CT-Schicht, C: Dreidimensionale Segmentationsansicht, D: Materialbetrachtung in Kombination mit der Volren-Funktion.

8.3.3.2 Bau einer hierarchischen Gelenkkette

Um eine Beweglichkeit der einzelnen Knochen zu ermöglichen und die später folgende Anpassung an die Bewegung der Knochen in den Röntgenvideos zu gewährleisten, wird aus den dreidimensional rekonstruierten Knochen eine Knochenmarionette oder Gelenkkette gebaut. Dieser Arbeitsschritt erfolgt mit Hilfe von Autodesk Maya® (Autodesk Maya 2014®).

Die mittels Amira® rekonstruierten Knochen wurden in eine Szene in Autodesk Maya® importiert. Die Position und der Abstand der Knochen zueinander entsprechen den Werten aus der Computertomographie und wurden nicht verändert. Die Größe der Knochen musste für die Anpassung an die Röntgenvideos skaliert werden.

Die Knochenmodelle wurden über sogenannte „virtual joints“, im Rahmen der Methode auch als „sr-joint“ (Scientific Rotoscoping Gelenk) bezeichnet, miteinander verbunden. Im Rahmen der gelenkigen Verbindungen wurde eine Bewegungshierarchie festgelegt. Die Bewegung des in der Hierarchie übergeordneten Gelenkes beeinflusst die Position der untergeordneten Gelenke. Umgekehrt beeinflusst die Bewegung des in der Hierarchie untergeordneten Gelenkes jedoch nicht die Position der übergeordneten Gelenke. Da die Fortbewegung vom Körperstamm und den Gliedmaßen ausgeht, ist die Hierarchie von kaudal nach kranial orientiert.

Der Drehpunkt der virtuellen Gelenke und der Ort, an dem die Bewegungen erfolgen, wird als „virtuelles Rotationszentrum“ bezeichnet (Wachs 2015). Die Lokalisation der virtuellen Gelenke in der Halswirbelsäule orientiert sich an den Rotationszentren der Halswirbelsäule, die Penning beim Hund bestimmt hat (Penning and Badoux 1987), und an den Erkenntnissen von Patrick Arnold (Arnold 2014). So ist das oberste Gelenk ein Gelenk, das nur aus dem dritten Halswirbel besteht und an seiner kaudalen Endplatte lokalisiert ist. Das folgende Gelenk zwischen C3 und C2 ist an der kranialen Endplatte von C3 lokalisiert. Das virtuelle Rotationszentrum des Gelenkes zwischen C2 und C1 befindet sich mittig im Dens axis, und das virtuelle Gelenk zwischen C1 und Schädel befindet sich mittig zwischen den Condylus occipitales.

Für jedes virtuelle Gelenk wird ein Koordinatensystem, das anatomische Koordinatensystem, kreiert. Dieses Koordinatensystem ist Grundlage für die entstehenden Bewegungsdaten. Die Ausrichtung des Koordinatensystems richtet sich nach der größten zu erwartenden Bewegung, die nach Scientific-Rotoscoping-Konvention die Z-Achse zugeordnet bekommt. Als Nullposition im Raum wurde die spätere zentrale Position zwischen den Röntgenebenen gewählt. Die Nullposition der Knochen zueinander entspricht der aus der Lagerung während der Computertomographie.

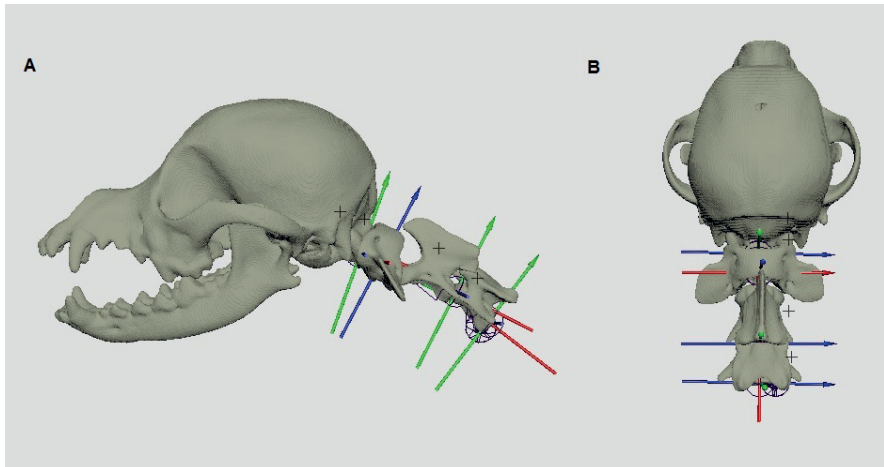


Abbildung 14: Hierarchische Gelenkkette, konstruiert mit Autodesk Maya®, bestehend aus dem Schädel und den ersten drei Halswirbeln, den Gelenkkoordinatensystemen und den virtuellen Gelenken. A: Ansicht von linkslateral, B: Ansicht von dorsal.

8.3.3.3 Röntgenvideobearbeitung

Für die Nutzung der Daten der Röntgenvideographie im virtuellen 3D-Raum müssen die Videos entzerrt, kalibriert und in Einzelbilder zerlegt werden.

Unmittelbar nach der Aufzeichnung werden die Videos mittels Visart 2.x (High-Speed Vision GmbH, Ettlingen, Germany) vertikal gespiegelt und vom Rohdatenformat in .avi-Format umgewandelt.

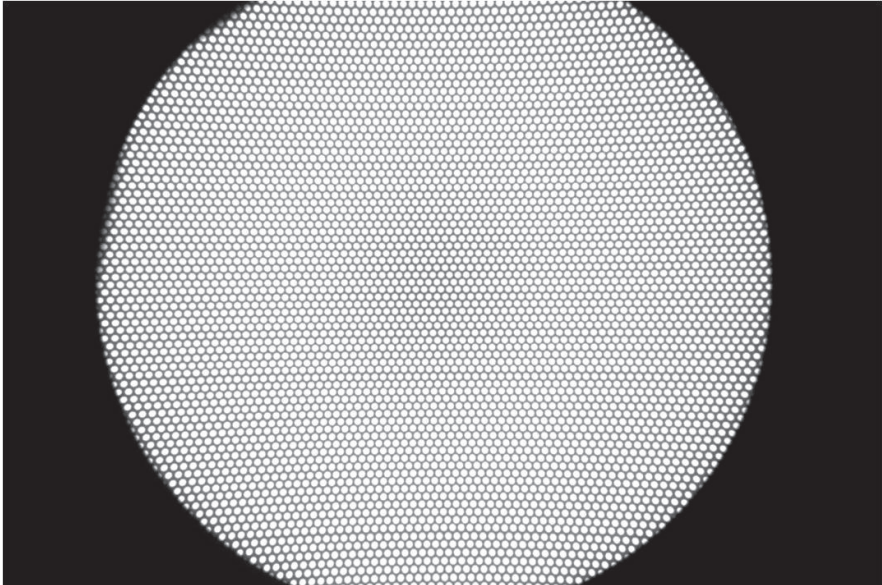


Abbildung 15: Grid– Grundlage für die mathematische Korrektur der kissenförmigen Verzeichnung, die bei der Röntgenvideographie entsteht.

Bei der Aufzeichnung der Röntgenvideos entsteht technisch bedingt eine kissenförmige Verzeichnung (Wang and Blackburn 2000, Bushberg et al. 2002), die korrigiert werden muss. Der Prozess des Herausrechnens dieser Verzerrung wird als Entzerren des Videos bezeichnet. Dieses geschieht computergestützt mit einer kombinierten Rechensoftware (Matlab®, TheMathWorks und Xray-project/batchUndistort, XROMM). Grundlage für die Rechnung ist ein quadratisches Metallgitter (Grid), das jeweils auf einem der Bildverstärker angebracht wurde und mit den Versuchseinstellungen gefilmt wurde. Nach der Entzerrung lagen die jeweiligen Röntgenvideos der Halswirbelsäule dann ohne kissenförmige Verzeichnung im .avi-Format vor.

Um den Versuchsaufbau nachstellen und im virtuellen 3D-Raum positionsgenau arbeiten zu können, muss eine Kalibration erfolgen. Diese wird durch die Aufzeichnung eines standardisierten rechteckigen durchsichtigen Acrylkörpers (20x12x12 cm) ermöglicht. In diesem befinden sich Metallkugeln in 1 cm Abstand voneinander, denen Koordinaten der x-, y-, und z-Achse zugeordnet werden. Nach jeder Untersuchung erfolgte auch eine Aufzeichnung des Kalibrierkörpers.

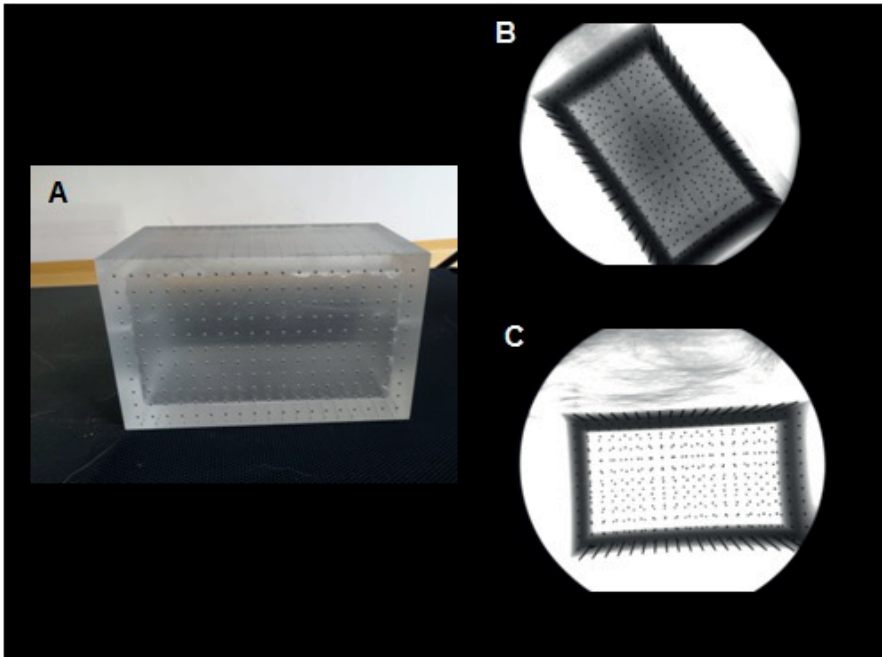


Abbildung 16: Kalibrierkörper zur Kalibration des virtuellen dreidimensionalen Raums. A: Foto des Kalibrierkörpers von schräg oben, B: Ansicht in ventrodorsaler Röntgenebene, C: Ansicht in laterolateraler Röntgenebene.

Im Rahmen der Kalibration wurden den Metallkugeln 11 zuvor definierte Koordinaten zugeordnet. Dieser Vorgang wurde im Standbild des Kalibrierkörpers in beiden Strahlengängen (laterolateral und ventrodorsal) durchgeführt. Dieser Arbeitsschritt erfolgte ebenfalls mit einer kombinierten Rechensoftware (XrayProject, Matlab® und Excel®). Nach der Kalibration liegen die virtuellen Röntgenkameras vor.

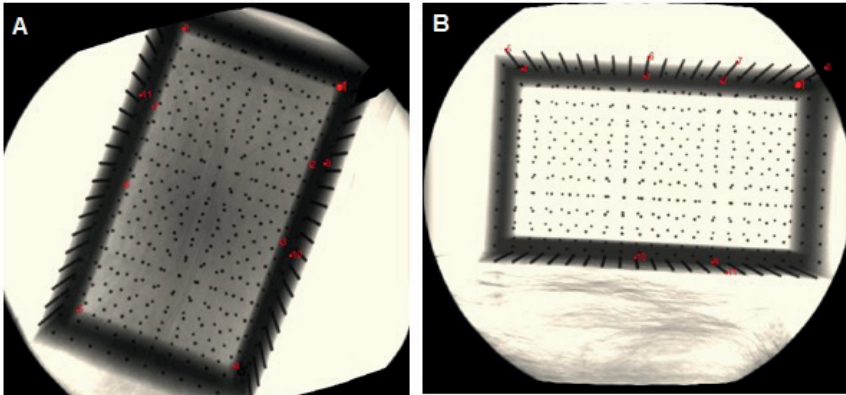


Abbildung 17: Kalibration des 3D- Raums durch Zuordnung von 11 zuvor definierten Koordinaten in beiden Ebenen. A: Entzerrte ventrodorsale Ansicht mit gesetzten Koordinaten, B: Entzerrte laterolaterale Ansicht mit gesetzten Koordinaten.

Im virtuellen 3D-Raum wird mit Einzelbildern gearbeitet. Deshalb wird aus der Videosequenz ein Bildstapel erzeugt. Unter Benutzung des Videobearbeitungsprogramms Adobe After Effects (Adobe Creative Suite 5®, Adobe Systems GmbH, Munich, Germany) wurden die Röntgenvideos in eine Bildabfolge zerlegt. Außerdem erfolgte eine Anpassung auf das Format 1240 x 1240 Pixel und die Bilder wurden in Helligkeit und Kontrast für das weitere Arbeiten optimiert.

8.3.3.4 Virtuelle Szene

Der Versuchsaufbau wird mittels Autodesk Maya (Autodesk Maya 2014®) als Animationsszene nachgestellt. Die Szene setzt sich aus der Röntgenkamera A und der Röntgenkamera B und dem jeweils zugehörigen Röntgenvideo bzw. der entsprechenden Bildsequenz, die auf eine Art Leinwand gegenüber den Kameras projiziert wird, zusammen. Die Gelenkkette wird in den Schnittpunkt zwischen den Bildebenen positioniert.

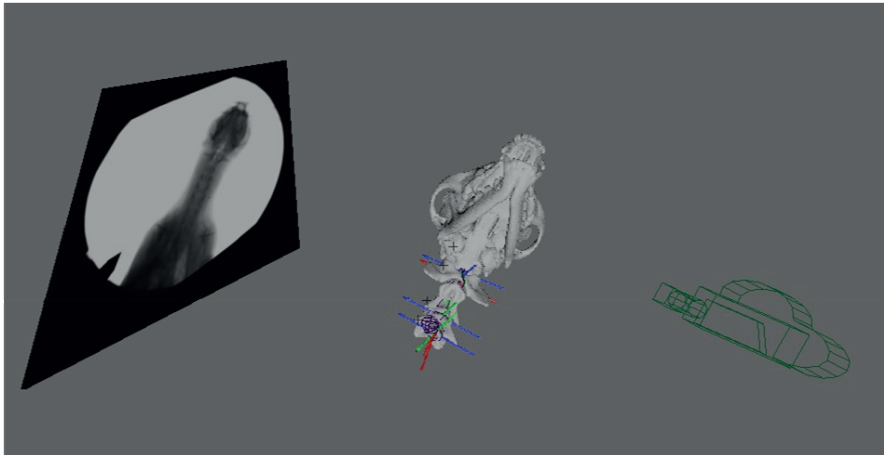


Abbildung 18: Elemente der Animationsszene, von links nach rechts: Leinwand mit Röntgenbild, Gelenkkette und Kamera.

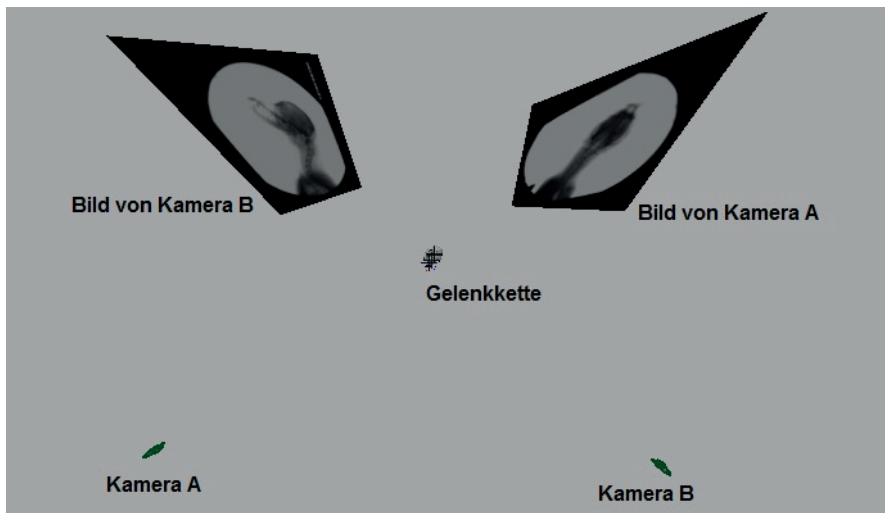


Abbildung 19: Animationsszene mit Darstellung der Position der einzelnen Animationselemente zueinander. Zwei Kameras sind auf Leinwände gerichtet auf die das Röntgenbild der entsprechenden Ebene projiziert wird und im Zentrum befindet sich die Gelenkkette.

Die virtuellen Röntgenkameras resultieren aus der Kalibration, die Bildsequenz wurde aus den Röntgenvideos erzeugt, und die Gelenkkette wurde anhand der CT-Datensätze aus den rekonstruierten Knochen gebaut. Die Animationsszene hat zur Orientierung ein eigenes Koordinatensystem, das globale Koordinatensystem. Dieses unterscheidet sich von den in die Gelenkkette gesetzten anatomischen Koordinatensystemen.

Für jeden Hund und Gangart wurde eine eigene Animationsszene erstellt.

8.3.3.5 Bewegungsanimation

In der Animationsszene wird die Gelenkkette so bewegt, dass die Bewegungen der Gelenkkette die Bewegungen der Knochen im Röntgenvideo, und damit die Bewegungen in vivo, widerspiegeln. Mittels Rotations- und Translationsbewegungen der virtuellen Gelenke werden die Knochen der Gelenkkette manuell auf die Silhouetten der Knochen im Röntgenbild angepasst.

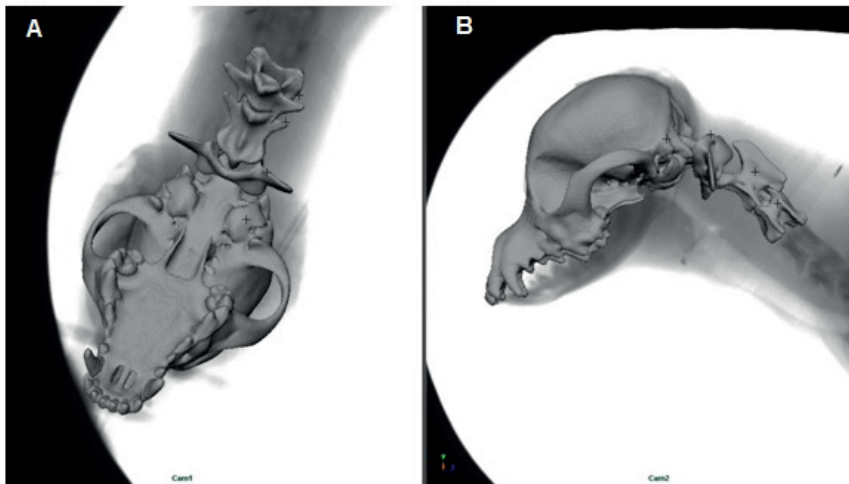


Abbildung 20: Ansicht der Animationsszene aus dem Blickwinkel der Kameras. A: Ventrale Ansicht mit Kamera 1, B: Laterale Ansicht mit Kamera 2.

Die Reihenfolge der Anpassung orientiert sich an der Hierarchie der Gelenkkette. In der vorliegenden Arbeit wurde demnach zunächst C3 angepasst, dann C2 und C1 und zum Schluss der Schädel.

Die Anpassung erfolgte in einem Bildabstand von ca. 10-25 Bildern. Die Position der Gelenkkette in den Bildern dazwischen wurde vom Programm interpoliert. Der Bildabstand wurde je nach Genauigkeit dieser Interpolation gewählt und ggf. adaptiert.

Die Animationen sind der Arbeit als Videodatei beigefügt.

8.3.3.6 Datenexport

Die Bewegungsdaten der virtuellen Gelenke wurden anhand der in der Gelenkkette positionierten anatomischen Koordinatensysteme erhoben. Die Daten des obersten virtuellen Gelenkes entsprechen der Bewegung der Gelenkkette im 3D-Raum. Diese Bewegungsdaten wurden für die weitere Analyse in eine Excel-Datei (Microsoft Excel®) exportiert.

8.4 Datenanalyse

Bei jedem der vier Chihuahuas wurden sechs Schritte im Schritt und sechs Schritte im Trab animiert und die Bewegungsdaten der anatomischen Koordinatensysteme der Gelenke C3/C3, C3/C2, C2/C1 und C1/Schädel exportiert. Da die einzelnen Individuen eine unterschiedliche Dauer bei den Stemm- und Schwungphasen zeigten, wurden die exportierten Bewegungsdaten zur besseren Vergleichbarkeit einer Schrittnormierung („phase normalization“) unterzogen (Deban et al. 2012). Aus den schrittnormierten Bewegungsdaten wurden in Excel® der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung der einzelnen Bewegungen ermittelt. Außerdem wurde die während der Ganganalyse auftretende Range of Motion (ROM) jedes Gelenkes bestimmt. Von jedem Hund wurden die Bewegungen der virtuellen Gelenke C3/C3, C3/C2, C2/C1 und C1/Schädel deskriptiv erläutert, miteinander

verglichen und soweit möglich mit dem Schrittzklus oder anderen Bewegungen, die im synchron aufgezeichneten Hochgeschwindigkeitsvideo erkennbar sind, korreliert.

8.4.1 Schrittanalyse – Berechnung vom Duty-Faktor

Für jeden Hund wurde für seinen Lauf im Schritt und im Trab der jeweilige Duty-Faktor berechnet. Die linke Hintergliedmaße wurde als Referenzgliedmaße definiert. Der Duty-Faktor im Schritt beträgt $64,15 \pm 1,8$ %, der Duty-Faktor im Trab $52,95 \pm 2,4$ %.

Der prozentuale Anteil der Bodenkontaktzeit an der Gesamtschrittdauer ergibt den Duty-Faktor (Hildebrand 1966, Fischer and Lilje 2011). Für die Berechnung wurden Auf- und Abfußungszeitpunkte der linken Hintergliedmaße bestimmt.

Tabelle 2: Duty-Faktor der Probandenin Bezug auf die linke Hintergliedmaße im Schritt und im Trab mit Mittelwert und Standardabweichung.

Hund	Duty- Faktor Schritt (%)	Duty-Faktor Trab (%)
1	$66,78 \pm 0,8$	$56,42 \pm 0,8$
2	$63,86 \pm 2,1$	$50,94 \pm 1,7$
3	$62,67 \pm 2,4$	$51,66 \pm 2,3$
4	$63,32 \pm 1,1$	$52,77 \pm 1,2$
Gesamt	$64,15 \pm 1,8$	$52,95 \pm 2,4$

8.4.2 Schrittanalyse – Betrachtung der Fußfallmuster

Im Schritt ist ein Wechsel zwischen Dreibeinstütz und Zweibeinstütz zu beobachten. Abwechselnd folgt auf den Dreibeinstütz ein sagittaler oder diagonaler Zweibeinstütz. Die Zeitspanne zwischen Dreibeinstütz und Zweibeinstütz ist jeweils länger als die zwischen Zweibeinstütz und Dreibeinstütz. Die Abstände der Auffußungszeitpunkte sind annähernd gleichmäßig verteilt.

Im Trab ist das parallele Vorschwingen der diagonalen Gliedmaßenpaare zu erkennen, das Auf- und Abfüßen findet jedoch nicht absolut gleichzeitig statt, so dass es auch im Trab zu kurzzeitigen Phasen eines Dreibeinstützes kommt. Die Abstände der Auffußungszeitpunkte sind annähernd gleichmäßig verteilt. Bei allen untersuchten Hunden wird die Aktion der Vordergliedmaße geringfügig vor der Aktion der Hintergliedmaße vollzogen. Der Zeitspanne zwischen der Aktion von Vorder- und Hintergliedmaße ist bei Hund 1 am größten, das Fußfallmuster ähnelt einem schnellen Schritt. Im Gegensatz zum Schritt ist bei allen vier untersuchten Hunden im Trab ein Auf- und Abwippen des Rumpfes während des Schrittzklus erkennbar.

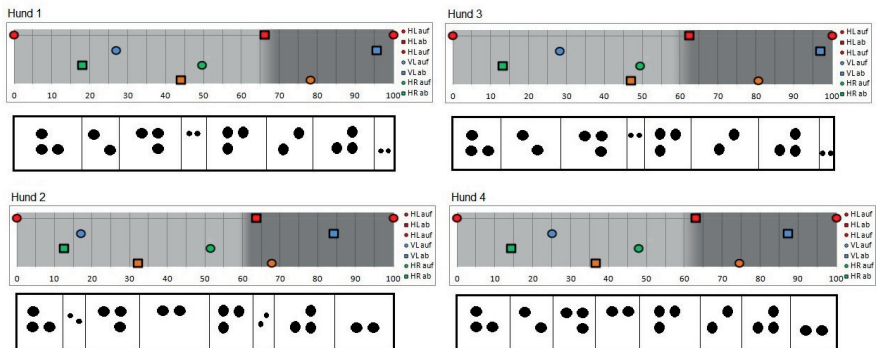


Abbildung 21: Schrittzklus und Fußfallmuster der Probanden im Schritt bei normiertem Schrittzklus auf 100 %.

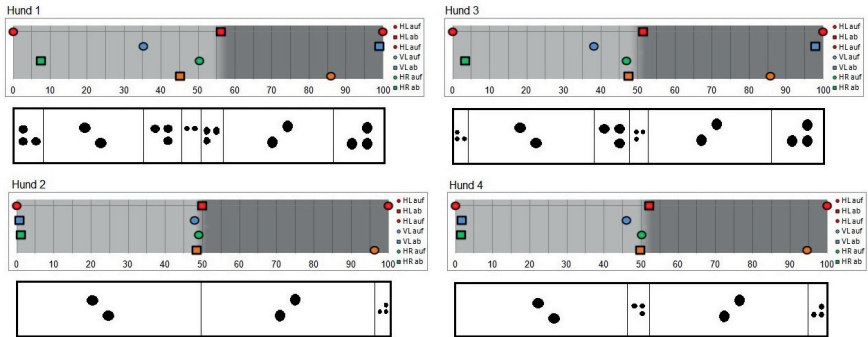


Abbildung 22: Schrittzklus und Fußfallmuster der Probanden im Trab bei normiertem Schrittzklus auf 100 %.

8.4.3 Schrittnormierung

Zur besseren Vergleichbarkeit der Schritte untereinander wird eine Schrittnormierung durchgeführt, wobei die Gesamtschrittdauer 100 % entspricht. Je nach individuell ermitteltem Duty-Faktor wurden die Daten auf 70/30 (70 % Stemmphase/ 30% Schwungphase) 60/40 (60 % Stemmphase/40 % Schwungphase) oder 50/50 (50 % Stemmphase/50 % Schwungphase) genormt. Für diesen Prozess wurde Matlab[®] genutzt.

Tabelle 3: Schrittnormierung jedes Hundes anhand des jeweils gemittelten Duty-Faktors in Bezug auf die linke Hintergliedmaße

Hund	Duty-Faktor Schritt	Normierung Schritt	Duty-Faktor Trab	Normierung Trab
1	66,78±0,8	70/30	56,42±0,8	60/40
2	63,86±2,1	60/40	50,94±1,7	50/50
3	62,67±2,4	60/40	51,66±2,3	50/50
4	63,32±1,1	60/40	52,77±1,2	50/50

8.5 Eigener Messfehler

Die Bestimmung des eigenen Messfehlers bzw. der Messgenauigkeit wurde wie in der Arbeit von Kopp (Kopp 2019) durchgeführt. Von zwei Hunden wurde jeweils ein Schrittzzyklus mehrfach animiert. Dabei wurden die Auf- und Abfußungszeiten virtuell angepasst und die Bewegungsdaten exportiert. Von einem Probanden (Hund 4) wurde der gleiche Schritt drei Mal hintereinander am selben Tag virtuell angepasst, bei einem anderen Probanden (Hund 2) wurde zu definierten Zeitpunkten animiert. Im Zuge der anschließenden Berechnung des Messfehlers wurde der zweite Halswirbel nicht mit berücksichtigt, da dieser keine messbare Bewegung gezeigt hat.

Von Hund 4 wurden von den drei Schrittzzyklen der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet, zusätzlich auch die Differenz zwischen der größten und der kleinsten gemessenen Bewegung sowie deren Mittelwert und Standardabweichung. Bei Hund 2 wurden zur weiteren Evaluation die Messungen auch untereinander verglichen. Die Messgenauigkeit bei Hund 4 ergab bei dreimaliger Auswertung für die Translation einen Wert von $0,02 \pm 0,01$ cm und für die Rotation einen Wert von $1,73 \pm 0,16^\circ$. Die Messgenauigkeit bei Hund 2 ergab bei dreimaliger Auswertung für die Translation einen Wert von $0,02 \pm 0,01$ cm und für die Rotation einen Wert von $1,00 \pm 0,38^\circ$. Der Vergleich der Läufe untereinander ergab in Vergleich 1, bei dem am gleichen Tag animiert wurde, für die Translation einen Wert von $0,01 \pm 0,01$ cm und für die Rotation einen Wert von $0,73 \pm 0,33^\circ$. In Vergleich 2, bei dem die Animationen von zwei Folgetagen verglichen wurden, ergab sich für die Translation ein Wert von $0,01 \pm 0,00$ cm und für die Rotation ein Wert von $0,60 \pm 0,10^\circ$.

Tabelle 4: Messgenauigkeit des Scientific Rotoscoping der Halswirbelsäule beim Chihuahua für Translations- und Rotationsbewegungen bei Einstellung der Röntgenebenen im 90°-Winkel (laterolateral und ventrodorsal).

Hund	Translation	Rotation
Hund 4	0,02±0,01 cm	1,73±0,16°
Hund 2	0,02±0,01 cm	1,00±0,38°
Hund 2	0,01±0,01 cm	0,73±0,33°
Hund 2	0,01±0,00 cm	0,60±0,1°
Gesamt	0,02±0,00 cm	1,37±0,52°

Bei Translationsbewegungen ergab sich eine Messgenauigkeit von $0,02\pm 0,00$ cm und bei Rotationsbewegungen eine Messgenauigkeit von $1,37\pm 0,5^\circ$. Diese Messgenauigkeit bezieht sich auf die Untersuchung des kraniozervikalen Überganges im laterolateralen und ventrodorsalen Strahlengang durch den Autor dieser Studie. Die berechnete Messgenauigkeit stimmt mit den Werten der vorangegangenen Studien der Lendenwirbelsäule beim Beagle und beim Deutschen Schäferhund überein (Wachs 2015, Kopp 2019). Jedoch ist die Standardabweichung der Rotationsbewegungen vom Chihuahua, animiert in 90°-Einstellung, im Vergleich zu der vom Deutschen Schäferhund, animiert in 63°-Einstellung, größer (Kopp 2019). Die Werte von Hund 4 sind geringfügig schlechter, die von Hund 2 geringfügig besser.

8.5.1 Korrelation der Bewegungsdaten

Die Bewegungsdaten wurden unter Anwendung einer Spearman Korrelation einer bivariaten Statistik unterzogen, wobei die gezeigten Bewegungsrichtungen in Schritt und Trab innerhalb eines Patienten und zwischen den Patienten verglichen wurden, und ebenso die Rotationsbewegungen der gleichen Achse zwischen den Gelenken und ausgewählte Rotationsbewegungen unterschiedlicher Achsen in einem Gelenk und zwischen Gelenken. Für die Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten, der

aus der Spearman Korrelation ermittelt wird, wurde das Statistikprogramm SPSS® (SPSS® Statistic für Windows, Version 24.0, IBM Corporation) verwendet.

Aufgrund der geringen Patientenzahl und der großen Varianz zwischen den Schritten, einerseits bedingt durch die Variabilität des Gangbildes an sich und andererseits durch unterschiedliche Kopfbewegungen, wurde eine weiterführende Statistik als nicht sinnvoll erachtet.

8.5.2 Simi Motion®

Zur Datenanalyse und Interpretation der Translationsdaten der Gelenkkette im Raum wurde ein weiteres dreidimensionales Messverfahren angewendet. Mittels Simi Motion® (Simi Reality Motion Systems GmbH), ein Motion Capture System, das in zwei- und dreidimensionalen Varianten angewendet werden kann, wurden Messungen an der gesamten Halswirbelsäule vorgenommen.

Der 3D-Raum wurde basierend auf den Standbildern des Kalibrierkörpers, die bereits bei der Röntgenvideographie aufgezeichnet wurden, kalibriert. Außerdem wurden anatomische Messpunkte definiert, die im Zuge der Messmethode zum Tracking verwendet werden sollten. Das Kriterium für die Auswahl der geeigneten Trackingpunkte in der Halswirbelsäule war eine möglichst genaue Identifikation dieser in beiden Strahlengängen der vorliegenden Röntgenvideos.

Diese Trackingpunkte waren der Mittelpunkt zwischen den Bullae tympanicae, der Mittelpunkt zwischen den Atlasflügeln, die Densbasis des Axis und jeweils die kraniale Endplatte von C3 bis Th1.

Das Tracking wurde nur bei Hund 1 durchgeführt, und zwar im Schritt für 6 Schritte, jeweils zum Auf- und Abfußungszeitpunkt der vier Gliedmaßen. Die jeweiligen Punkte wurden in den entsprechenden Frames und in beiden Strahlengängen aufgesucht und markiert.

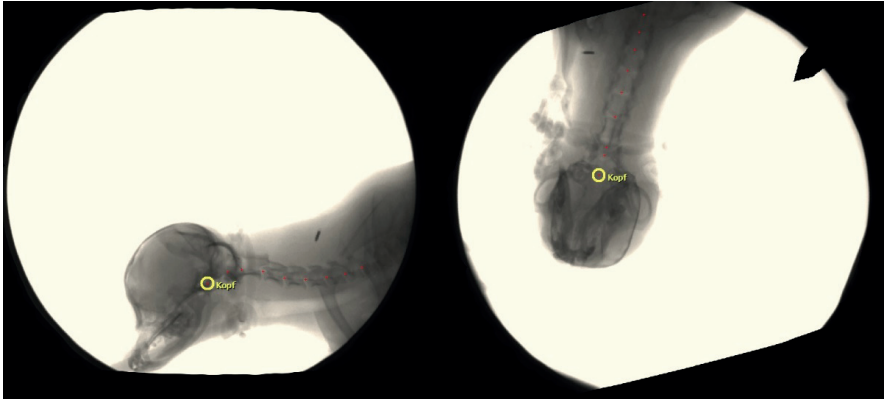


Abbildung 23: *Tracking mit Simi Motion®, in beiden Röntgenebenen werden anatomische Messpunkte aufgesucht und markiert.*

Die Daten wurden in Excel® exportiert und in die Analyse der Translationsdaten mit einbezogen.

8.5.3 Dreidimensionaler Druck einer Gelenkkette

Im Rahmen der Auswertung und zur weiteren Visualisierung wurden die bereits durch Segmentierung geschaffenen Knochenmodelle der Gelenkkette von Hund 1 mit Unterstützung des Instituts für Zoologie und Evolutionsforschung der Friedrich-Schiller-Universität Jena und des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte in Jena für einen 3D-Druck weiter modelliert. Aus den bearbeiteten Knochenmodellen wurden Schädel, Atlas, Axis und der dritte Halswirbel in Originalgröße und in dreifacher Vergrößerung dreidimensional gedruckt. Im Rahmen des 3D-Drucks werden Kunststoffschichten entsprechend der Vorlage Schicht für Schicht aufgetragen, wobei die einzelnen Schichten vor Auftragung der nächsten abkühlen und aushärten müssen.



Abbildung 24: 3D-Druck des Schädels, Atlas, Axis und dritten Halswirbels von Hund 1.

9 Ergebnisse

9.1 Ganganalyse im Hochgeschwindigkeitsvideo

Die Rotations- und Translationsbewegungen der gesetzten virtuellen Gelenke der vorderen Halswirbelsäule jedes Individuums werden deskriptiv erläutert. Zwischen den Individuen werden die Rotations- und Translationsbewegungen verglichen. Zusätzlich werden die Bewegungskurven der Einzelschritte, die Auf- und Abfußungszeitpunkte von Vorder- und Hintergliedmaße sowie weitere Beobachtungen in den Hochgeschwindigkeitsvideos, soweit möglich, in Zusammenhang gebracht. Die Deskription erfolgt für die Gangarten Schritt und Trab.

Die durchschnittliche Range of Motion (ROM), die während der Ganganalyse erfasst wurde, wird für jede Bewegungsrichtung für alle Probanden erfasst. Zusätzlich wird für jedes Individuum der maximal größte aktive Bewegungsumfang (ROM_{max}), der gemessen wurde, angegeben. Kann ein Zusammenhang zum Schrittzklus mit annähernd gleichzeitig auftretenden Maximum- und/oder Minimumwerten hergestellt werden, wird der durchschnittliche Zeitpunkt des Auftretens dieser Werte prozentual zum Schrittzklus ermittelt (Time of Occurrence – TOO).

9.1.1 Schritt

Geschwindigkeit

Die Komfort-Laufbandgeschwindigkeit der Hunde im Schritt beträgt $0,41 \pm 0,08$ m/s. Die jeweiligen Geschwindigkeiten variieren je nach Individuum zwischen 0,32 und 0,52 m/s.

Duty-Faktor

Der Duty-Faktor im Schritt beträgt im Schnitt $64,15 \pm 1,8$ %, wobei sich Hund 1 von Hund 2-4 unterscheidet. Hund 1 hat einen Duty-Faktor von >65 % im Gegensatz zu den anderen Probanden mit einem Duty-Faktor <65 %.

Fußfallmuster

Das Fußfallmuster im Schritt zeigt bei allen Probanden vorwiegend einen Dreibeinstütz, der sich mit einem parallelen und diagonalen Zweibeinstütz abwechselt. Dieses Fußfallmuster wird von allen vier Hunden im Schritt benutzt, und die Abstände der Auffußungszeitpunkte sind annähernd gleichmäßig verteilt.

Haltung und Verhalten

Hund 1 zeigt während der gesamten Untersuchung auf dem Laufband einen abgesenkten Kopf und nur gelegentlich eine aktive Kopfbewegung. Hund 2 zeigt ein lockeres Gangbild mit geringgradiger Variation der Kopfhaltung hauptsächlich nach oben und unten. Er zeigt stetige kleine Kopfbewegungen, vorwiegend nach rechts und links. Hund 3 zeigt ein lockeres Gangbild mit zum Teil kleineren und mittelgroßen Kopfbewegungen nach rechts, links, oben und unten. Hund 4 zeigt ein lockeres Gangbild mit kleineren und vereinzelt mittelgroßen Kopfbewegungen nach rechts und links.

Tabelle 5: Auf- und Abfußungszeitpunkte im Schritttangegeben für alle Gliedmaßen prozentual zum Schrittzklus. Die linke Hintergliedmaße ist die Referenzgliedmaße.

	Hinten Links		Vorne Links		Hinten Rechts		Vorne Rechts	
	Auf %	Ab %	Auf %	Ab %	Auf %	Ab %	Auf %	Ab %
Hund 1	0/100	66,17±1	26,83±1,2	95,67±3,6	49,5±1,1	18±2	78,17±1,6	44±1,3
Hund 2	0/100	63,67±2,3	17±2,4	84,17±1,5	51,33±1,9	12,4±1,1	67,67±2,3	32,2±2,3
Hund 3	0/100	62,33±2,3	28,17±1,9	97±2,5	49,33±2,5	13,17±0,9	80,5±1,9	47±1,3
Hund 4	0/100	62,83±1	25±1,8	87,33±2	47,83±0,8	14,17±1,2	74,5±0,8	36,5±2,2

9.1.2 Trab

Geschwindigkeit

Die Komfort-Laufbandgeschwindigkeit der Hunde im Trab beträgt $0,77 \pm 0,12$ m/s. Die Geschwindigkeiten variieren zwischen den Individuen von 0,72 bis 0,95 m/s.

Duty-Faktor

Der Duty-Faktor im Trab beträgt im Schnitt $52,95 \pm 2,4$ %. Hund 1 unterscheidet sich wie auch im Schritt von Hund 2-4. Bei Hund 1 beträgt der Duty-Faktor >55 %, bei den anderen Probanden dagegen <55 %.

Fußfallmuster

Die Parallelität der diagonalen Gliedmaßenpaare ist unterschiedlich ausgeprägt. Alle Hunde zeigen ein früheres Auffußen und Abfüßen der Vordergliedmaße im Vergleich zur Hintergliedmaße. Der Aktionsabstand zwischen Vorder- und Hintergliedmaße ist bei Hund 1 am größten ausgeprägt, bei Hund 2 und 4 am geringsten. Bei Hund 4 sind Auf- und Abfußungszeitpunkt nahezu gleichzeitig. Alle Probanden zeigen ein Auf- und Abwippen des Rumpfes.

Haltung und Verhalten

Alle Hunde haben im Vergleich zum Schritt eine längere Eingewöhnungsphase auf dem Laufband gebraucht, um einen gleichmäßigen Trab zu zeigen. Sie fielen zunächst in einen schnellen Schritt und zögerten, in den Trab zu gehen. In Wiederholungen zeigten die Hunde einen schnelleren Übergang in den Trab.

Hund 1 zeigt wie im Schritt eine abgesenkte Kopfhaltung und kleine Bewegungen nach rechts und links. Bei Hund 2 dagegen ist ein lockeres Gangbild zu beobachten, er läuft zum größten Teil mit dem Kopf nach rechts und führt schließlich eine aktive Kopfbewegung nach neutral und wieder nach rechts aus. Hund 3 zeigt ein lockeres Gangbild mit zum Teil kleineren und mittelgroßen Kopfbewegungen nach rechts und links, allerdings hat er Schwierigkeiten, seine Position auf dem Laufband zu halten. Hund 4 zeigt ein lockeres Gangbild mit geringen Kopfbewegungen nach rechts und links.

Tabelle 6: Auf- und Abfußungszeitpunkte im Trabangegeben für alle Gliedmaßen prozentual zum Schrittzyklus. Die linke Hintergliedmaße ist die Referenzgliedmaße.

	Hinten Links		Vorne Links		Hinten Rechts		Vorne Rechts	
	Auf	Ab %	Auf %	Ab %	Auf %	Ab %	Auf %	Ab %
Hund 1	0/100	56,17±0,4	35,33±3,3	99±2,3	50,5±1,4	7,5±1,1	86±3,4	45,17±2,8
Hund 2	0/100	50±1,3	47,83±1	0,83±1,7	49±1,4	1,17±1,9	96,33±2,4	48,5±2,3
Hund 3	0/100	51,33±2,2	38,17±2,1	97,83±1,8	47±0,9	3,5±2,9	85,83±0,8	47,5±1,2
Hund 4	0/100	52,17±1,2	46±1,8	1,8±1,8	50,17±1,5	1,6±1,5	94,67±1,5	49,83±0,4

9.2 Datenanalyse der virtuellen Gelenke im Schritt

9.2.1 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C3

Die Bewegungsdaten des in der Hierarchie obersten virtuellen Gelenkes C3/C3 spiegeln die Bewegungsdaten der Gelenkkette im Raum wieder. Dadurch liegen Translations- und Rotationsdaten dieses Gelenkes vor.

9.2.1.1 Horizontale Translation

Die horizontale Translation ist die Translation in kraniokaudaler Richtung. Eine Translation nach kranial bedeutet einen Kurvenanstieg und eine Translation nach kaudal einen Kurvenabfall.

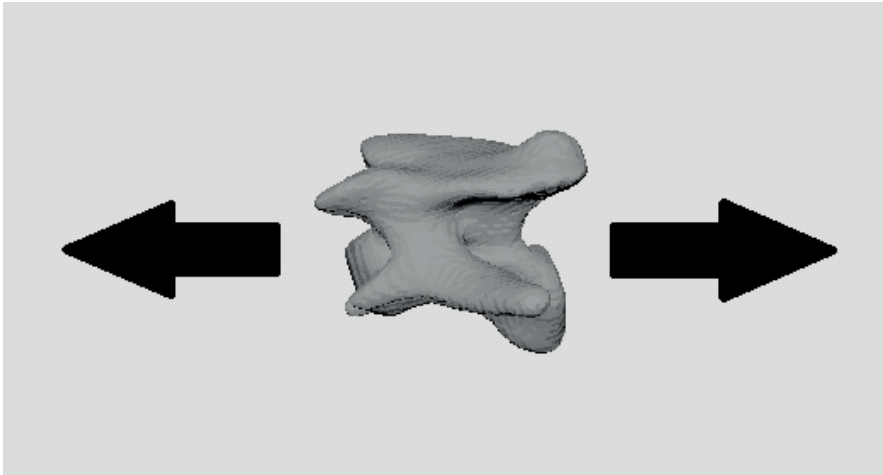


Abbildung 25: Horizontale Translation des Gelenks C3/C3 - Bewegungsrichtung des dritten Halswirbels bzw. der Gelenkkette nach kranial oder kaudal.

Insgesamt zeigt sich ein mehr oder weniger ausgeprägter biphasischer Kurvenverlauf mit zwei Maxima und zwei Minima während des Schrittzklus. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,4 \pm 0,4$ cm. Nachstehend wird die horizontale Translation jedes einzelnen Probanden besprochen.

Hund 1

Hund 1 zeigt im Schritt einen biphasischen Kurvenverlauf mit einem Maximum kurz nach dem Abfußen mit der rechten Hintergliedmaße, bei $23,83 \pm 4,1$ % des Schrittzklus, und einem zweiten Maximum kurz vor oder während des Abfußens mit der linken Hintergliedmaße, bei $67,16 \pm 2,0$ % des Schrittzklus. Das jeweilige Minimum zeigt sich zu Beginn der zweiten Hälfte der Stemmphase der jeweiligen Hintergliedmaße, nach dem AufFußen mit der ipsilateralen Vordergliedmaße. Das erste Minimum zeigt sich bei $38,16 \pm 3,2$ % des Schrittzklus und das zweite Minimum bei $93,2 \pm 2,6$ %.

Die absoluten Werte befinden sich bei diesem Hund im Minusbereich, da er im Vergleich zum Nullpunkt der Messung auf einer weiter hinten gelegenen Laufbandposition läuft. Die ROM beträgt $0,56 \pm 0,4$ cm. Die ROM_{max} 2,02 cm.

Hund 2

Hund 2 zeigt im Schritt einen biphasischen Kurvenverlauf mit Maxima und Minima in ähnlichem Zusammenhang mit dem Fußfallmuster wie er bei Hund 1 beobachtet werden konnte. Die Maxima werden bei $10,83 \pm 1,8$ % und $56,0 \pm 2,3$ % des Schrittzklus erreicht, kurz vor oder während des Abfußens mit den Hintergliedmaßen. Die Minima werden bei $39,33 \pm 3,1$ % und $87,83 \pm 7,7$ % erreicht, zu Beginn der zweiten Hälfte der Stemmphase der jeweiligen Hintergliedmaße. In Schritt 1, 2 und 5 treten zusätzliche Hoch- und Tiefpunkte in den Kurven auf.

Die Amplitude ist im Vergleich zu Hund 1 geringer. Der Kurvenverlauf des 5. Schrittes unterscheidet sich durch einen weiteren Vorschub in der Mitte der Stemmphase der linken Hintergliedmaße, und in der zugehörigen folgenden Schwungphase zeigt sich eine vermehrte Positionsveränderung der Gelenkkette nach kaudal. Die ROM beträgt $0,35 \pm 0,3$ cm. Die ROM_{max} 1,27 cm.

Hund 3

Hund 3 zeigt im Schritt einen angedeuteten biphasischen Kurvenverlauf. Einheitlich ist ein Maximum kurz vor oder während des Abfußens mit den Hintergliedmaßen, bei $11,33 \pm 4,6$ % und $48,83 \pm 1,9$ % des Schrittzklus, zu erkennen. Die Minima zeigen sich bei $27,83 \pm 4,21$ % und $83,83 \pm 6,9$ % des Schrittzklus in der Mitte der Stemmphase der jeweiligen Hintergliedmaße. Die Amplitude assoziiert mit Aktionen der linken Gliedmaßen ist im Vergleich zu Aktionen mit den rechten Gliedmaßen tendenziell größer.

Die absoluten Werte schwanken geringgradig zwischen positiven und negativen Werten. Am größten sind die Schwankungen zwischen dem ersten und zweiten sowie fünften und sechsten Schritt. Der Hund zeigt während der Untersuchung geringgradige Veränderungen seiner Laufposition auf dem Laufband. Die ROM beträgt $0,5 \pm 0,5$ cm. Die ROM_{max} 1,81 cm.

Hund 4

Bei Hund 4 ist ein eindeutig biphasisches Kurvenmuster nur in einzelnen Schritten nachvollziehbar. Die Amplitude der Kurven ist im Vergleich zu den anderen Hunden insgesamt geringer. Auch das zeitliche Auftreten des zweiten Maximums und beider Minima variiert im Vergleich stärker. Das erste Maximum tritt bei $10,0\pm 3,5\%$ des Schrittzklus auf, das zweite Maximum bei $62,16\pm 8,0\%$. Die Minima zeigen sich bei $37,16\pm 8,8\%$ und $80,33\pm 11,7\%$ des Schrittzklus. Wie Hund 3 zeigt auch Hund 4 Veränderungen seiner Laufposition auf dem Laufband, vor allem zwischen dem ersten und zweiten sowie fünften und sechsten Schritt. In Schritt 2, 4 und 6 treten zusätzliche Hoch- und Tiefpunkte in den Kurven auf. Die ROM beträgt $0,22\pm 0,3$ cm. Die ROM_{\max} $1,02$ cm.

Tabelle 7: Range of Motion der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Horizontale Translation C3/C3 - Schritt		
	M \pm SD (cm)	Maximum (cm)
Hund 1	0,56 \pm 0,4	2,03
Hund 2	0,35 \pm 0,3	1,27
Hund 3	0,5 \pm 0,4	1,81
Hund 4	0,22 \pm 0,3	1,02
Gesamt	0,4 \pm 0,4	/

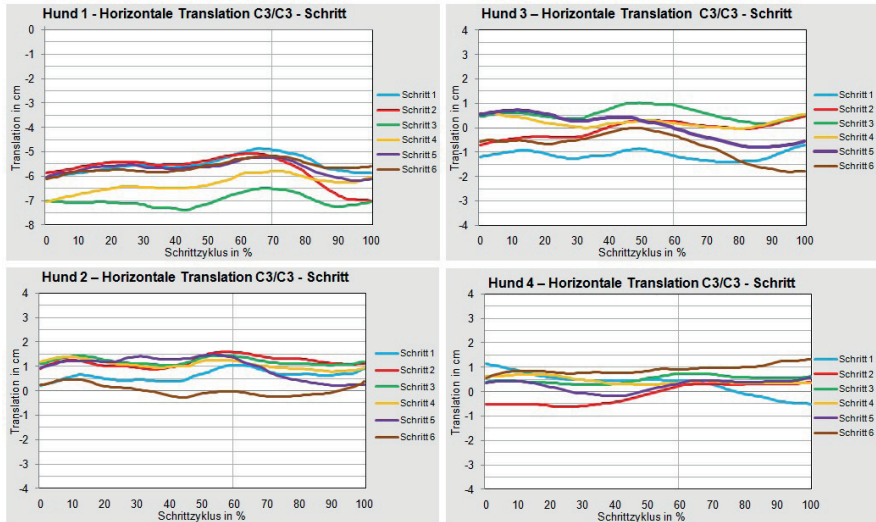


Abbildung 26: Diagramme der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Zu einem Kurvenanstieg kommt es im Fall einer Positionsveränderung der Gelenkkette nach kranial. Ein Kurvenabfall zeigt sich bei einer Positionsveränderung der Gelenkkette nach kaudal. Die positive Positionsveränderung zeigt sich beim, kurz vor oder kurz nach dem Abfüßen mit den Hintergliedmaßen. Eine negative Positionsveränderung ist in der Mitte der Stemmphase der Hintergliedmaßen oder zu Beginn der zweiten Hälfte zu beobachten, bei zwei Hunden (Hund 1 und 2) beginnt zu diesem Zeitpunkt die Stemmphase der Vordergliedmaßen.

9.2.1.2 Vertikale Translation

Die vertikale Translation ist die Translation in die ventrodorsale Richtung. Eine Translation nach dorsal bedeutet einen Kurvenanstieg und eine Translation nach ventral einen Kurvenabfall.

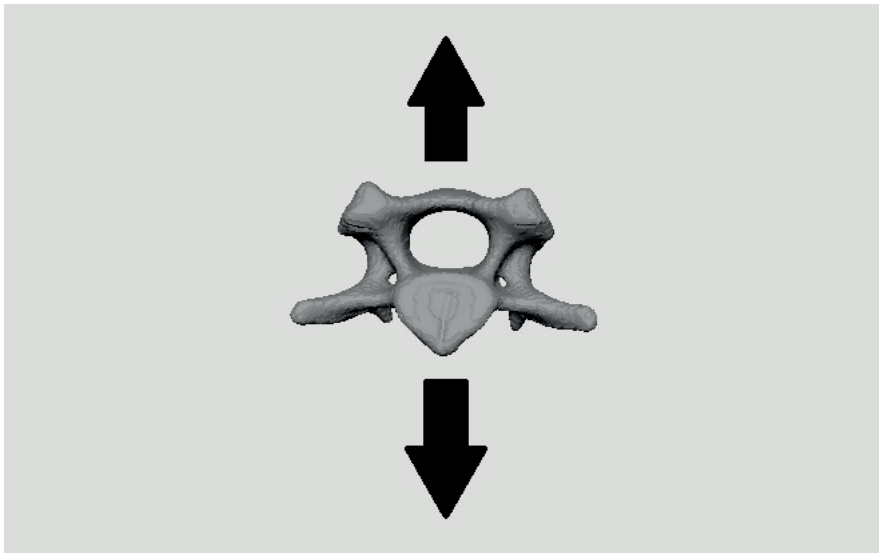


Abbildung 27: Vertikale Translation des Gelenks C3/C3 - Bewegungsrichtung des dritten Halswirbels bzw. der Gelenkkette nach dorsal oder ventral.

Insgesamt zeigt sich ein mehr oder weniger ausgeprägter biphasischer Kurvenverlauf bei Hund 1, 2 und 3 mit zwei Maxima und zwei Minima während des Schrittzklus. In einzelnen Schritten sind zusätzliche Maxima und/oder Minima vorhanden, die sich in anderen Schritten jedoch nicht wiederholen. Bei Hund 4 ist der biphasische Kurvenverlauf und dessen zeitliches Auftreten während der Schrittzklen nicht erkennbar. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,51 \pm 0,4$ cm.

Im Einzelnen stellt sich die vertikale Translation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Es zeigt sich ein biphasischer Kurvenverlauf mit positivem Kurvenverlauf während des letzten Drittels der Vorschwingphase der jeweiligen Vordergliedmaße. Die Maxima zeigen sich bei $20 \pm 3,9 \%$ und $74,17 \pm 2,9 \%$ des Schrittzklus. Der Kurvenanstieg hat bei der Vorschwingphase der rechten Vordergliedmaße eine größere Amplitude im Vergleich zur Vorschwingphase der linken Vordergliedmaße. Zu Beginn der Stemmphase beider Vordergliedmaßen zeigt sich jeweils ein negativer Kurvenverlauf, auch dieser mit größerer Amplitude nach dem Aufußen mit der rechten Vordergliedmaße im Vergleich zur linken. Die Minima zeigen sich bei $38,17 \pm 3,5 \%$ und $94,33 \pm 3,1 \%$ des Schrittzklus. Die ROM beträgt $0,46 \pm 0,4$ cm, die ROM_{\max} $1,45$ cm.

Hund 2

Es zeigt sich ein biphasischer Kurvenverlauf mit positivem Kurvenverlauf während der zweiten Hälfte bzw. im letzten Drittel der Vorschwingphase beider Vordergliedmaßen. Dieser hat bei der Vorschwingphase der linken Vordergliedmaße eine größere Amplitude im Vergleich zur Vorschwingphase der rechten Vordergliedmaße. Die Maxima zeigen sich bei $9,8 \pm 2,6 \%$ und $50,17 \pm 2,2 \%$ des Schrittzklus. Zu Beginn der Stemmphase beider Vordergliedmaßen zeigt sich jeweils ein negativer Kurvenverlauf, mit größerer Amplitude nach dem Aufußen mit der linken Vordergliedmaße. Die Minima zeigen sich bei $26,67 \pm 1,9 \%$ und $79,17 \pm 3,3 \%$ des Schrittzklus. Die ROM beträgt $0,56 \pm 0,3$ cm, die ROM_{\max} $1,3$ cm.

Hund 3

Hund 3 zeigt in 4 von 6 Schrittzklen einen biphasischen Kurvenverlauf. Das zeitliche Auftreten vom ersten Maximum und zweiten Minimum variiert im Vergleich zu Hund 1 und 2 stärker. Die Korrelation zu Schwung- und Stemmphase wie bei Hund 1 und 2 ist bei der linken Vordergliedmaße nachvollziehbar. In Bezug auf die rechte Vordergliedmaße ist der Kurvenanstieg im Gegensatz zu Hund 1 und 2 schon in der ersten Hälfte der Schwungphase und erfolgt nur für einen geringen Zeitraum. Der folglich bereits Ende der Schwungphase der rechten Vordergliedmaße beginnende

Kurvenabfall ist dann bis zum Kurvenanstieg in Korrelation mit der Schwungphase der linken Vordergliedmaße zu beobachten. Das erste Maximum zeigt sich bei $24,33 \pm 5,5$ %, das zweite Maximum bei $65,5 \pm 2,6$ % des Schrittzklus. Die Minima zeigen sich bei $2 \pm 1,4$ % und $55,5 \pm 4,2$ % des Schrittzklus. Die ROM beträgt $0,62 \pm 0,5$ cm, die ROM_{\max} 1,81 cm.

Hund 4

Bei Hund 4 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Ein in allen 6 Schrittzklen zeitgleich auftretendes Maximum kann bei $17 \pm 2,6$ % des Schrittzklus beobachtet werden. Die Dauer des zugehörigen Kurvenanstiegs variiert jedoch stark. Zum Zeitpunkt des Kurvenanstiegs beginnt die Schwungphase der rechten Hintergliedmaße. Die ROM beträgt $0,41 \pm 0,4$ cm, die ROM_{\max} 1,92 cm.

Tabelle 8: Range of Motion der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Vertikale Translation C3/C3 - Schritt		
	M \pm SD (cm)	Maximum (cm)
Hund 1	0,46 \pm 0,5	1,45
Hund 2	0,56 \pm 0,3	1,3
Hund 3	0,62 \pm 0,5	1,81
Hund 4	0,41 \pm 0,5	1,92
Gesamt	0,51 \pm 0,4	/

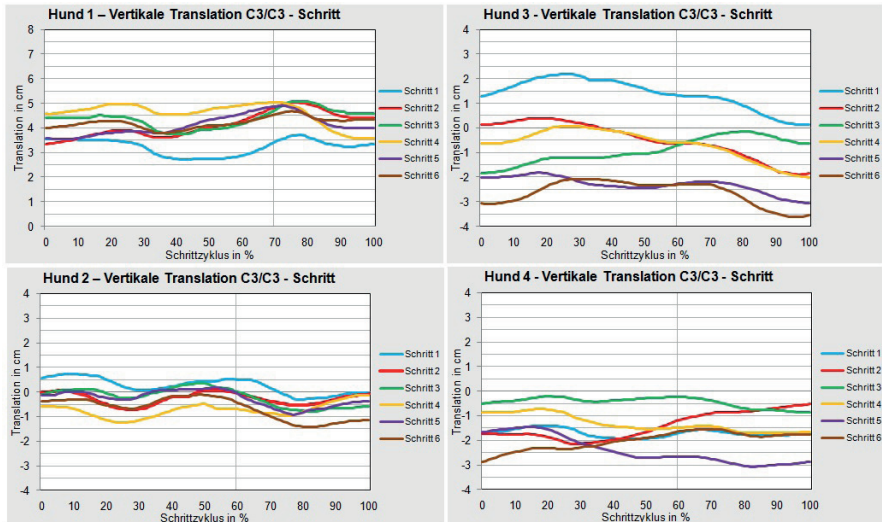


Abbildung 28: Diagramme der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittormierung durchgeföhrt wurde.

Zusammenhänge

Die vertikale Translation ist in positiver Richtung mit dem Ende der Vorschwingphase der Vordergliedmaßen verknüpft. Dabei zeigt Hund 1 eine größere Positionsveränderung der Gelenkkette mit dem Vorschwingen der rechten und Hund 2 mit dem Vorschwingen der linken Vordergliedmaße. Bei Hund 3 kann die Korrelation nur bei der linken Vordergliedmaße beobachtet werden. Die sagittale Translation in negativer Richtung ist mit dem Beginn der Stemmphase der Vordergliedmaßen verknüpft. Hier stimmt das Ausmaß der Amplitude mit der Seite der größeren Amplitude während der Vorschwingphase überein. Zu diesem Zeitpunkt ist im Hochgeschwindigkeitsvideo eine Gewichtsverlagerung und Niedergehen des Halses zu beobachten. Am Ende der Vorschwingphasen der Vordergliedmaßen findet ein Anheben des Halses und des Kopfes statt.

Bei Hund 3 und 4 ist das gangzyklusabhängige Kurvenmuster von Hund 1 und Hund 2 nicht erkennbar. Im Hochgeschwindigkeitsvideo sind im Vergleich zu Hund 1 und 2 mehr Eigenbewegungen vom Kopf zu beobachten.

9.2.1.3 Laterale Translation

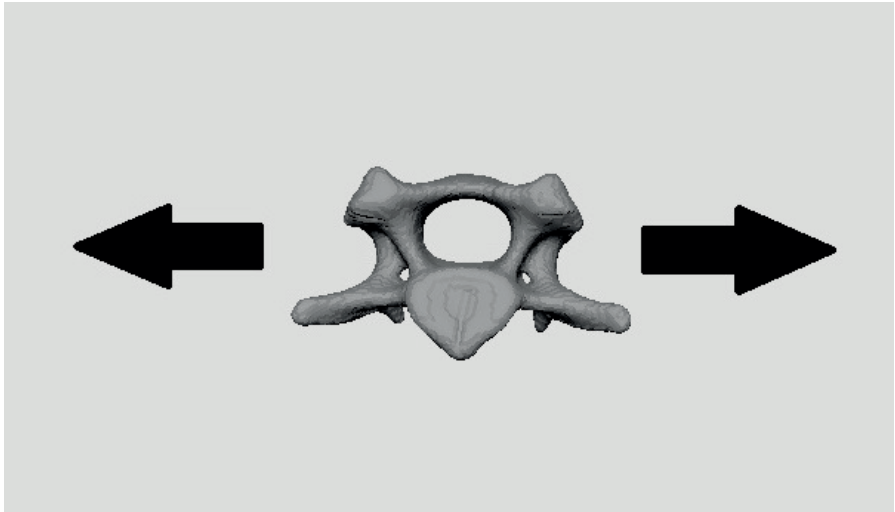


Abbildung 29: Laterale Translation des Gelenks C3/C3 - Bewegungsrichtung des dritten Halswirbels bzw. der Gelenkkette nach linkslateral oder rechtslateral.

Die laterale Translation ist die Translation in lateraler Richtung nach rechts oder links. Eine Translation nach rechts-lateral bedeutet einen Kurvenanstieg und eine Translation nach links-lateral bedeutet einen Kurvenabfall.

Bei Hund 2 und 4 kann jeweils ein zeitgleiches Auftreten von einem Maximum und einem Minimum beobachtet werden. Bei Hund 1 und 3 tritt nur ein gemeinsames Minimum während der 6 Schrittzyklen auf. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,9 \pm 0,8$ cm.

Im Einzelnen stellt sich die laterale Translation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund1

Zu Beginn der Stemmphase der linken Vordergliedmaße bzw. Ende der Stemmphase der rechten Vordergliedmaße zeigt sich ein Kurvenabfall. Das Minimum zeigt sich bei $44,33 \pm 2,3$ % des Schrittzklus. Ein in allen Schrittzyklen erkennbarer

Kurvenanstieg erfolgt am Ende des jeweiligen Schrittzklus zu Beginn der Stemmphase der rechten Vordergliedmaße. Das Maximum dieses Anstiegs variiert und wird bei $9,67 \pm 6,6$ % des Schrittzklus erreicht. Die ROM beträgt $0,83 \pm 0,6$ cm, die ROM_{\max} $1,72$ cm.

Hund2

Hund 2 zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf und Abhängigkeitsverhältnis der Kurvenanstiege und -abfälle zu Schwung- und Stemmphase der Vordergliedmaßen wie sie bei Hund 1 beobachtet wurden. Ein zeitgleich auftretendes Maximum zeigt sich bei $85,17 \pm 2,4$ % des Schrittzklus, im ersten Drittel der Stemmphase der rechten Vordergliedmaße, am Ende der Stemmphase der linken Vordergliedmaße. Das Minimum zeigt sich zu Beginn der Stemmphase der linken Vordergliedmaße, am Ende der Stemmphase der rechten, bei $35 \pm 6,4$ % des Schrittzklus. Die ROM beträgt $0,62 \pm 0,7$ cm, die ROM_{\max} $2,33$ cm.

Hund 3

Hund 3 zeigt einen Kurvenabfall zu Beginn der Stemmphase der linken Vordergliedmaße. Das Minimum wird bei $44,17 \pm 3,4$ % des Schrittzklus erreicht. Ein einheitlicher Kurvenanstieg ist nicht zu beobachten. Die ROM beträgt $0,96 \pm 1,1$ cm, die ROM_{\max} $3,83$ cm

Hund4

Hund 4 zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf wie Hund 1 und 2 mit einem Abhängigkeitsverhältnis zur Stemmphase beider Vordergliedmaßen. Das Maximum wird bei $5 \pm 1,4$ % des Schrittzklus erreicht und das Minimum bei $48,67 \pm 4,3$ %. Die Amplitude der Bewegungskurven ist tendenziell größer. Die ROM beträgt $1,44 \pm 0,7$ cm, die ROM_{\max} $2,62$ cm.

Tabelle 9: Range of Motion der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Laterale Translation C3/C3 - Schritt		
	M±SD (cm)	Maximum (cm)
Hund 1	0,83±0,6	1,72
Hund 2	0,62±0,7	2,33
Hund 3	0,96±1,1	3,83
Hund 4	1,44±0,7	2,62
Gesamt	0,90±0,8	/

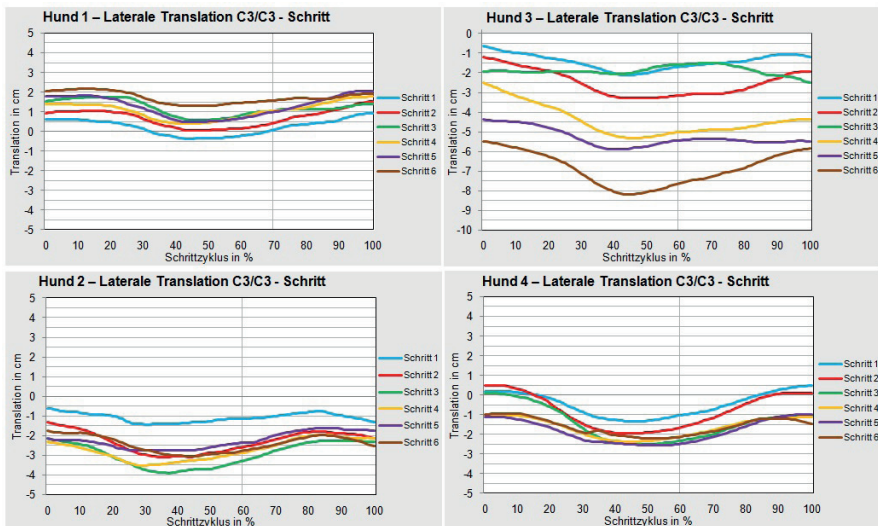


Abbildung 30: Diagramme der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die laterale Translation ist mit der Stemmphase der Vordergliedmaßen verknüpft, bei der zu Beginn eine Gewichtsverlagerung auf die Gliedmaße zu beobachten ist. Mit der Stemmphase der linken Vordergliedmaße erfolgt eine Translation nach links, mit der Stemmphase der rechten Vordergliedmaße eine Translation nach rechts. Die Amplitudengröße korreliert im Hochgeschwindigkeitsvideo mit einem eher körpernahen Vorführen der Vordergliedmaße bzw. einem eher breitbeinigen Laufbild.

9.2.1.4 Axiale Rotation

Die axiale Rotation beschreibt die Rotation um die Horizontalachse, wodurch eine Neigung des Wirbelkörpers nach rechts oder links entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine axiale Rotation nach rechts und ein Kurvenabfall eine axiale Rotation nach links.

Eine schrittzkluskorrelierte axiale Rotation kann bei Hund 1 und 2 beobachtet werden. In jedem Schritt unterscheiden sich Ausmaß und Dauer der Rotationsbewegungen. Bei Hund 3 und 4 ist keine Korrelation zum Schrittzklus möglich. Die durchschnittliche ROM beträgt $2,3 \pm 3^\circ$.

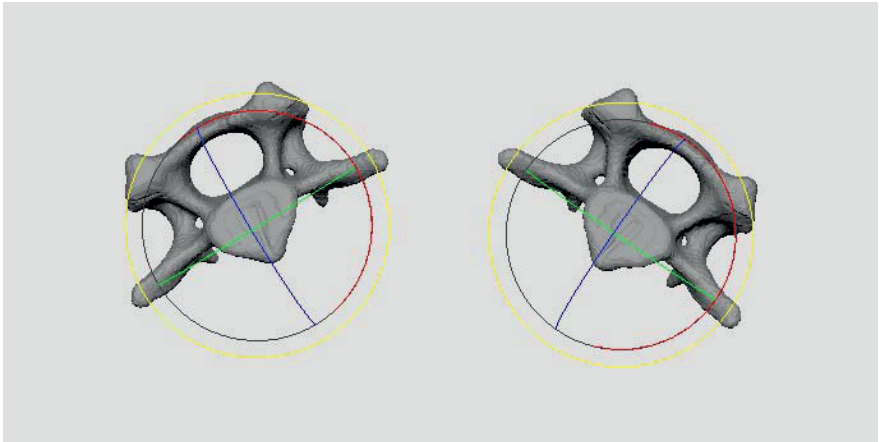


Abbildung 31: Axiale Rotation des Gelenks C3/C3 - Bewegungsrichtung des dritten Halswirbels bzw. der Gelenkkette bei axialer Rotation nach links oder rechts.

Im Einzelnen stellt sich die axiale Rotation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Bei Hund 1 ist zeigt sich in 4 von 6 Schritten ein Kurvenabfall zu Beginn der Stemmphase der linken Vordergliedmaße bzw. am Ende der Stemmphase der rechten Vordergliedmaße. Das Kurvenmaximum zugehörig zu dem Kurvenverlauf zeigt sich bei $32,25 \pm 5,3$ % des Schrittzklus und das Minimum bei $43,75 \pm 3,8$ % des Schrittzklus. Ein Kurvenanstieg entsprechend zu Beginn der Stemmphase der rechten Vordergliedmaße bzw. Ende der Stemmphase der linken Vordergliedmaße kann bei 3 Schritten beobachtet werden. Der Kurvenanstieg hat ein zugehöriges Minimum bei $79 \pm 3,5$ % des Schrittzklus und ein Maximum bei $91,67 \pm 2,1$ % des Schrittzklus. Es können weitere Maxima und Minima beobachtet werden, diese stimmen jedoch maximal in 2 Schrittzklen jeweils zeitlich überein. Bei abrupten größeren Kurvenveränderungen sind aktive Kopfbewegungen im Hochgeschwindigkeitsvideo erkennbar. Die ROM beträgt $1,47 \pm 1,7^\circ$, die ROM_{\max} $5,95^\circ$.

Hund 2

Bei Hund 2 ist ein Kurvenanstieg und ein Kurvenabfall in gleichem Zusammenhang mit dem Fußfallmuster wie bei Hund 1 zu beobachten. Zu Beginn der Stemmphase der linken Vordergliedmaße zeigt sich ein Kurvenabfall mit einem Maximum bei $19,33 \pm 4,3 \%$ und einem Minimum bei $32,33 \pm 4 \%$ des Schrittzklus. Der Kurvenanstieg zu Beginn der Stemmphase der rechten Vordergliedmaße ist nur in 3 Schritten zu beobachten mit einem zugehörigen Minimum bei $69,67 \pm 2,5 \%$ und einem Maximum bei $75,33 \pm 2,1 \%$ des Schrittzklus. Bei diesem Hund zeigen sich während der gesamten Untersuchung in allen Schrittzklen mehrere Rotationen sowohl nach rechts und nach links. Im Hochgeschwindigkeitsvideo sind stetige leichte und vereinzelt größere Kopfbewegungen nach links und rechts zu beobachten. Die ROM beträgt $2,27 \pm 2^\circ$, die ROM_{\max} $9,9^\circ$.

Hund 3

Bei Hund 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar und keine Korrelation zum Schrittzklus nachzuvollziehen. Schrittzklus 2 unterscheidet sich am deutlichsten von den anderen Schrittzklen durch einen stetigen Kurvenanstieg und abrupten Kurvenabfall am Ende des Schrittzklus. Im Hochgeschwindigkeitsvideo ist eine leichte Kopfbewegung nach links zu beobachten, mit einer minimalen Bewegung zurück nach rechts, bevor in Schritt 3 eine größere seitliche Kopfbewegung im Hochgeschwindigkeitsvideo erkennbar ist. Im Zusammenhang mit dieser größeren Kopfbewegung ist kein Kurvenausschlag zu beobachten. Die ROM beträgt $2,42 \pm 3,2^\circ$, die ROM_{\max} $9,73^\circ$.

Hund 4

Bei Hund 4 ist ebenfalls kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar und keine Korrelation zum Schrittzklus nachzuvollziehen. In 5 Schritten ist ein stetiger Kurvenanstieg im ersten Drittel der Schrittzklen zu beobachten, mit größerer Amplitude bei Schritt 2 und 6. Im Hochgeschwindigkeitsvideo zeigt sich eine Kopfbewegung nach links. Die ROM beträgt $3,83 \pm 5,3^\circ$, die ROM_{\max} $20,54^\circ$.

Tabelle 10: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Axiale Rotation C3/C3 - Schritt		
	M±SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,47±1,7	5,95
Hund 2	2,27±2	9,9
Hund 3	2,42±3,2	9,73
Hund 4	3,82±5,3	20,53
Gesamt	2,3±3	/

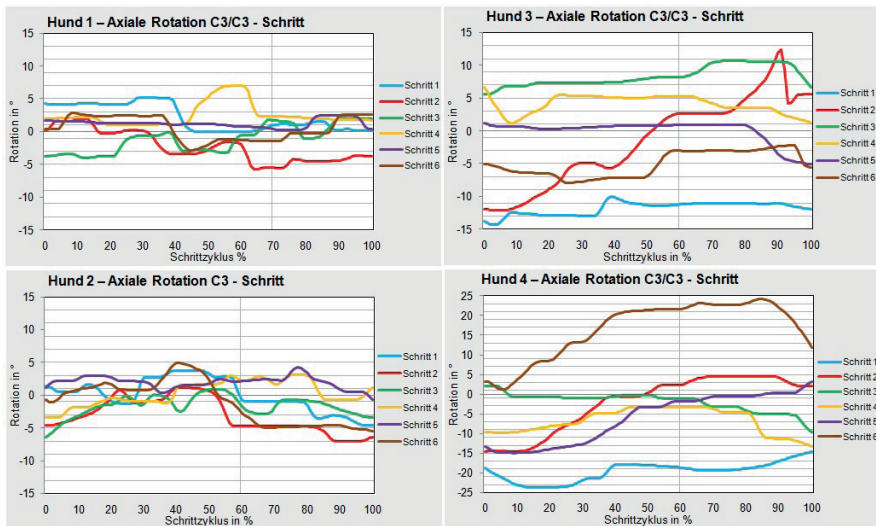


Abbildung 32: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Bei der axialen Rotation ist zum Teil ein Zusammenhang zum Aufußeln mit den Vordergliedmaßen erkennbar. Die axiale Rotation erfolgt jeweils kurz nach dem Aufußungszeitpunkt. Im Hochgeschwindigkeitsvideo ist hier die Gewichtsverlagerung auf die jeweilige Vordergliedmaße erkennbar, also eine Abwärtsbewegung von Kopf und Hals kombiniert mit einer Rollbewegung über den Rumpf. Zeigt der Hund eine aktive Kopfbewegung, ist das Kurvenereignis zu dem Zeitpunkt nicht erkennbar. Durch Kopfbewegungen kommt es zu weiteren Kurvenanstiegen und Kurvenabfällen während des Schrittzklus. Während bei der Gewichtsverlagerung die axiale Rotation zu gleichen Seite erfolgt, erfolgt bei aktiven Kopfbewegungen die axiale Rotation entgegengesetzt. Das bedeutet, dass es bei Kopfbewegungen nach links zu einer axialen Rotation nach rechts kommt und umgekehrt.

9.2.1.5 Laterale Rotation

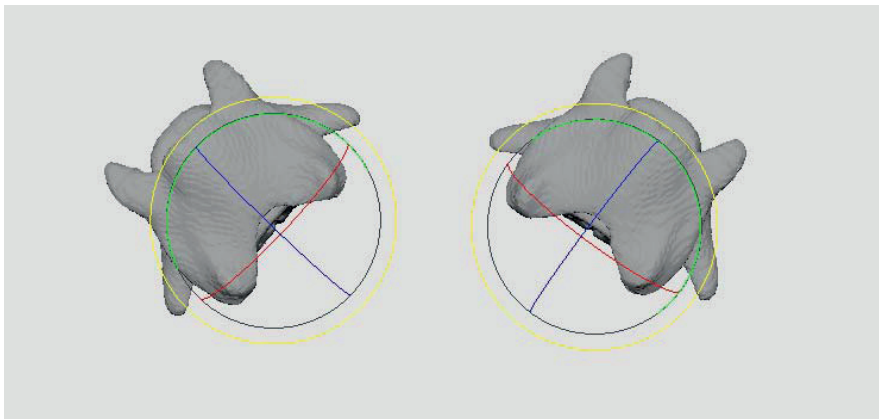


Abbildung 33: Laterale Rotation des Gelenks C3/C3 - Bewegungsrichtung des dritten Halswirbels bzw. der Gelenkkette bei lateraler Rotation nach links oder rechts.

Die laterale Rotation beschreibt die Rotation um die Vertikalachse, wodurch eine Seitwärtsbewegung des Wirbelkörpers nach rechts oder links entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine laterale Rotation nach links und ein Kurvenabfall eine laterale Rotation nach rechts.

Bei keinem Individuum ist ein einheitliches Kurvenverhalten zwischen den Schritten zu beobachten, und auch zwischen den Individuen ist kein einheitliches Bewegungsmuster erkennbar. Bei Bewegungskurven mit großen Amplituden ist bei Betrachtung der zugehörigen Hochgeschwindigkeitsvideos eine Kopfdrehung nach links bzw. rechts zu sehen. Die durchschnittliche ROM beträgt $1,94 \pm 2,7^\circ$. Die ROM_{max} betragen für die untersuchten Hunde $7,4^\circ$, $7,19^\circ$, $10,51^\circ$ und $20,69^\circ$.

Tabella 11: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Laterale Rotation C3/C3 - Schritt		
	M \pm SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,61 \pm 1,6	7,4
Hund 2	1,32 \pm 1,4	7,19
Hund 3	2,53 \pm 2,8	10,51
Hund 4	3,06 \pm 4,8	20,69
Gesamt	1,94 \pm 2,7	/

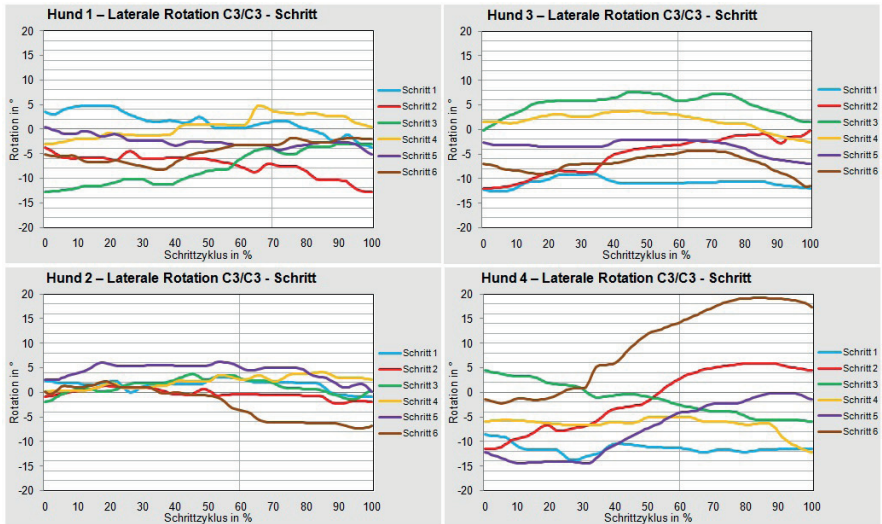


Abbildung 34: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

9.2.1.6 Sagittale Rotation

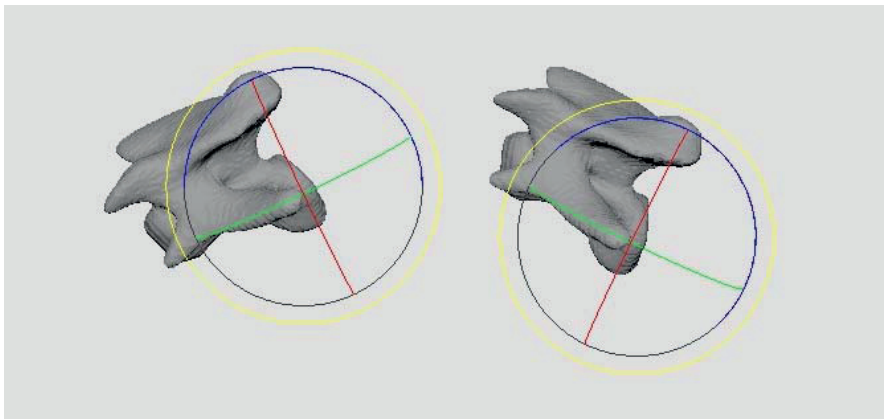


Abbildung 35: Sagittale Rotation des Gelenks C3/C3 - Bewegungsrichtung des dritten Halswirbels bzw. der Gelenkkette bei sagittaler Rotation nach ventral oder dorsal.

Die sagittale Rotation beschreibt die Rotation um die Lateralachse, wodurch eine Neigung des Wirbelkörpers nach oben oder unten entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine sagittale Rotation nach oben und ein Kurvenabfall eine sagittale Rotation nach unten.

Bei Hund 1 und 2 ist ein biphasisches Kurvenmuster mit zwei Maxima und zwei Minima zu beobachten. Bei Hund 3 und 4 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Die durchschnittliche ROM beträgt $3,12 \pm 3,2^\circ$.

Im Einzelnen stellt sich die sagittale Rotation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Hund 1 zeigt jeweils einen Kurvenanstieg während der Schwungphase beider Vordergliedmaßen. In Schritt 1 und 3 ist der Kurvenanstieg nur in Bezug zu der Schwungphase der rechten und nicht zu der linken Vordergliedmaße zu beobachten. Die Amplitude ist insgesamt bei der Schwungphase der rechten Vordergliedmaße größer. Das erste Maximum zeigt sich bei $18,5 \pm 3,8$ % des Schrittzklus und das zweite bei $72,6 \pm 4,2$ % des Schrittzklus. Ein Kurvenabfall zeigt sich im ersten Drittel der Stemmphase beider Vordergliedmaßen. Die Amplitude ist bei der Stemmphase der linken Vordergliedmaße im Vergleich zur Stemmphase der rechten Vordergliedmaße größer. Das erste Minimum zeigt sich bei $45,6 \pm 3,1$ % und das zweite bei $95,8 \pm 4$ % des Schrittzklus. Die ROM beträgt $3,1 \pm 3,5^\circ$, die ROM_{\max} $11,84^\circ$.

Hund 2

Hund 2 zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf und Abhängigkeitsverhältnis zur Stemm- und Schwungphase beider Vordergliedmaßen wie Hund 1. Die Amplitude zugehörig zur Aktion der linken und rechten Vordergliedmaße zeigt einen weniger ausgeprägten Unterschied als bei Hund 1. Die Maxima zeigen sich bei $13,5 \pm 3,4$ % und $63,17 \pm 4,5$ % des Schrittzklus. Die Minima zeigen sich bei $37,17 \pm 2,7$ % und $89,17 \pm 3,2$ % des Schrittzklus. Die ROM beträgt $4,19 \pm 3,4^\circ$. Die ROM_{\max} beträgt $11,37^\circ$.

Hund 3

Bei Hund 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Im Hochgeschwindigkeitsvideo zeigen sich mehrere aktive Kopfbewegungen. Die Kurvenanstiege korrelieren mit einer Kopf-Hals-Bewegung nach oben und die Kurvenabfälle mit einer Kopf-Hals-Bewegung nach unten. Zum Teil sind die Bewegungen auch mit Lateralbewegungen kombiniert. Die ROM beträgt $2,81 \pm 3,1^\circ$. Die ROM_{max} beträgt $10,71^\circ$.

Hund 4

Bei Hund 4 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar, er zeigt aktive Kopfbewegungen wie Hund 3. Nur in Schritt 3 ist das biphasische Kurvenmuster wie bei Hund 1 und 2 zu beobachten. Die ROM beträgt $2,45 \pm 7,7^\circ$. Die ROM_{max} beträgt $10,36^\circ$.

Tabelle 12: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Sagittale Rotation C3/C3 - Schritt		
	M \pm SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	3,1 \pm 3,5	11,84
Hund 2	4,2 \pm 3,4	11,38
Hund 3	2,8 \pm 3,1	10,7
Hund 4	2,45 \pm 2,7	10,36
Gesamt	3,12 \pm 3,2	/

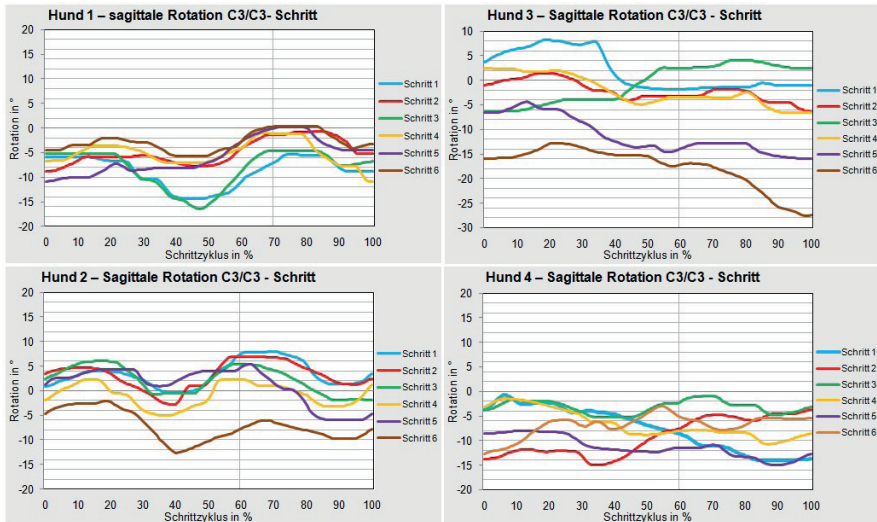


Abbildung 36: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

In der Vorschwingphase einer Vordergliedmaße und zeitgleichem Stemmphasenende der kontralateralen Vordergliedmaße findet ein Anheben des Halses und des Kopfes statt. Bei Hund 3 und 4 sind im Hochgeschwindigkeitsvideo im Vergleich zu Hund 1 und 2 mehr Eigenbewegungen vom Kopf zu beobachten.

9.2.1.7 Korrelation der Translation- und Rotationsbewegungen von C3

Zwischen der gangzyklusabhängigen horizontalen und vertikalen Translation ist eine Kopplung in der Weise zu beobachten, dass mit einer Translation nach kranial eine Translation nach dorsal nachvollziehbar ist und mit einer Translation nach kaudal eine Translation nach ventral.

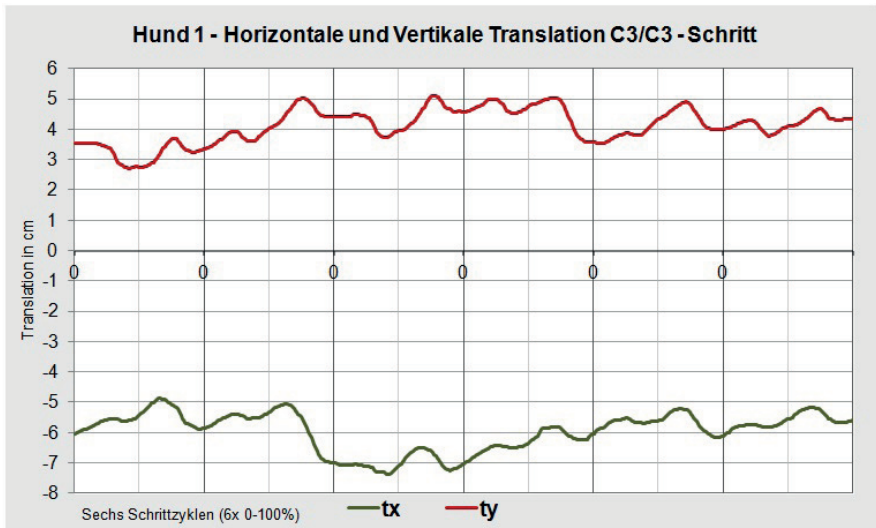


Abbildung 37: Diagramm der Korrelation zwischen horizontaler Translation (T_x) und vertikaler Translation (T_y) des Gelenks C3/C3 im Schritt. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Translation in cm an.

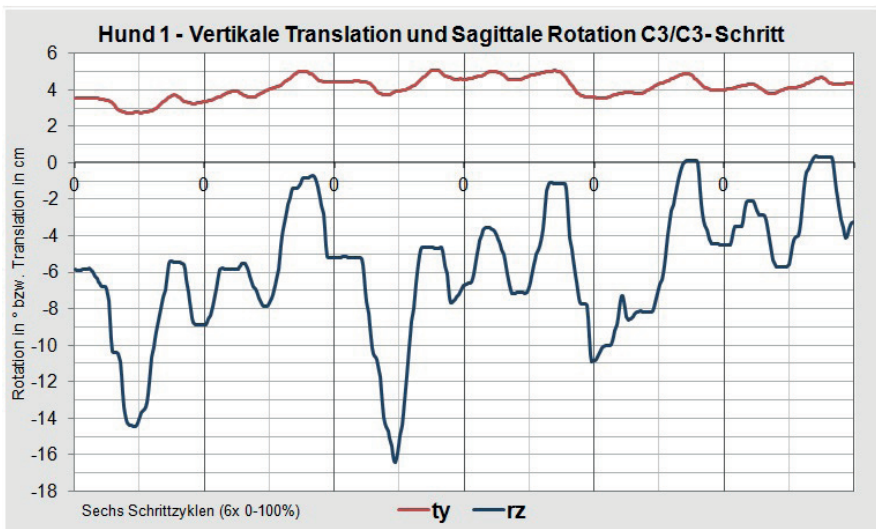


Abbildung 38: Diagramm der Korrelation zwischen vertikaler Translation (T_y) und sagittaler Rotation (R_z) des Gelenks C3/C3 im Schritt. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt den Grad der Rotation in Grad ($^{\circ}$) bzw. das Maß an Translation in cm an.

Die vertikale Translation zeigt außerdem eine Kopplung mit der sagittalen Rotation. Am Ende der Translationsbewegung erfolgt die Rotationsbewegung in die jeweils gleiche Richtung.

Auch die laterale Translation steht im Zusammenhang mit der vertikalen Translation. Mit den biphasisch auftretenden Tiefpunkten der vertikalen Translation sind die maximale linkslaterale Translation und die maximale rechtslaterale Translation verknüpft. Eine gangzyklusassoziierte Kopplung der vertikalen und lateralen Translation mit der axialen Rotation im Sinne einer Drehkippbewegung im Rahmen der Gewichtsverlagerung auf die Vordergliedmaßen ist nur vereinzelt nachvollziehbar, wenn keine aktiven Kopfbewegungen stattfinden.

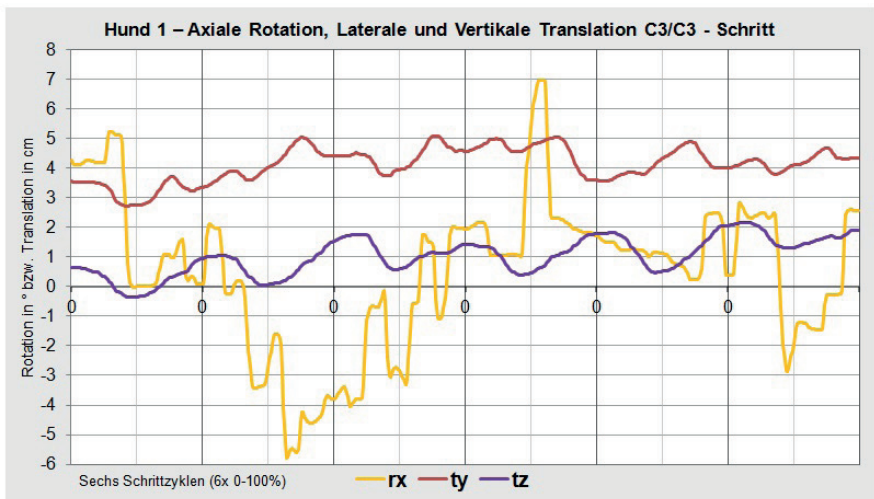


Abbildung 39: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (Rx), vertikaler Translation (Ty) und lateraler Translation (Tz) des Gelenks C3/C3 im Schritt. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt den Grad der Rotation in Grad (°) bzw. das Maß an Translation in cm an.

9.2.2 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C2

Bei allen Studienteilnehmern konnte keine Bewegung im virtuellen Gelenk zwischen C3/C2 festgestellt werden.

9.2.3 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C2/C1

Die Bewegungsdaten des virtuellen Gelenkes C2/C1 der Gelenkkette geben die Rotationsbewegungen des ersten Halswirbels in Relation zum zweiten Halswirbel wieder.

9.2.3.1 Sagittale Rotation

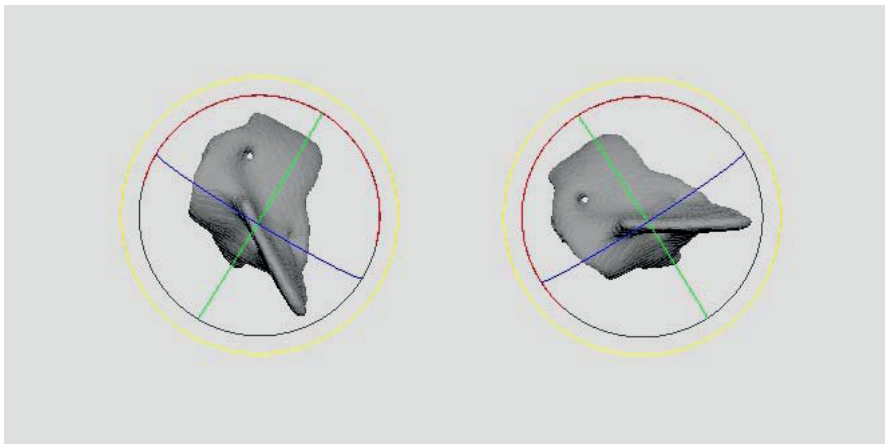


Abbildung 40: *Sagittale Rotation des Gelenks C2/C1 - Bewegungsrichtung des ersten Halswirbels bei sagittaler Rotation nach dorsal oder ventral.*

Die sagittale Rotation beschreibt die Rotation um die Lateralachse, wodurch eine Neigung des Wirbelkörpers nach oben oder unten entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine sagittale Rotation nach oben und ein Kurvenabfall eine sagittale Rotation nach unten.

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Die Kurvenanstiege oder Kurvenabfälle sind in Relation zum Schrittzzyklus jeweils von kurzer Dauer. Bei Kurvenveränderungen sind im Hochgeschwindigkeitsvideo bei allen vier Hunden leichte bis größere Kopfbewegungen erkennbar. Allen Kurvenanstiegen gemeinsam ist eine minimale Flexion des Halses, bei der die Nase zum Körper genommen wird, meist kombiniert mit einer Seitwärtsbewegung des Kopfes. Bei den Kurvenabfällen kann in Kombination mit den Kopfbewegungen eine minimale Extension des Halses beobachtet werden. Bei kleinen Flexions- oder Extensionsbewegungen im Hochgeschwindigkeitsvideo sind aber durchaus auch keine Kurvenveränderungen im Diagramm zu sehen. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,40 \pm 0,87^\circ$. Die ROM_{max} betragen für die untersuchten Hunde: $3,22^\circ$, $0,75^\circ$, $3,64^\circ$ und $4,03^\circ$.

Table 13: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Sagittale Rotation C2/C1 - Schritt		
	M\pmSD (°)	Maximum (°)
Hund 1	0,3\pm0,8	3,22
Hund 2	0,11\pm0,2	0,75
Hund 3	0,59\pm1	3,64
Hund 4	0,72\pm1,3	4,03
Gesamt	0,40\pm0,9	/

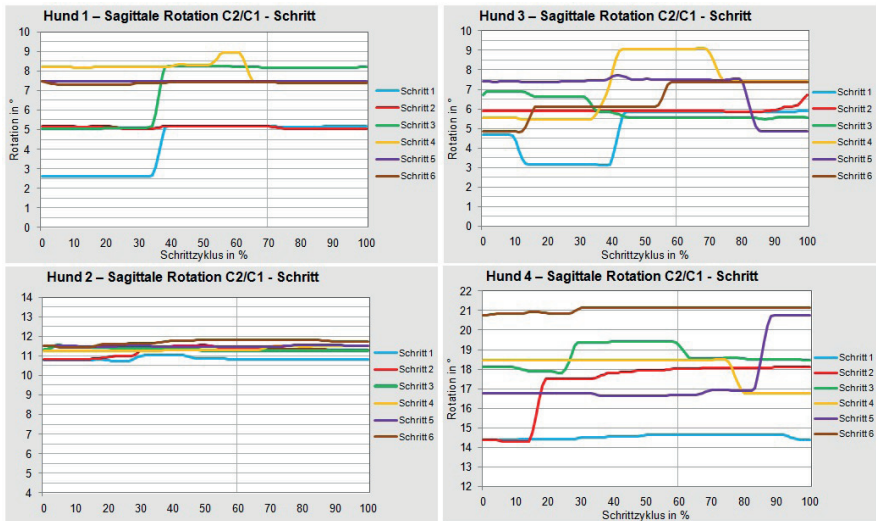


Abbildung 41: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Eine sagittale Rotation des Gelenkes ist bei Flexion oder Extension des Kopf-Hals-Überganges zu beobachten. Dabei zeigt sich eine umgekehrte Rotationsrichtung des ersten Halswirbels im Vergleich zur Halsstellung. Bei Flexion wird der Hals nach unten bewegt und die Nase in Richtung Körper geführt. Der erste Halswirbel zeigt dabei eine sagittale Rotation in positiver Richtung, also eine Neigung nach oben. Bei Extension wird der Hals nach oben genommen und die Nase entfernt sich vom Körper. Dabei zeigt der erste Halswirbel eine sagittale Rotation in negativer Richtung, also eine Neigung nach unten. Mit dem Schrittzyklus kann die Rotationsbewegung nicht in Zusammenhang gebracht werden.

Die im Diagramm dargestellten Bewegungen sind in den Hochgeschwindigkeitsvideos nicht als reine Extensions- oder Flexionsbewegungen erkennbar, da sie mit Seitwärtsbewegungen des Kopfes kombiniert sind. Kleinere Bewegungen können im Diagramm nicht identifiziert werden.

9.2.3.2 Laterale Rotation

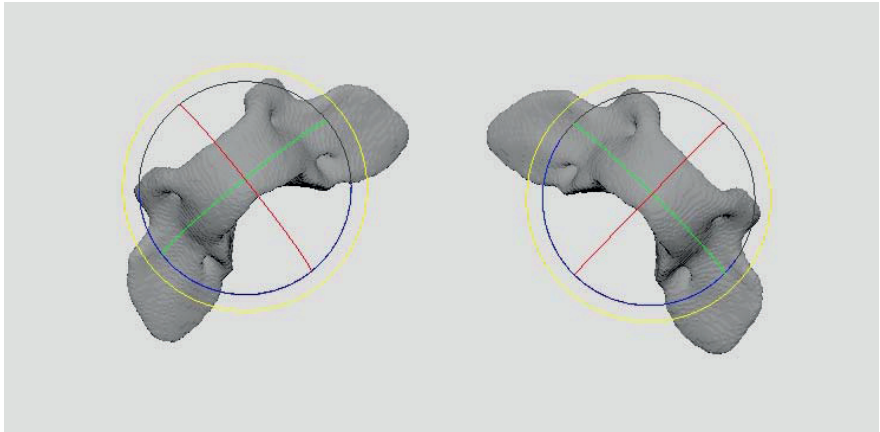


Abbildung 42: Laterale Rotation des Gelenks C2/C1 - Bewegungsrichtung des ersten Halswirbels bei lateraler Rotation nach links oder rechts.

Die laterale Rotation beschreibt die Rotation um die Vertikalachse, wodurch eine Seitwärtsbewegung des Wirbelkörpers nach rechts oder links entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine laterale Rotation nach links und ein Kurvenabfall eine laterale Rotation nach rechts.

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Die laterale Rotation tritt im Hochgeschwindigkeitsvideo synchron zu einer Kopfbewegung zur rechten bzw. linken Seite auf. Die durchschnittliche ROM beträgt $1,67 \pm 1,9^\circ$. Die ROM_{\max} betragen für die untersuchten Hunde: $6,43^\circ$, $6,53^\circ$, $6,29^\circ$ und $5,66^\circ$.

Tabelle 14: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Laterale Rotation C2/C1 - Schritt		
	M±SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,45±1,9	6,43
Hund 2	2,13±2,2	6,53
Hund 3	1,17±1,5	6,29
Hund 4	2,17±1,9	5,66
Gesamt	1,67±1,9	/

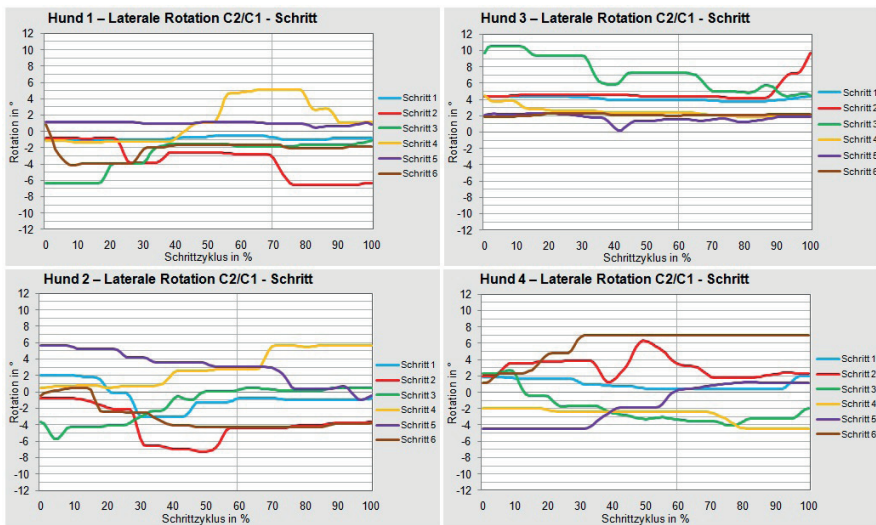


Abbildung 43: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die laterale Rotation vom Atlantoaxialgelenk wird bei Seitwärtsbewegungen des Kopfes nach links bzw. rechts genutzt. Die Rotationsbewegungen stehen nicht in Zusammenhang mit dem Schrittzklus.

9.2.3.3 Axiale Rotation

Die axiale Rotation beschreibt die Rotation um die Horizontalachse, wodurch eine Neigung des Wirbelkörpers nach rechts oder links entsteht. In Bezug auf den Atlas bedeutet dies eine Neigung des rechten Atlasflügels nach unten und umgekehrt. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine axiale Rotation nach rechts und ein Kurvenabfall eine axiale Rotation nach links.

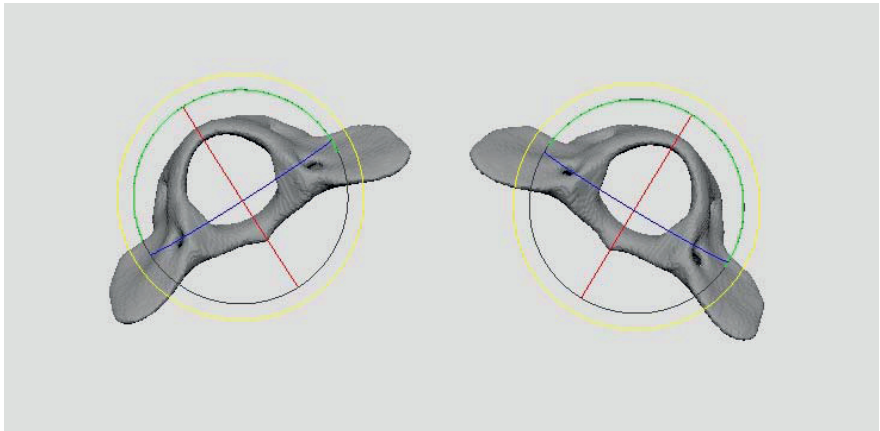


Abbildung 44: Axiale Rotation des Gelenks C2/C1 - Bewegungsrichtung des ersten Halswirbels bei axialer Rotation nach links oder rechts.

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Die axiale Rotation ist mit einer Kopfbewegung nach links oder rechts korreliert.

Die durchschnittliche ROM beträgt $3,52 \pm 3,3^\circ$. Die ROM_{\max} betragen für die untersuchten Hunde: $6,22^\circ$, $9,89^\circ$, $20,33^\circ$ und $13,11^\circ$.

Tabelle 15: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Axiale Rotation C2/C1 - Schritt		
	M \pm SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	2,94 \pm 1,9	6,22
Hund 2	2,83 \pm 2,2	9,89
Hund 3	5,37 \pm 5,3	20,33
Hund 4	3,76 \pm 3,4	13,11
Gesamt	3,52 \pm 3,3	/

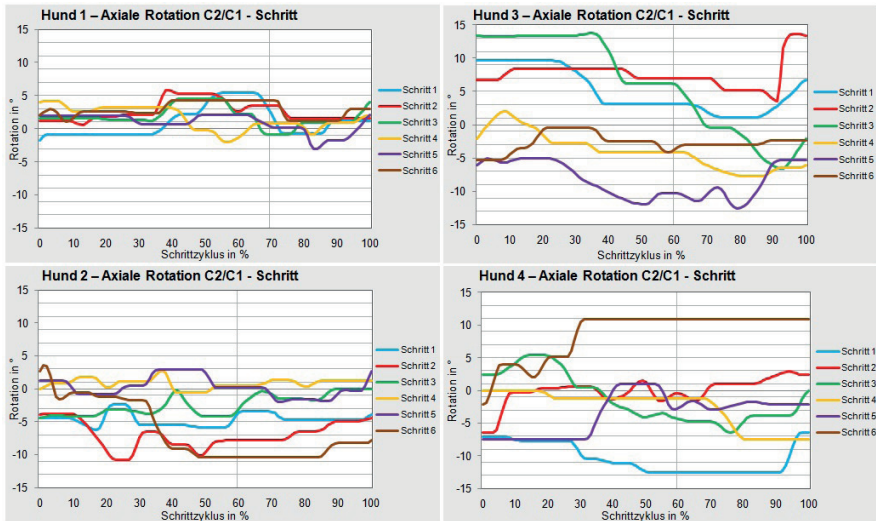


Abbildung 45: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Bei einer Kopfbewegung nach links zeigt sich eine axiale Rotation des Atlas nach rechts und umgekehrt. Im Vergleich zum Hochgeschwindigkeitsvideo zeigt sich der Ausschlag der Kurve jeweils eher zu Anfang der zu beobachtenden Kopfbewegungen. Kleinere Kurvenveränderungen können im Hochgeschwindigkeitsvideo nicht mit Bewegungen korreliert werden.

9.2.3.4 Korrelation der Rotationsbewegungen von C2/C1

Bei Betrachtung der axialen und lateralen Rotation des Atlantoaxialgelenks fällt auf, dass diese gemeinsam auftreten. Die Rotationsrichtungen werden bei der auftretenden Bewegung unterschiedlich kombiniert. Der Bewegungsumfang der axialen Rotation ist über den Untersuchungszeitraum tendenziell größer als der der lateralen Rotationsbewegungen.

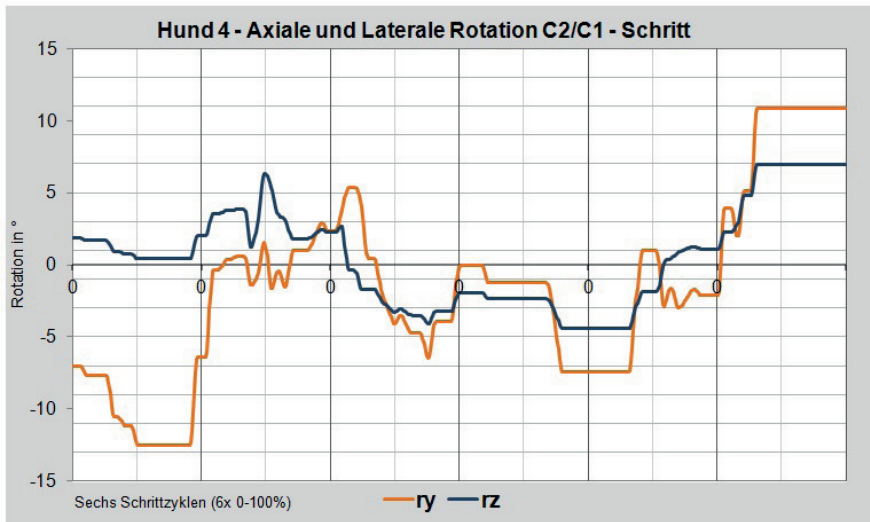


Abbildung 46: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (Ry) und lateraler Rotation (Rz) des Gelenks C2/C1 im Schritt. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt den Grad der Rotation in Grad (°) an.

9.2.4 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C1/Schädel

Die Bewegungsdaten des virtuellen Gelenkes C1/Schädel der Gelenkkette geben die Rotationsbewegungen des Kopfes in Relation zum ersten Halswirbel wieder.

9.2.4.1 Axiale Rotation

Die axiale Rotation beschreibt die Rotation um die Horizontalachse, wodurch eine Neigung des Kopfes nach rechts oder links entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine axiale Rotation nach rechts und ein Kurvenabfall eine axiale Rotation nach links.

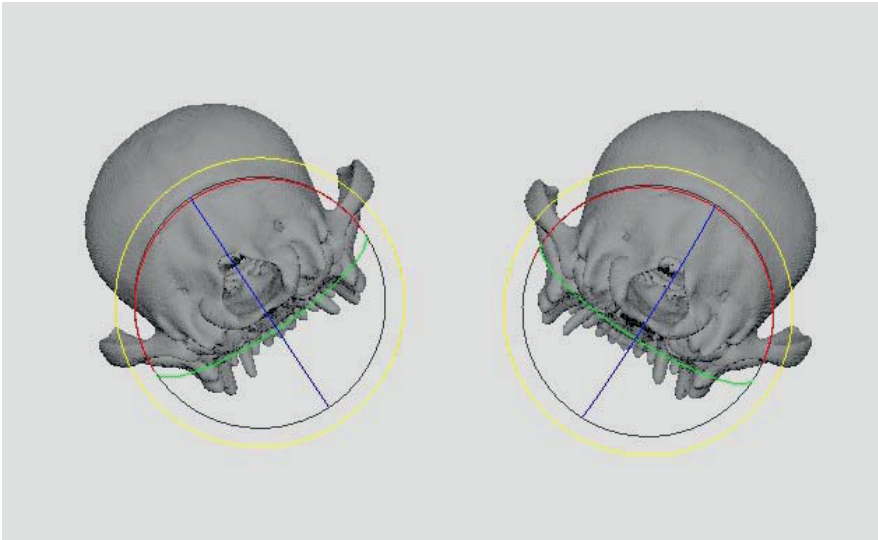


Abbildung 47: Axiale Rotation des Gelenks C1/Schädel - Bewegungsrichtung des Kopfes bei axialer Rotation nach links oder rechts.

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Die Kurvenveränderungen lassen sich mit aktiven Kopfbewegungen nach rechts und links in Zusammenhang bringen. Bei Kopfbewegung nach links ist im Diagramm eine axiale Rotation ebenfalls nach links zu beobachten. Bei Kopfbewegung nach rechts ist die axiale Rotation nach rechts erkennbar. Die durchschnittliche ROM beträgt $2,18 \pm 2,4^\circ$. Die ROM_{\max} betragen für die untersuchten Hunde: $9,05^\circ$, $7,91^\circ$, $11,74^\circ$ und $15,99^\circ$.

Tabelle 16: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Axiale Rotation C1/Schädel - Schritt		
	M±SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	2,14±2	9,05
Hund 2	2,13±1,6	7,91
Hund 3	1,88±2,3	11,74
Hund 4	2,73±3,7	15,99
Gesamt	2,18±2,4	/

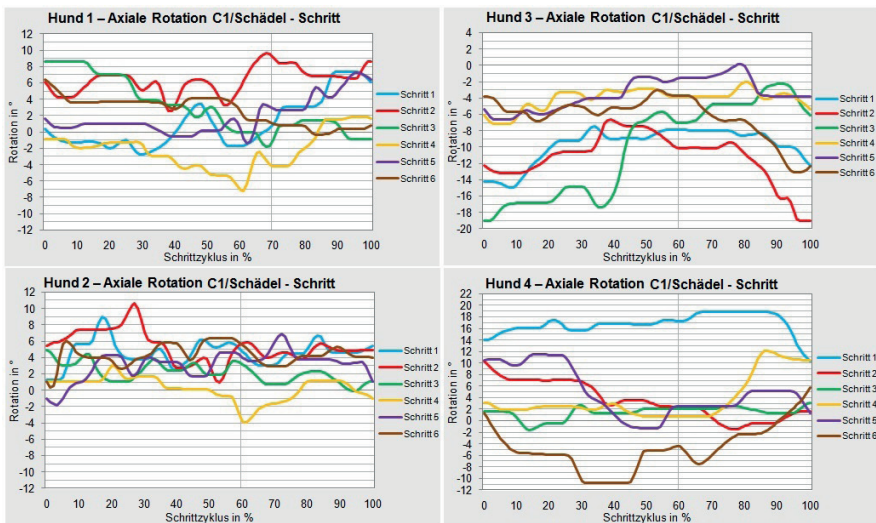


Abbildung 48: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die axiale Rotation ist bei einer Drehkippbewegung des Kopfes bei aktiven Kopfbewegungen nach rechts und links zu beobachten.

Versucht man am Knochenmodell eine rein axiale Bewegung am Atlantookzipitalgelenk zu erzeugen, ist dies kaum möglich. Beobachtet man die Kopfbewegung, die entsteht, wenn die Kondylen des Okziput der Richtung der Gelenkflächen der Foveae articulares craniales des Atlas folgen und dessen größtmögliche Fläche ausnutzen, ist weder eine rein axiale noch laterale Bewegung erkennbar, sondern eine Mischbewegung.

9.2.4.2 Laterale Rotation

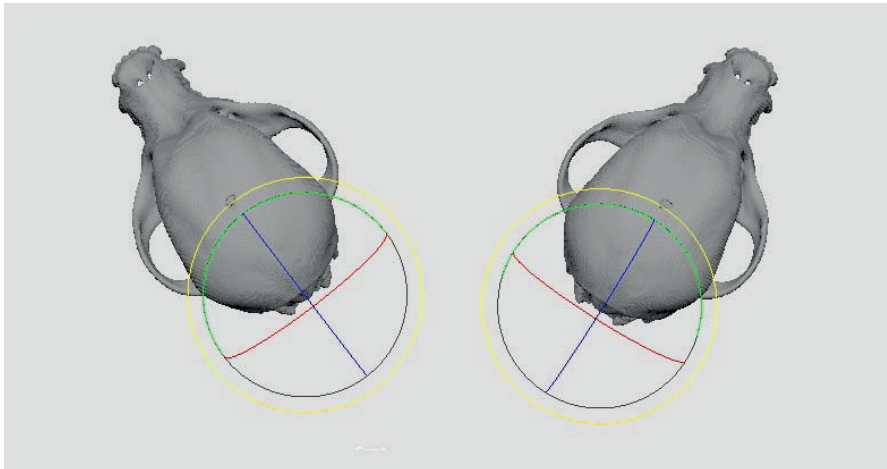


Abbildung 49: Laterale Rotation des Gelenks C1/Schädel - Bewegungsrichtung des Kopfes bei lateraler Rotation nach links oder rechts.

Die laterale Rotation beschreibt die Rotation um die Vertikalachse, wodurch eine Seitwärtsbewegung des Kopfes nach rechts oder links entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine laterale Rotation nach links und ein Kurvenabfall eine laterale Rotation nach rechts.

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Bei Kurvenveränderungen sind aktive Kopfbewegungen nach rechts und links im Hochgeschwindigkeitsvideo zu beobachten. Das Ausmaß der im Hochgeschwindigkeitsvideo wahrzunehmenden Bewegung und Amplitude im Diagramm stimmen nicht immer überein. Die durchschnittliche ROM beträgt $1,38 \pm 1,1^\circ$. Die ROM_{max} betragen für die untersuchten Hunde: $4,46^\circ$, $3,61^\circ$, $5,84^\circ$ und $6,49^\circ$.

Tabelle 17: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Laterale Rotation C1/Schädel - Schritt		
	M\pmSD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,38\pm1,1	4,46
Hund 2	1,27\pm0,9	3,61
Hund 3	1,21\pm1,1	5,84
Hund 4	1,73\pm1,3	6,49
Gesamt	1,38\pm1,1	/

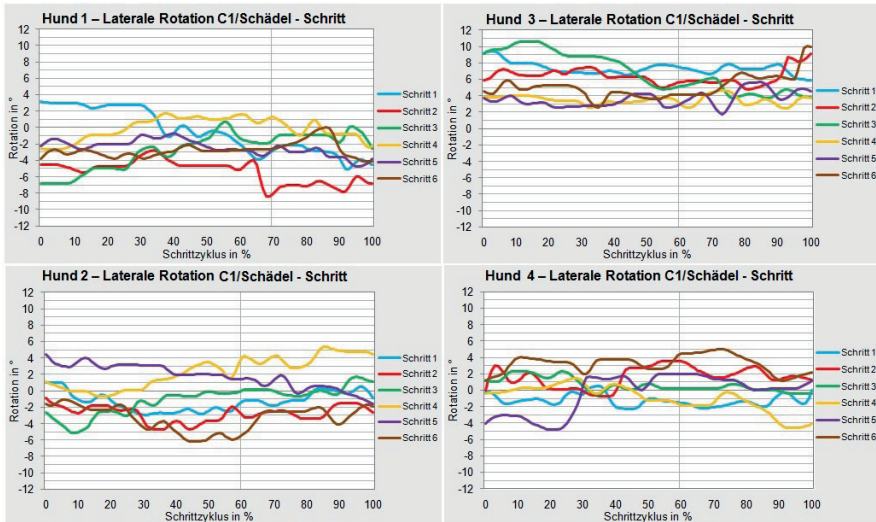


Abbildung 50: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die laterale Rotation ist ebenfalls bei einer Drehkippbewegung des Kopfes bei aktiven Kopfbewegungen nach rechts und links zu beobachten.

9.2.4.3 Sagittale Rotation

Die sagittale Rotation beschreibt die Rotation um die Lateralachse, wodurch eine Neigung des Kopfes nach oben oder unten entsteht. Ein Kurvenanstieg bedeutet eine sagittale Rotation nach oben und ein Kurvenabfall eine sagittale Rotation nach unten.

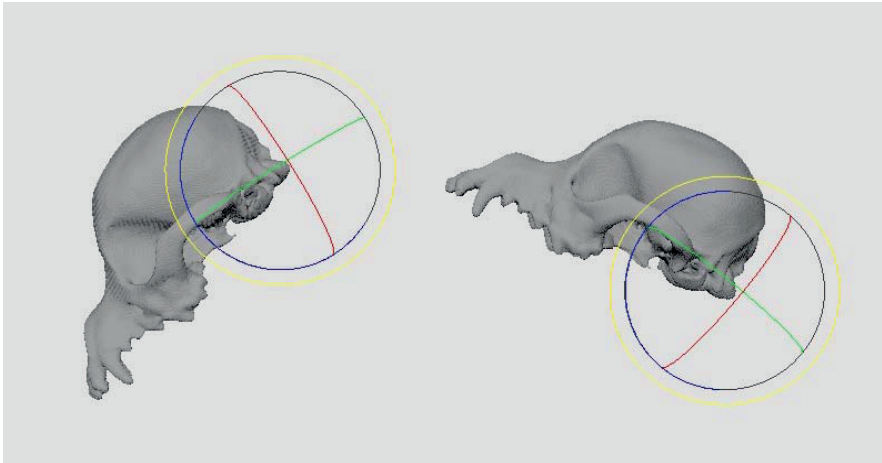


Abbildung 51: Sagittale Rotation des Gelenks C1/Schädel - Bewegungsrichtung des Kopfes bei sagittaler Rotation nach ventral oder dorsal.

Insgesamt kann ein biphasisches Kurvenmuster bei Hund 1 und 2 beobachtet werden, mit jeweils zwei Maxima und zwei Minima. Bei Hund 3 und 4 ist keine Korrelation zum Schrittzklus möglich.

Die absoluten Werte sind alle im negativen Bereich, da die Referenzposition des Kopfes die der Lagerung in der Computertomographie entspricht. Im Stand und im Laufen ist der Kopf in Relation zur Referenzposition nach unten geneigt, also in negativer sagittaler Rotation. Die durchschnittliche ROM beträgt $1,95 \pm 2,1^\circ$.

Im Einzelnen stellt sich die sagittale Rotation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Hund 1 zeigt im Schritt einen biphasischen Kurvenverlauf mit Kurvenanstieg am Ende der Vorschwingphase beider Vordergliedmaßen und Kurvenabfall während der ersten Hälfte der jeweilig zugehörigen Stemmphase. Die Kurve zeigt nach der Aktion mit der linken Seite eine größere Amplitude im Vergleich zur Aktion mit der rechten Seite. Zugehörig zur Stemmphase der rechten Vordergliedmaße zeigt der Kurvenabfall im Zeitpunkt und bei der Amplitude größere Unterschiede im Vergleich zur Stemmphase links. In Schrittzklus 2 ist der erste Anstieg in Bezug auf die

Vorschwingphase der linken Vordergliedmaße nicht zu beobachten. Aufgrund zusätzlicher geringgradiger Kurvenveränderungen während der Hauptrichtungsänderung der Bewegungskurven ist die zyklusassoziierte Betrachtung der auftretenden Maxima und Minima eingeschränkt. Die Maxima zeigen sich bei $34,2\pm 4,6\%$ und $87,83\pm 4,1\%$ des Schrittzklus. Die Minima zeigen sich bei $64,6\pm 5,9\%$ und $95,75\pm 3,1\%$ des Schrittzklus. Die ROM beträgt $1,69\pm 1,9^\circ$, die ROM_{\max} $6,58^\circ$.

Hund 2

Hund 2 zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf und Abhängigkeitsverhältnis zur Schwung- und Stemmphase der Vordergliedmaßen wie Hund 1. Die Amplituden von der rechten und linken Seite unterscheiden sich weniger im Vergleich zu Hund 1. Der Kurvenfall zugehörig zur Stemmphase der rechten Vordergliedmaße findet am Ende der einzelnen Schrittzklen statt, weshalb das zugehörige Minimum sich am Anfang des Schrittzklus befindet. Auch bei diesem Hund ist aufgrund zusätzlicher geringgradiger Kurvenveränderungen während der Hauptrichtungsänderung der Bewegungskurven die zyklusassoziierte Betrachtung der auftretenden Maxima und Minima eingeschränkt. Die Maxima zeigen sich bei $37,67\pm 3,2\%$ und $89\pm 2,8\%$ des Schrittzklus. Die Minima bei $8,67\pm 5,6\%$ und $56,5\pm 3,6\%$ des Schrittzklus. Die ROM beträgt $2\pm 1,9^\circ$, die ROM_{\max} $8,45^\circ$.

Hund 3

Bei Hund 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Im Hochgeschwindigkeitsvideo zeigen sich mehrere aktive Kopfbewegungen. Kurvenanstiege sind mit Absenken und Kurvenabfälle mit Anheben des Kopfes zu beobachten. Die ROM beträgt $1,59\pm 1,6^\circ$, die ROM_{\max} $6,52^\circ$.

Hund 4

Bei Hund 4 ist wie bei Hund 3 kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar und im Hochgeschwindigkeitsvideo zeigen sich mehrere aktive Kopfbewegungen. Kurvenanstiege korrelieren mit Absenken und Kurvenabfälle mit Anheben des Kopfes. Die ROM beträgt $2,62 \pm 2,9^\circ$, die ROM_{\max} $14,6^\circ$.

Tabelle 18: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Sagittaler Rotation C1/Schädel - Schritt		
	M\pmSD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,69\pm1,9	6,58
Hund 2	2\pm1,9	8,45
Hund 3	1,59\pm1,6	6,52
Hund 4	2,62\pm2,9	14,6
Gesamt	1,95\pm2,1	/

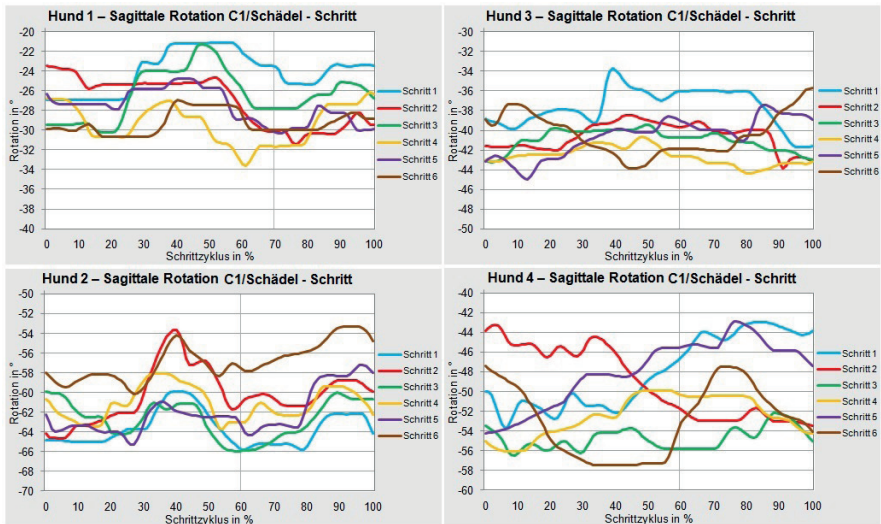


Abbildung 52: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Finden keine oder nur minimale aktive Kopfbewegungen statt, kann ein schrittzyklusassoziiertes Heben und Senken des Kopfes beobachtet werden. Es besteht ein Zusammenhang zur Vorschwingphase und Stemmphase der Vordergliedmaßen. Bei aktiven Kopfbewegungen ist dieser Zusammenhang nicht mehr nachzuvollziehen.

Die Rotationsrichtung verhält sich gegensätzlich zur Gesamtrichtung der Bewegung. Im Diagramm ist bei Anheben des Kopfes eine sagittale Rotation nach unten und bei Absenken eine sagittale Rotation nach oben erkennbar.

9.2.4.4 Korrelation der Rotationsbewegungen von C1/Schädel

Die sagittale Rotation kann einem schrittzyklusassoziierten Bewegungsmuster folgen, das mit den Fußungsphasen der Vordergliedmaßen verknüpft ist, wenn keine aktiven Kopfbewegungen ausgeführt werden.

Die axiale und laterale Rotation des Kopfes in Relation zum ersten Halswirbel treten gemeinsam auf. Die Kombination aus axialer und lateraler Rotation führt zu einer Drehkippbewegung in die gewünschte Richtung.

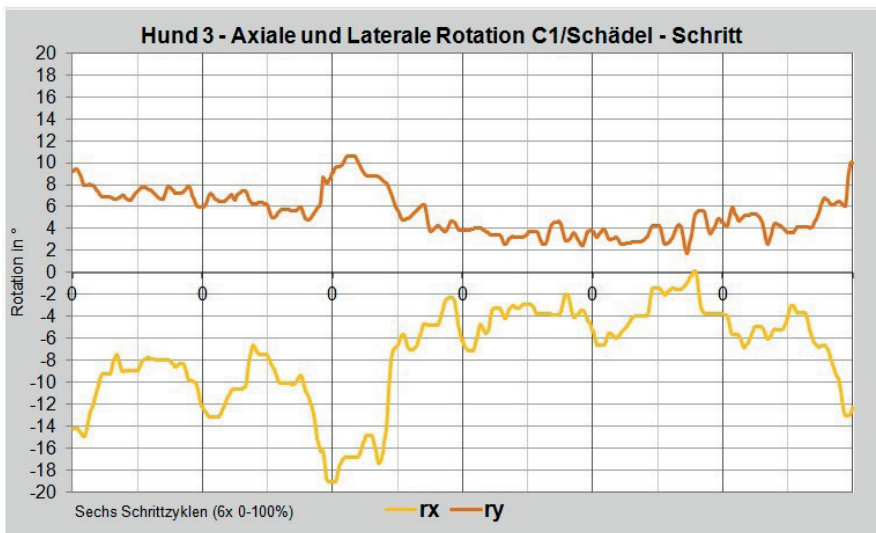


Abbildung 53: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (Rx) und lateraler Rotation (Ry) des Gelenks C1/Schädel im Schritt. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt den Grad der Rotation in Grad (°) an.

9.3 Datenanalyse der virtuellen Gelenke im Trab

Die Bewegungsachsen und Bewegungsrichtungen im Trab stimmen mit den Bewegungsachsen und Bewegungsrichtungen im Schritt überein.

9.3.1 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C3

Auch im Trab entsprechen die Bewegungsdaten des in der Hierarchie obersten virtuellen Gelenkes C3/C3 der Bewegung der Gelenkkette im Raum. Es liegen Translations- und Rotationsdaten dieses Gelenkes vor.

9.3.1.1 Horizontale Translation

Ein ausgeprägter und schrittzyklusabhängiger biphasischer Kurvenverlauf ist bei zwei der vier Hunde nachvollziehbar. Bei Hund 1 fehlt zum Teil das erste Minimum, um von einem biphasischen Kurvenverlauf sprechen zu können, das Kurvenverhalten ist dennoch ähnlich. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,68 \pm 0,5$ cm.

Im Einzelnen stellt sich die horizontale Translation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Hund 1 zeigt einen schrittzyklusabhängigen Kurvenverlauf, der sich in 4 von 6 Schritten biphasisch verhält. Das erste Minimum variiert im Vergleich zu den anderen Maxima und Minima des Schrittzyklus jedoch deutlich und fehlt in den ersten beiden Schrittzyklen ganz. Reproduzierbar in allen Schrittzyklen sind Maxima bei $35,67 \pm 3,3$ % und $79,83 \pm 2,9$ % des Schrittzyklus und ein Minimum bei $50,83 \pm 4,5$ % des Schrittzyklus. Die Maxima erfolgen zu Beginn des Aktionszeitraumes, in dem die Gliedmaßendiagonale gewechselt wird. Das Minimum zeigt sich beim Auffußungszeitpunkt der rechten Hintergliedmaße. Die Amplitude der horizontalen Translationsbewegungen ist insgesamt gering ausgeprägt. Die ROM beträgt $0,33 \pm 0,3$ cm, die ROM_{max} 0,75 cm.

Hund 2

Hund 2 zeigt einen ausgeprägten biphasischen Kurvenverlauf. Die Maxima zeigen sich bei $42,33 \pm 3,3$ % und $91,67 \pm 3,4$ % des Schrittzyklus. Zu dem Zeitpunkt steht der Wechsel der diagonalen Gliedmaßenpaare von Stemm- zu Schwungphase bzw. umgekehrt kurz bevor. Die Minima zeigen sich nach halber Zeit zwischen den beiden Maxima, bei $18 \pm 3,5$ % und $65,83 \pm 2,1$ % des Schrittzyklus. Die ROM beträgt $0,74 \pm 0,3$ cm, die ROM_{\max} 1,17 cm.

Hund 3

Bei Hund 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf nachvollziehbar. Der Hund zeigt während der Untersuchung Veränderungen seiner Laufposition auf dem Laufband, wodurch die schrittzyklusabhängige Bewegung nicht mehr nachweisbar ist. Die ROM beträgt $0,91 \pm 1$ cm, die ROM_{\max} 2,9 cm.

Hund 4

Hund 4 zeigt einen ausgeprägten biphasischen Kurvenverlauf mit gleichem Abhängigkeitsverhältnis zum Schrittzyklus und zum Fußfallmuster wie Hund 2. Die Maxima zeigen sich bei $38,33 \pm 2,9$ % und $90,17 \pm 2$ % des Schrittzyklus und die Minima bei $13 \pm 2,37$ % und $62,83 \pm 4,9$ % des Schrittzyklus. Die ROM beträgt $0,82 \pm 0,4$ cm, die ROM_{\max} 1,82 cm.

Tabelle 19: Range of Motion der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Horizontale Translation C3/C3 - Trab		
	M±SD (cm)	Maximum (cm)
Hund 1	0,33±0,3	0,75
Hund 2	0,74±0,3	1,17
Hund 3	0,91±1	2,9
Hund 4	0,82±0,4	1,82
Gesamt	0,68±0,5	/

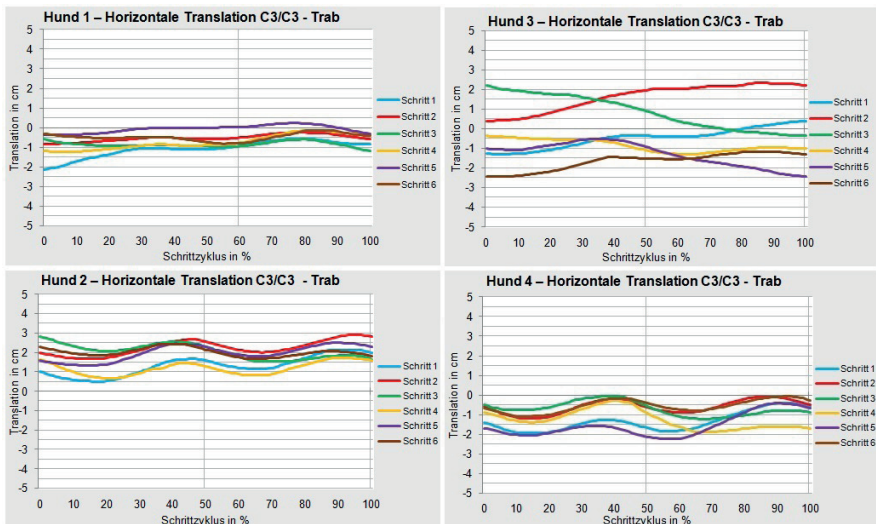


Abbildung 54: Diagramme der horizontalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Zu einem Kurvenanstieg kommt es bei einer Positionsveränderung der Gelenkkette nach kranial. Eine Translation nach kaudal zeigt sich nach dem Wechsel der diagonalen Gliedmaßenpaare. Nach der Hälfte der Zeit kann ein Vorschub, also eine Translation nach kranial, beobachtet werden, der kurz vor dem Wechsel des Gliedmaßenpaares das Maximum erreicht.

9.3.1.2 Vertikale Translation

Bei allen Hunden ist eine vertikale Translation biphasisch und schrittzyklusabhängig zu beobachten. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,79 \pm 0,4$ cm.

Im Einzelnen stellt sich die vertikale Translation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Es zeigt sich ein biphasisches Kurvenmuster mit Kurvenabfall während des Aktionszeitraumes, in dem der Hund die Gliedmaßendiagonale wechselt. Es folgt ein Kurvenanstieg, bis der nächste Wechsel ansteht. Die Maxima zeigen sich bei $29,33 \pm 2,9$ % und $80,83 \pm 2,6$ % des Schrittzyklus. Die Minima zeigen sich bei $4,25 \pm 1,5$ % und $57,8 \pm 2,7$ % des Schrittzyklus. Die ROM beträgt $0,72 \pm 0,2$ cm, die ROM_{\max} $1,04$ cm.

Hund 2

Hund 2 zeigt einen biphasischen Kurvenverlauf mit Maxima bei $37,17 \pm 2,6$ % und $86,17 \pm 2,9$ % des Schrittzyklus. Diese zeigen sich zu Beginn des letzten Drittels der Stemmphase des einen diagonalen Gliedmaßenpaares bzw. zu Beginn des letzten Drittels der Stemmphase des anderen diagonalen Gliedmaßenpaares. Es folgt ein Kurvenabfall, der die Zeit beinhaltet, in der die diagonalen Gliedmaßenpaare wechseln und das erste Drittel der folgenden Schrittphase anhält. Die Minima zeigen sich bei $11,0 \pm 2,3$ % und $64,33 \pm 4,6$ % des Schrittzyklus. Der Hund verändert die

Höhe seiner Kopf-Hals-Position während der Untersuchung geringgradig, weshalb sich die absoluten Werte zwischen den Schritten im Vergleich zu den anderen Hunden stärker unterscheiden. Die ROM beträgt $1,06 \pm 0,4$ cm, die ROM_{\max} 1,77 cm.

Hund 3

Hund 3 zeigt einen biphasischen Kurvenverlauf mit Maxima bei $29,33 \pm 3,8$ % und $77,4 \pm 3,7$ % des Schrittzklus. Diese zeigen sich zu Beginn der zweiten Hälfte der Stemphase des einen diagonalen Gliedmaßenpaares bzw. zu Beginn der zweiten Hälfte der Stemphase des anderen diagonalen Gliedmaßenpaares. Es folgt ein Kurvenabfall, der um den Zeitpunkt des Schrittphasenwechsels das jeweilige Minimum erreicht. Die Minima zeigen sich bei $2,83 \pm 0,8$ % und $51,2 \pm 5,3$ % des Schrittzklus. In Schritt 6 fehlen das zweite Maximum und Minimum, die Kurve zeigt einen stetigen Kurvenabfall, dessen Abstieg im Bereich des zweiten Maximums der anderen Schritte weniger stark ausgeprägt ist. Im Hochgeschwindigkeitsvideo senkt der Hund zum entsprechenden Zeitpunkt Kopf und Hals. Die ROM beträgt $0,64 \pm 0,3$ cm, die ROM_{\max} 1,28 cm.

Hund 4

Hund 4 zeigt einen biphasischen Kurvenverlauf mit gleichem Abhängigkeitsverhältnis zum Schrittzklus und zum Fußfallmuster wie Hund 2. Die Maxima zeigen sich bei $33,83 \pm 4,7$ % und $85,67 \pm 3,1$ % des Schrittzklus und die Minima bei $10,17 \pm 3,7$ % und $59,5 \pm 6,8$ % des Schrittzklus. Die ROM beträgt $0,70 \pm 0,4$ cm, die ROM_{\max} 1,61 cm.

Tabelle 20: Range of Motion der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Vertikale Translation C3/C3 - Trab		
	M±SD (cm)	Maximum (cm)
Hund 1	0,72±0,2	1,04
Hund 2	1,06±0,4	1,77
Hund 3	0,64±0,3	1,28
Hund 4	0,70±0,4	1,61
Gesamt	0,79±0,4	/

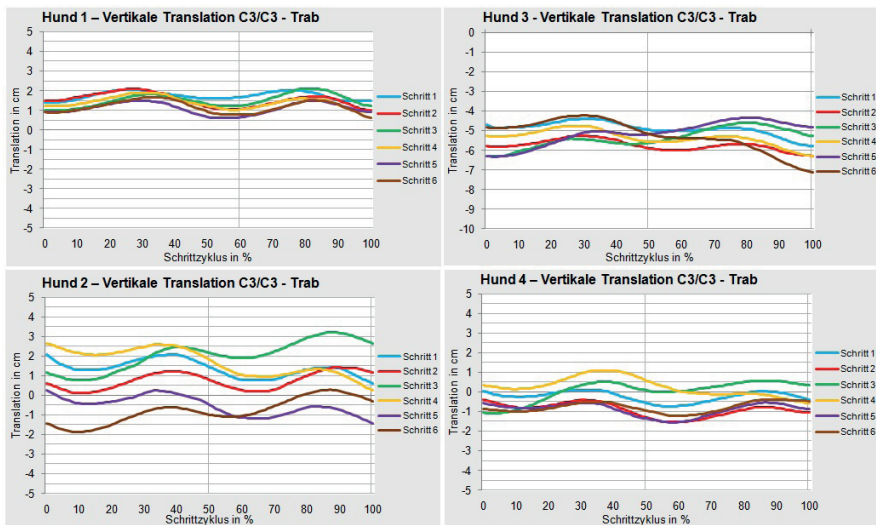


Abbildung 55: Diagramme der vertikalen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die vertikale Translation, die die Bewegungskurven widerspiegeln, korreliert mit einem im Vergleich zum Schritt vermehrten Auf- und Abwippen vom Rumpf im Trab. Ist im Hochgeschwindigkeitsvideo ein aktives Heben und Senken des Kopfes erkennbar, ist die Kurvenamplitude der vertikalen Translation geringer, oder es ist keine vertikale Translation im Diagramm erkennbar.

Der Zusammenhang zum Schrittzyklus, wo es zu einer Translation nach dorsal am Ende der Schrittphase und Translation nach ventral zu Beginn der Schrittphase kommt, konnte bei allen untersuchten Hunden beobachtet werden. Das Minimum korreliert mit dem Zeitpunkt, bei dem sich die Gliedmaßen in der Stemmphase möglichst senkrecht zum Körperstamm befinden. Der Zeitpunkt des Maximums zeigt sich in der zweiten Hälfte oder im letzten Drittel der Stemm-/Schwungphase.

9.3.1.3 Laterale Translation

Bei drei Hunden kann ein einheitliches Kurvenverhalten beobachtet werden, so zeigt sich in der ersten Hälfte des Schrittzyklus ein Kurvenanstieg mit Maximum und in der zweiten Hälfte ein Kurvenabfall mit Minimum. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,54 \pm 0,6$ cm.

Im Einzelnen stellt sich die laterale Translation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

In der ersten Hälfte des Schrittzyklus, in der Stemmphase der linken Hintergliedmaße und rechten Vordergliedmaße, zeigt sich der Kurvenanstieg mit dem Maximum bei $27 \pm 3,5$ % des Schrittzyklus. In der zweiten Hälfte, in der Stemmphase der rechten Hintergliedmaße und linken Vordergliedmaße, zeigt sich der Kurvenabfall mit dem Minimum bei $69,5 \pm 8,1$ % des Schrittzyklus. Die ROM beträgt $0,60 \pm 0,4$ cm, die ROM_{\max} $1,34$ cm.

Hund 2

Hund 2 zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf wie Hund 1. Das Maximum des Kurvenanstiegs in der ersten Hälfte des Schrittzklus zeigt sich bei $31,17 \pm 2,6$ %. Zu dem Zeitpunkt beginnt das letzte Drittel der gemeinsamen Stemmphase der linken Hintergliedmaße und rechten Vordergliedmaße. Das Minimum zeigt sich bei $76,33 \pm 3,98$ % des Schrittzklus. Zu dem Zeitpunkt beginnt die zweite Hälfte der gemeinsamen Stemmphase der rechten Hintergliedmaße und linken Vordergliedmaße. In Schritt 4 und Schritt 6 zeigen sich zusätzliche Kurvenveränderungen jeweils durch aktive Kopfbewegungen. Die ROM beträgt $0,42 \pm 0,4$ cm, die ROM_{\max} 1,40 cm.

Hund 3

Hund 3 zeigt kein einheitliches Kurvenmuster. Wie die absoluten Werte zeigen, läuft er bei Schritt 1-4 im Vergleich zu Schritt 5-6 weiter links auf dem Laufband. Auch aktive Kopfbewegungen sind vereinzelt im Hochgeschwindigkeitsvideo zu sehen. Die ROM beträgt $0,31 \pm 0,6$ cm, die ROM_{\max} 2,34 cm.

Hund 4

Hund 4 zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf wie Hund 1 und 2. Das Maximum des Kurvenanstiegs zeigt sich in der Mitte der Stemmphase der linken Hintergliedmaße und rechten Vordergliedmaße bei $24 \pm 3,7$ % des Schrittzklus. Das Minimum variiert mehr im Vergleich zu Hund 1 und 2 und befindet sich bei $69,8 \pm 10,6$ % des Schrittzklus. Der Hund zeigt Variationen hinsichtlich seiner Laufposition auf dem Laufband, am größten ausgeprägt von Schritt 2 zu Schritt 3. In Schritt 4 fehlt das zweite Minimum durch eine aktive Kopfbewegung nach links. Die ROM beträgt $1,07 \pm 0,9$ cm, die ROM_{\max} 2,74 cm.

Tabelle 21: Range of Motion der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Laterale Translation C3/C3 - Trab		
	M±SD (cm)	Maximum (cm)
Hund 1	0,60±0,4	1,34
Hund 2	0,42±0,4	1,40
Hund 3	0,31±0,6	2,34
Hund 4	1,07±0,9	2,74
Gesamt	0,54±0,6	/

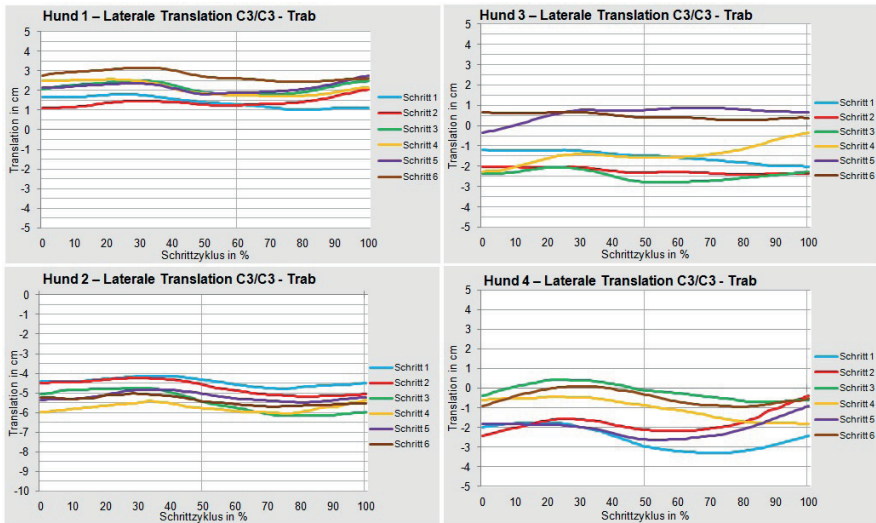


Abbildung 56: Diagramme der lateralen Translation des Gelenks C3/C3 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die Richtung der lateralen Translation ist mit den Vordergliedmaßen verknüpft. Während der Stemmphase mit Beteiligung der rechten Vordergliedmaße zeigt sich die laterale Translation nach rechts, und während der Stemmphase mit Beteiligung der linken Vordergliedmaße zeigt sich die Translation nach links. Bei aktiven Kopfbewegungen ist das Ausmaß der lateralen Translation geringer ausgeprägt oder gar nicht mehr zu beobachten.

9.3.1.4 Axiale Rotation

Das Kurvenmuster ist bei allen Hunden unterschiedlich, reproduzierbare Maxima und Minima sind nicht zu beobachten. Eine schrittzklusassoziierte Bewegung kann bei Hund 4 vorliegen, da sich die Kurvenrichtung in Bezug auf den Schrittzklus wiederholt. Die durchschnittliche ROM beträgt $2,27 \pm 2,5^\circ$.

Im Einzelnen stellt sich die axiale Rotation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1-3

Bei Hund 1, 2 und 3 sind größere Kurvenanstiege und –abfälle aktiven Kopfbewegungen zuzuordnen. Kurvenanstiege sind bei Kopfbewegungen nach links und Kurvenabfälle bei Kopfbewegungen nach rechts zu beobachten. Zu kleineren Kurvenveränderungen lässt sich im Hochgeschwindigkeitsvideo keine Bewegung zuordnen. Die ROM_{\max} der untersuchten Hunde betragen: $7,12^\circ$, $10,06^\circ$ und $11,22^\circ$.

Hund 4

Bei Hund 4 ist in der ersten Hälfte des Schrittzklus ein Kurvenanstieg erkennbar und in der zweiten ein Kurvenabfall. Die Amplitude ist in jedem Schritt unterschiedlich. Der Anstieg fehlt in Schritt 2, zu dem Zeitpunkt ist im Hochgeschwindigkeitsvideo eine kleine Kopfbewegung nach rechts zu beobachten. Kurvenanstieg und Kurvenabfall sind im ersten Schritt, bei dem der Hund keine aktive Kopfbewegung zeigt, am gleichmäßigsten ausgeprägt. Die ROM beträgt $3,04 \pm 3,6^\circ$, die ROM_{\max} $13,31^\circ$.

Tabelle 22: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Axiale Rotation C3/C3 - Trab		
	M±SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	2,23±1,6	7,12
Hund 2	1,94±2,1	10,06
Hund 3	1,88±2,4	11,22
Hund 4	3,04±3,6	13,31
Gesamt	2,27±2,5	/

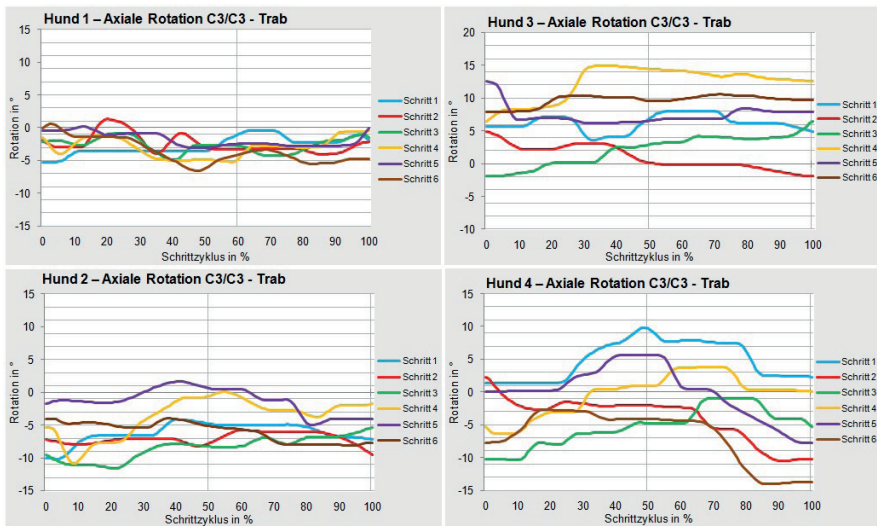


Abbildung 57: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die axialen Rotationsbewegungen, die während der Untersuchung zu beobachten sind, sind vor allem aktiven Kopfbewegungen zuzuordnen. Die Richtung der axialen Rotation erfolgt entgegengesetzt zur Kopfbewegung, wie es schon in der Schrittuntersuchung zu beobachten war.

Eine Korrelation zum Schrittzklus ist zum Teil bei Hund 4 erkennbar, die Richtung der axialen Rotation stimmt wie im Schritt mit der Seite der Vordergliedmaße überein, die sich in der Stemmphase befindet. Hund 4 zeigt im Gegensatz zu den anderen untersuchten Hunden ein breites Gangbild mit den Vordergliedmaßen.

9.3.1.5 Laterale Rotation

Wie schon bei der Untersuchung im Schritt ist auch bei der Untersuchung im Trab bei keinem Individuum ein einheitliches Kurvenverhalten zwischen den Schritten zu beobachten, und auch zwischen den Individuen nicht. Bei Bewegungskurven mit größeren Amplituden ist bei Betrachtung der zugehörigen Hochgeschwindigkeitsvideos eine Kopfdrehung nach links bzw. rechts zu sehen. Die durchschnittliche ROM beträgt $1,72 \pm 2,4^\circ$. Die ROM_{max} für die untersuchten Hunde sind $4,08^\circ$, $5,42^\circ$, $15,75^\circ$ und $11,92^\circ$.

Tabelle 23: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Laterale Rotation C3/C3 - Trab		
	M \pm SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,19 \pm 1	4,08
Hund 2	1,15 \pm 1,1	5,42
Hund 3	2,44 \pm 3,8	15,75
Hund 4	2,51 \pm 3	11,92
Gesamt	1,72 \pm 2,4	/

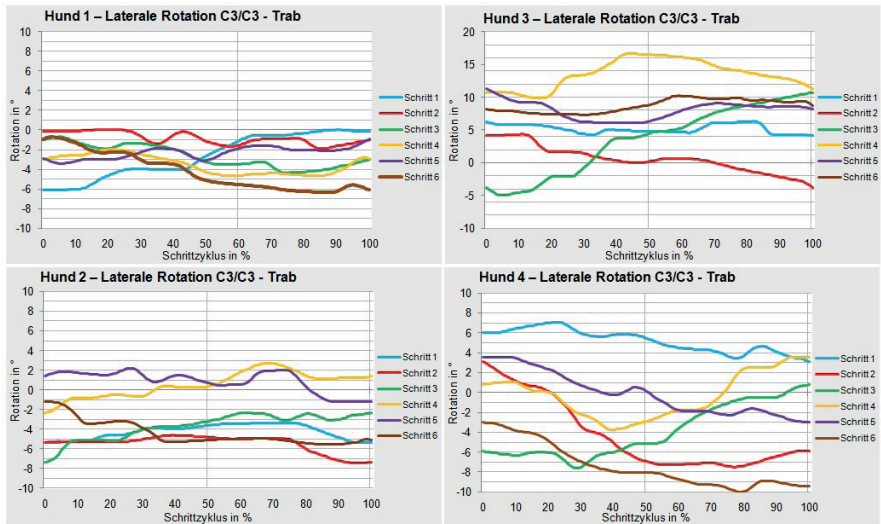


Abbildung 58: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

9.3.1.6 Sagittale Rotation

Bei Hund 1 und Hund 4 ist ein biphasisches Kurvenmuster mit zwei Maxima und zwei Minima nachvollziehbar. Bei Hund 2 und 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Die durchschnittliche ROM beträgt $2,78 \pm 2,8^\circ$.

Im Einzelnen stellt sich die sagittale Rotation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Hund 1 zeigt ein biphasisches Kurvenmuster, das mit der Stemm- und Schwungphase beider Vordergliedmaßen in Zusammenhang gebracht werden kann, wie auch schon im Schritt. Zum Ende der Schwungphase findet ein Kurvenanstieg und zu Beginn der Stemmphase ein Kurvenabfall statt. Die Amplitude ist bei der Schwungphase der rechten Vordergliedmaße insgesamt größer. Die Maxima zeigen sich bei $25,33 \pm 7,8\%$ und $75,5 \pm 2,7\%$ des Schrittzyklus. Die Minima zeigen sich bei

3,4±3,8 % und 53,6±4 % des Schrittzklus. Die ROM beträgt 3,5±2°, die ROM_{max} 7,22°.

Hund 2 und Hund 3

Bei Hund 2 und Hund 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Bei Kurvenveränderungen kann ein aktives Heben oder Senken des Kopfes im Hochgeschwindigkeitsvideo beobachtet werden. Die ROM_{max} betragen 7,38° und 6,78°.

Hund 4

Bei Hund 4 ist ein einheitlicher Kurvenverlauf in 4 Schrittzklen zu beobachten. Ein biphasisches Muster ist erkennbar, jedoch fehlen ein zweites Maximum und Minimum in zwei Schrittzklen, bei denen im Hochgeschwindigkeitsvideo jeweils ein aktives Heben bzw Senken des Kopfes zu beobachten ist. Die Maxima zeigen sich bei 30,33±6,4 % und 78,33±1,5 % des Schrittzklus. Die Minima zeigen sich bei 3,8±1,3 % und 47,17±3,5 % des Schrittzklus. Die ROM beträgt 5,13±3,7°. Die ROM_{max} beträgt 15,26°.

Tabelle 24: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzklen gemessen werden konnten.

Range of Motion - Sagittale Rotation C3/C3 - Trab		
	M±SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	3,50±2	7,22
Hund 2	1,23±1,6	7,38
Hund 3	2,35±2,1	6,78
Hund 4	5,13±3,7	15,26
Gesamt	2,78±2,8	/

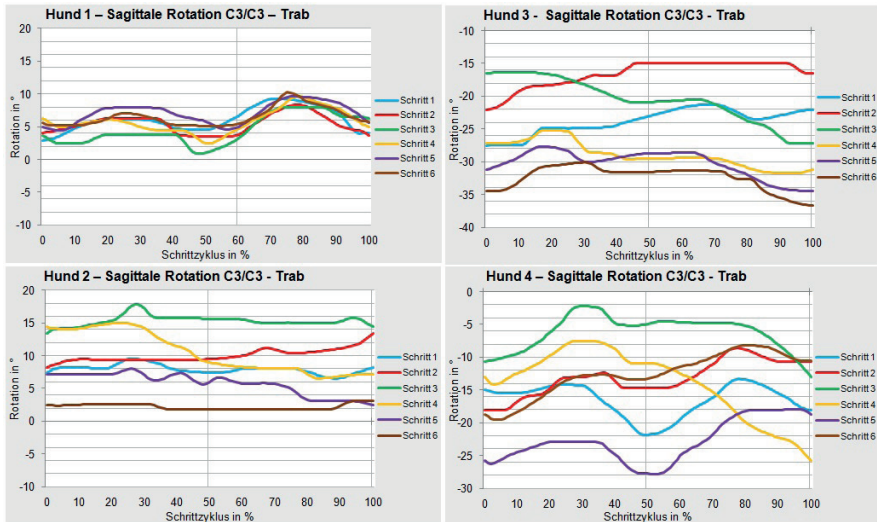


Abbildung 59: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C3/C3 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Im Rahmen der bereits beschriebenen vermehrten vertikalen Oszillation im Trab zeigt sich die sagittale Rotation, wenn sie sich zeigt, schrittzklusabhängig. Die sagittale Rotation steht im Zusammenhang mit den Schrittphasen der Vordergliedmaße. Am Ende der Schwungphase beider Vordergliedmaßen ist die sagittale Rotation nach oben und am Anfang der Stemmphase nach unten zu beobachten. Im Vergleich zu Hund 1 und Hund 4 halten Hund 2 und Hund 3 den Kopf stabiler. Findet ein aktives Heben oder Senken des Kopfes statt, eine Aktion die ebenfalls mit einer sagittalen Rotationsbewegung einhergeht, ist das schrittzklusabhängige Kurvenmuster nicht mehr erkennbar.

9.3.1.7 Korrelation der Translation- und Rotationsbewegungen von C3

Wie schon im Schritt zeigt sich auch im Trab eine Kopplung der gangzyklusabhängigen horizontalen und vertikalen Translation. Mit einer Translation nach kranial ist eine Translation nach dorsal, und mit einer Translation nach kaudal eine Translation nach ventral nachvollziehbar. Zum Teil sind sie geringgradig zeitversetzt, die Translation in vertikaler Richtung findet minimal vor der Translation in horizontaler Richtung statt. Bei Hund 3, der Schwierigkeiten hatte, seine Position auf dem Laufband zu halten, entkoppeln sich die beiden Translationsbewegungen.

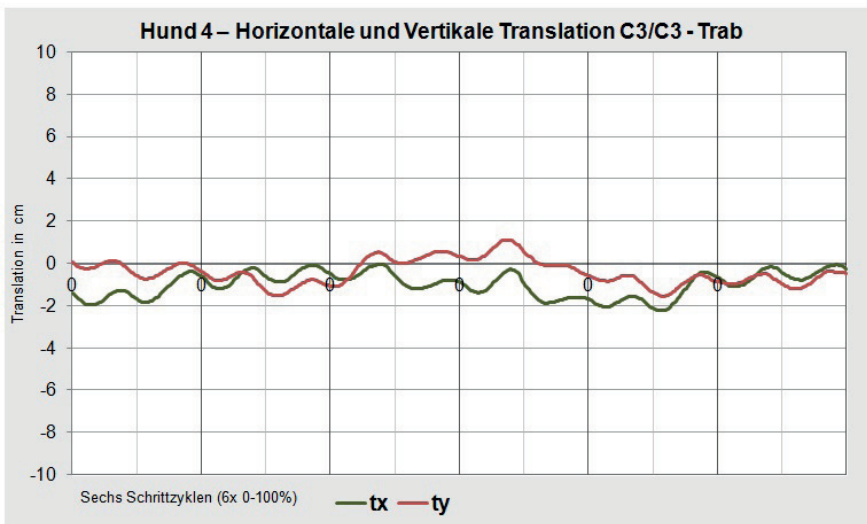


Abbildung 60: Diagramm der Korrelation zwischen horizontaler Translation (T_x) und vertikaler Translation (T_y) des Gelenks C3/C3 im Trab. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Translation in cm an.

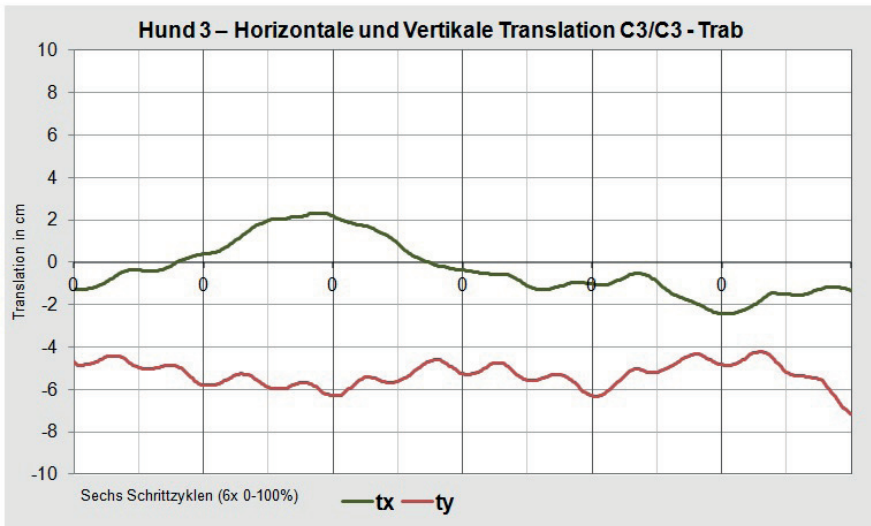


Abbildung 61: Diagramm der entkoppelten Korrelation zwischen horizontaler Translation (T_x) und vertikaler Translation (T_y) des Gelenks C3/C3 im Trab, aufgrund übermäßiger Positionsveränderungen auf dem Laufband. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Translation in cm an.

Die vertikale Translation zeigt außerdem eine Kopplung mit der sagittalen Rotation, wobei beide mit der Oszillation im Trab in Zusammenhang stehen. Eine Stabilisation des kraniozervikalen Überganges oder aktive Kopfbewegungen reduzieren bzw. verhindern die Kopplung im Rahmen der Oszillationsbewegung.

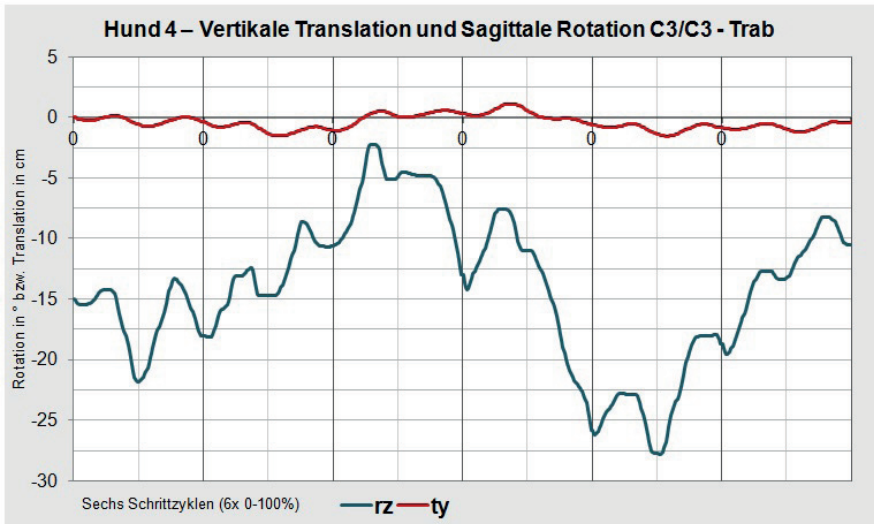


Abbildung 62: Diagramm der Korrelation zwischen vertikaler Translation (Ty) und sagittaler Rotation (Rz) des Gelenks C3/C3 im Trab. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Rotation in Grad (°) bzw. das Maß an Translation in cm an.

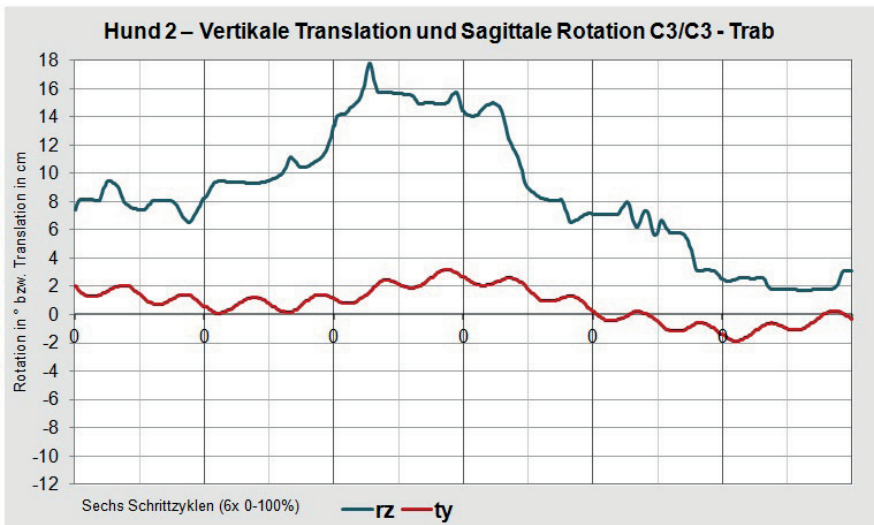


Abbildung 63: Diagramm der reduzierten Korrelation zwischen vertikaler Translation (Ty) und Sagittaler Rotation (Rz) des Gelenks C3/C3 im Trab, durch Stabilisation oder aktive Bewegungen des Kopfes. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Rotation in Grad (°) bzw. das Maß an Translation in cm an.

Auch die Kopplung der lateralen Translation mit der vertikalen Translation ist beim Trab erkennbar, wenn auch weniger ausgeprägt als im Schritt. So sind die maximale linkslaterale Translation und die maximale rechtslaterale Translation mit den Minima der vertikalen Translation verknüpft.

Eine gangzyklusassoziierte Kopplung der vertikalen und lateralen Translation mit der axialen Rotation im Sinne einer Drehkippbewegung ist aufgrund der Überlagerung mit aktiven Kopfbewegungen nur vereinzelt nachvollziehbar. Bei Hund 4, bei dem am ehesten eine schrittzyklusabhängige axiale Rotation zu beobachten ist, stimmt die Bewegungsrichtung der axialen Rotation mit der Bewegungsrichtung der lateralen Translation überein.

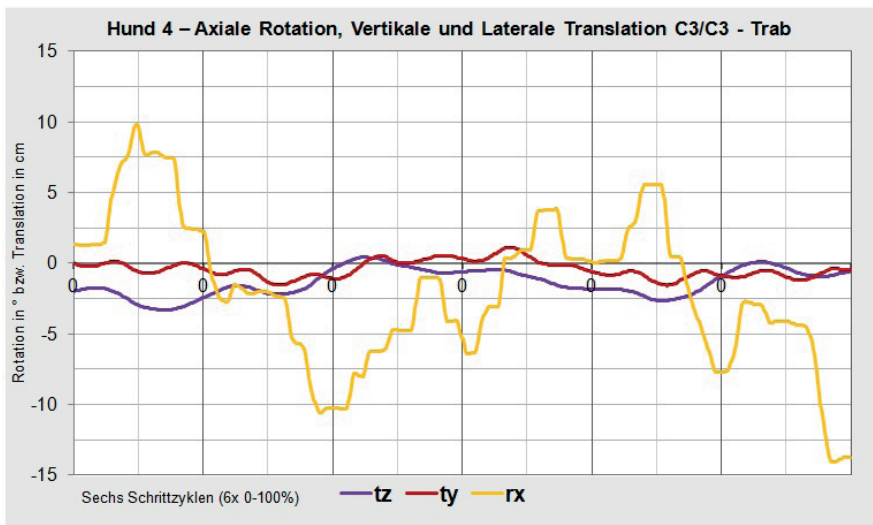


Abbildung 64: Diagramm der Korrelation zwischen vertikaler Translation (Ty), lateraler Translation (Tz) und axialer Rotation (Rx) des Gelenks C3/C3 im Trab. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Rotation in Grad (°) bzw. das Maß an Translation in cm an.

9.3.2 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C3/C2

Wie schon bei der Untersuchung im Schritt konnte auch im Trab keine Bewegung im virtuellen Gelenk zwischen C3/C2 festgestellt werden.

9.3.3 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C2/C1

Die Bewegungsdaten des virtuellen Gelenkes C2/C1 der Gelenkkette geben die Rotationsbewegungen des ersten Halswirbels in Relation zum zweiten Halswirbel wieder.

9.3.3.1 Sagittale Rotation

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Kurvenanstiege oder Kurvenabfälle sind in Relation zum Schrittzklus jeweils von kurzer Dauer. Bei Kurvenveränderungen sind im Hochgeschwindigkeitsvideo bei allen vier Hunden leichte bis größere Kopfbewegungen erkennbar, bei denen die Kopfposition im Zuge von Seitwärtsbewegungen, die mit Flexion oder Extension des Halses einhergehen, ihre Höhe verändert. Die durchschnittliche ROM beträgt $0,33 \pm 0,9^\circ$. Die ROM_{max} betragen für die untersuchten Hunde: $0,15^\circ$, $5,14^\circ$, $1,71^\circ$ und $2,11^\circ$.

Tabelle 25: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Sagittale Rotation C2/C1 - Trab		
	M±SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	0,02±0	0,15
Hund 2	0,75±1,8	5,14
Hund 3	0,44±0,5	1,71
Hund 4	0,18±0,4	2,11
Gesamt	0,33±0,9	/

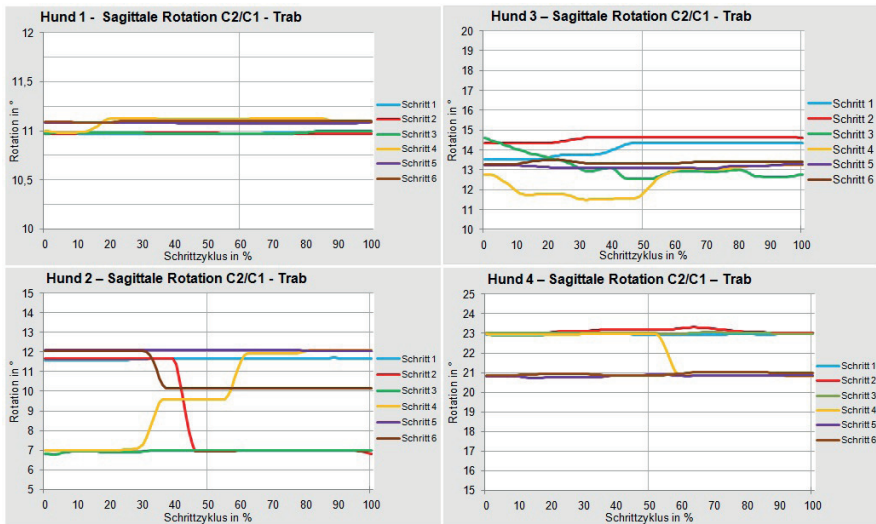


Abbildung 65: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Ein Zusammenhang besteht mit aktiven Kopfbewegungen, die mit Flexion oder Extension des Kopf-Hals-Überganges kombiniert sind. Dabei zeigt sich eine umgekehrte Rotationsrichtung des ersten Halswirbels im Vergleich zur Halsstellung. Mit der Flexion des Halses ist eine sagittale Rotation in positiver Richtung verknüpft und mit der Extension des Halses eine sagittale Rotation in negativer Richtung.

Nicht alle Kurvenveränderungen in den Diagrammen sind im Hochgeschwindigkeitsvideo klar als Flexions-/Extensionsbewegungen zu erkennen, die Kombination mit Lateralbewegungen erschwert deren Identifikation.

9.3.3.2 Axiale Rotation – Ry

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Die axiale Rotation ist mit einer Kopfbewegung nach links oder rechts korreliert. Die Atlasrotation verhält sich gegensätzlich zur Kopfbewegung, wie auch schon in der Untersuchung im Schritt beobachtet werden konnte. Kleinere Kurvenveränderungen können im Hochgeschwindigkeitsvideo nicht mit Bewegungen korreliert werden. Die durchschnittliche ROM beträgt $3,67 \pm 2,7^\circ$. Die ROM_{\max} betragen für die untersuchten Hunde: $4,72^\circ$, $7,38^\circ$, $14,41^\circ$ und $9,13^\circ$.

Tabelle 26: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Axiale Rotation C2/C1 - Trab		
	M\pmSD (°)	Maximum (°)
Hund 1	2,89\pm1,2	4,72
Hund 2	2,73\pm1,6	7,38
Hund 3	5,12\pm4,3	14,41
Hund 4	4,27\pm2,8	9,13
Gesamt	3,67\pm2,7	/

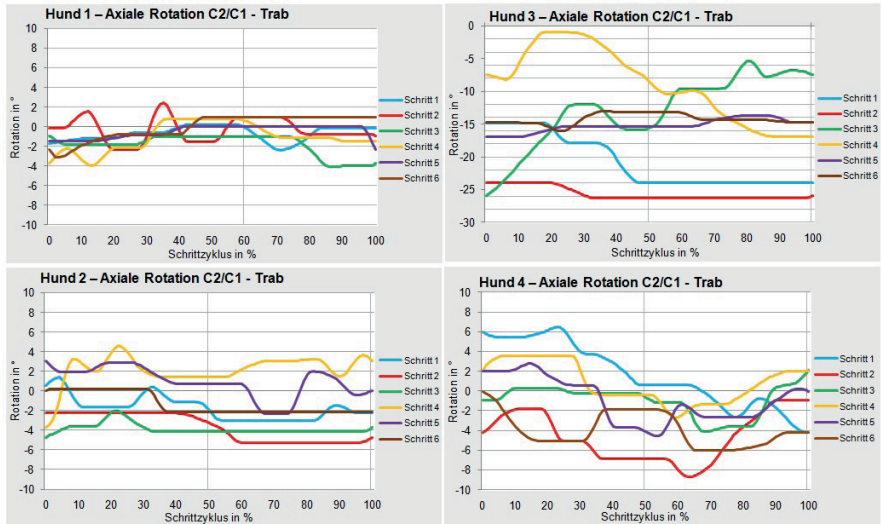


Abbildung 66: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

9.3.3.3 Laterale Rotation

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Wie schon im Schritt tritt die laterale Rotation im Hochgeschwindigkeitsvideo synchron zu einer Kopfbewegung zur rechten bzw. linken Seite auf. Die durchschnittliche ROM beträgt $1,68 \pm 62^\circ$. Die ROM_{\max} betragen für die untersuchten Hunde: $2,9^\circ$, $3,73^\circ$, $8,15^\circ$ und $4,73^\circ$.

Tabelle 27: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Laterale Rotation C2/C1 - Trab		
	M±SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	0,95±0,8	2,90
Hund 2	1,34±1,2	3,73
Hund 3	2,40±2,7	8,15
Hund 4	1,96±1,3	4,73
Gesamt	1,68±1,6	/

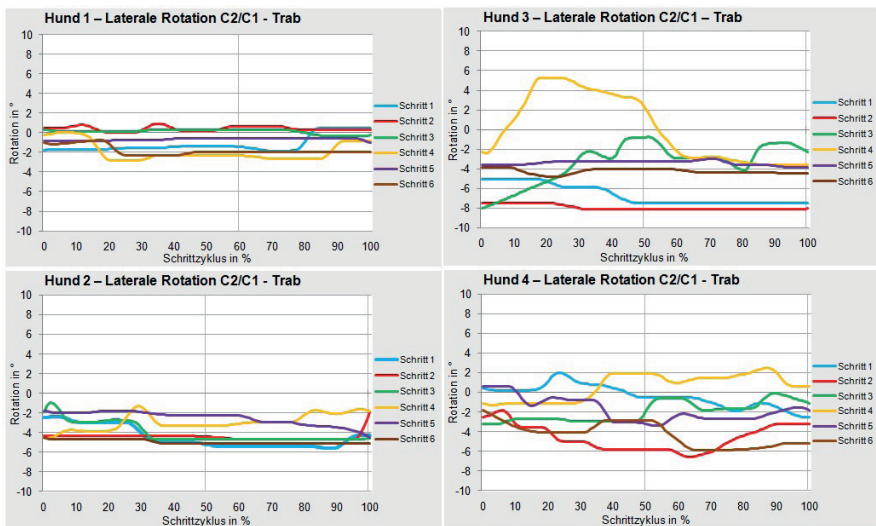


Abbildung 67: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die laterale Rotation vom Atlantoaxialgelenk erfolgt bei aktiven Bewegungen des Kopfes nach links bzw. rechts. Die Rotationsrichtung stimmt mit der Gesamtrichtung der Bewegung überein.

9.3.3.4 Korrelation der Rotationsbewegungen von C2/C1

Auch im Trab ist die Kopplung von axialer und lateraler Rotation des Atlantoaxialgelenkes zu beobachten. Unterschiedliche Rotationsrichtungen werden miteinander kombiniert, dabei ist der Bewegungsumfang der axialen Bewegung größer.

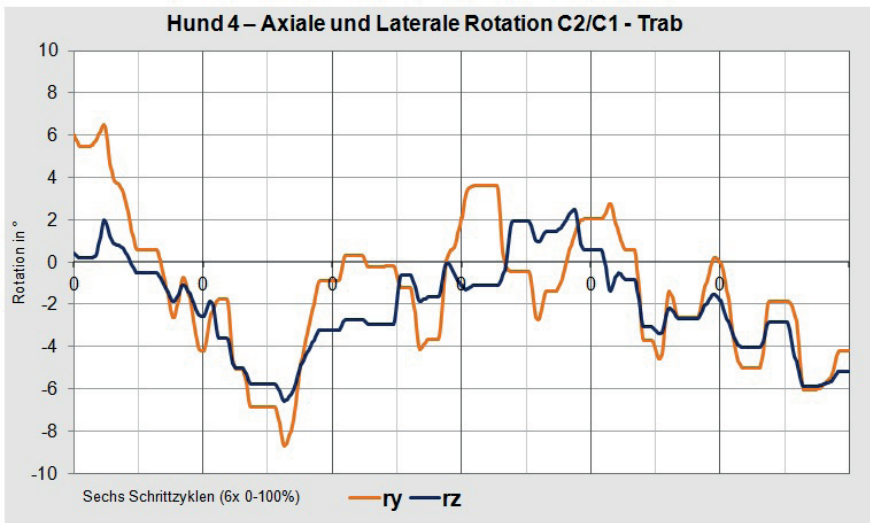


Abbildung 68: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (R_y) und lateraler Rotation (R_z) des Gelenks C3/C3 im Trab. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Rotation in Grad (°) an.

9.3.4 Datenanalyse vom virtuellen Gelenk C1/Schädel

Die Bewegungsdaten des virtuellen Gelenkes C1/Schädel der Gelenkkette geben die Rotationsbewegungen des Schädels in Relation zum ersten Halswirbel wieder.

9.3.4.1 Axiale Rotation

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Wie schon im Schritt entsprechen die Kurvenveränderungen aktiven Kopfbewegungen nach rechts und links. Bei Kurvenveränderungen von geringer Amplitude ist im Hochgeschwindigkeitsvideo keine eindeutige Bewegung zu identifizieren. Die durchschnittliche ROM beträgt $2,04 \pm 2,5^\circ$. Die ROM_{\max} betragen für die untersuchten Hunde: $5,76^\circ$, $6,79^\circ$, $17,96^\circ$ und $7,14^\circ$.

Tabelle 28: Range of Motion der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Axiale Rotation C1/Schädel - Trab		
	M \pm SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,7 \pm 1,6	5,76
Hund 2	1,38 \pm 1,4	6,79
Hund 3	4,08 \pm 4,3	17,96
Hund 4	1,77 \pm 1,8	7,14
Gesamt	2,04 \pm 2,5	/

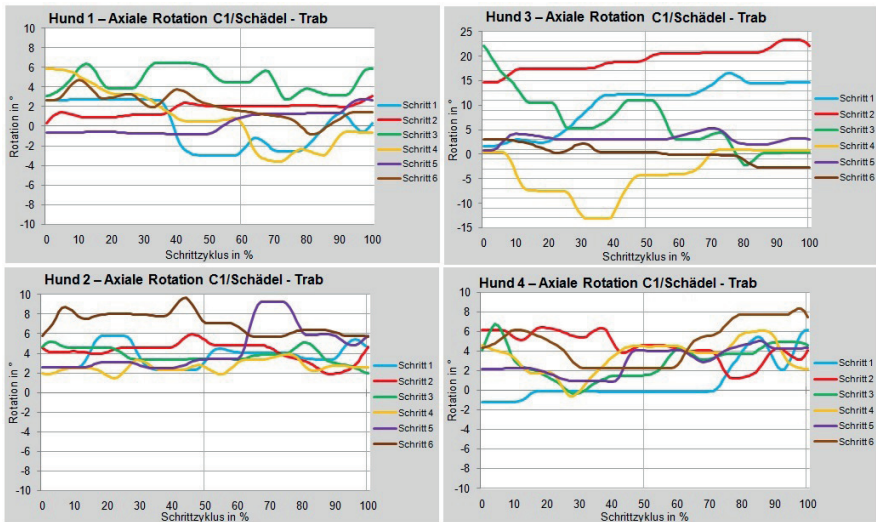


Abbildung 69: Diagramme der axialen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die axiale Rotation steht im Zusammenhang mit der Drehkipfbewegung des Kopfes bei aktiven Kopfbewegungen nach rechts und links. Die Rotationsrichtung stimmt mit der Bewegungsrichtung insgesamt überein.

9.3.4.2 Laterale Rotation

Ein einheitliches Kurvenmuster zwischen den Schritten und zwischen den Individuen ist nicht erkennbar. Bei Kurvenveränderungen sind aktive Kopfbewegungen nach rechts und links im Hochgeschwindigkeitsvideo zu beobachten. Das Ausmaß der Bewegung im Hochgeschwindigkeitsvideo und die Amplitude im Diagramm stimmen nicht immer überein. Bei Kurvenveränderungen mit kleinerer Amplitude ist im Hochgeschwindigkeitsvideo keine Bewegung wahrzunehmen. Die durchschnittliche

ROM beträgt $1,52 \pm 1,5^\circ$. Die ROM_{\max} betragen für die untersuchten Hunde: $4,37^\circ$, $3,08^\circ$, $13,97^\circ$ und $4,4^\circ$.

Tabelle 29: Range of Motion der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzyklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Laterale Rotation C1/Schädel - Trab		
	M \pm SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	1,6 \pm 1	4,37
Hund 2	0,98 \pm 0,8	3,08
Hund 3	2,07 \pm 2,7	13,97
Hund 4	1,64 \pm 1,1	4,4
Gesamt	1,52 \pm 1,5	/

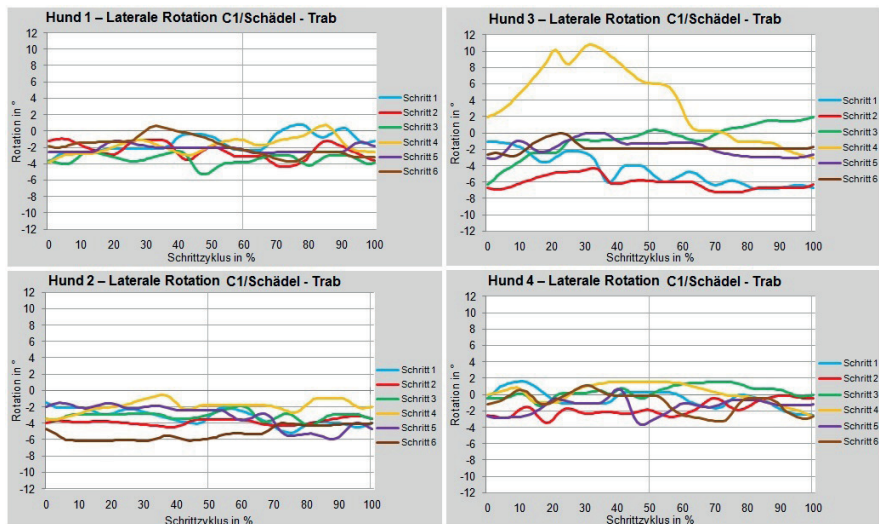


Abbildung 70: Diagramme der lateralen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Die laterale Rotation steht ebenfalls im Zusammenhang mit der Drehkippbewegung des Kopfes bei aktiven Kopfbewegungen nach rechts und links als Teil der Mischbewegung. Das Ausmaß der Drehkippbewegung ist eine Kombination aus lateraler und axialer Rotation. Die Rotationsrichtung stimmt mit der Gesamtrichtung überein.

9.3.4.3 Sagittale Rotation

Bei Hund 1 ist ein biphasisches Kurvenmuster erkennbar, das allerdings im Vergleich zu anderen Bewegungen mehr Varianz im zeitlichen Auftreten zeigt. Bei Hund 4 ist ein biphasisches Kurvenmuster bei drei Schritten nachvollziehbar. Diese stimmen mit den Schritten überein, bei denen auch bei der sagittalen Rotation von C3 ein biphasisches Kurvenmuster erkennbar ist. Bei Hund 2 und Hund 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Die Rotationsrichtung verhält sich umgekehrt zur Gesamtrichtung der Bewegung.

Die absoluten Werte sind, wie schon in der Schrittuntersuchung, alle im negativen Bereich, da die Referenzposition des Kopfes die der Lagerung in der Computertomographie entspricht. Im Stand und im Laufen ist der Kopf in Relation zur Referenzposition nach unten geneigt, d.h. in negativer sagittaler Rotation. Die durchschnittliche ROM beträgt $2,54 \pm 2,4^\circ$.

Im Einzelnen stellt sich die sagittale Rotation bei den untersuchten Hunden wie folgt dar:

Hund 1

Hund 1 zeigt ein biphasisches Kurvenmuster, das, wie schon im Schritt, mit der Stemm- und Schwungphase beider Vordergliedmaßen in Zusammenhang gebracht werden kann. Zum Ende der Schwungphase findet ein Kurvenanstieg statt, der auch noch den Auffußungszeitpunkt der Vordergliedmaße beinhaltet. Zu Beginn der Stemmphase, im ersten Drittel, findet der zugehörige Kurvenabfall statt. Die Maxima zeigen sich bei $44,6 \pm 2,7\%$ und $97,8 \pm 6,1\%$ des Schrittzklus. Die Minima zeigen

sich bei $21,5 \pm 8,5$ % und $78,33 \pm 6,3$ % des Schrittzklus. Die ROM beträgt $2,46 \pm 1,4^\circ$, die ROM_{\max} $5,25^\circ$.

Hund 2 und Hund 3

Bei Hund 2 und Hund 3 ist kein einheitlicher Kurvenverlauf erkennbar. Bei Kurvenveränderungen kann ein aktives Heben oder Senken des Kopfes im Hochgeschwindigkeitsvideo beobachtet werden. Die ROM_{\max} betragen $3,49^\circ$ und $10,86^\circ$.

Hund 4

Bei Hund 4 ist ein einheitlicher biphasischer Kurvenverlauf in drei Schrittzklen erkennbar. Das erste Maximum zeigt sich in etwa bei der Hälfte des Schrittzklus, das zweite zum Ende des Schrittzklus. Die Maxima zeigen sich bei $48,67 \pm 5,5$ % und $99,33 \pm 5,5$ % des Schrittzklus. Die Minima zeigen sich bei $29,33 \pm 4,5$ % und 77 ± 1 % des Schrittzklus. In den Kurven ohne biphasischen Verlauf zeigt der Hund aktive Kopfbewegungen. Die ROM beträgt $3,59 \pm 3,4^\circ$. Die ROM_{\max} beträgt $15,16^\circ$.

Tabelle 30: Range of Motion der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab. Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen sowie aller Hunde, des Weiteren die Maximalwerte der einzelnen Hunde, die während der 6 Schrittzklen gemessen werden konnten.

Range of Motion – Sagittale Rotation C1/Schädel - Trab		
	M \pm SD (°)	Maximum (°)
Hund 1	2,46 \pm 1,4	5,25
Hund 2	1,47 \pm 1	3,49
Hund 3	3,23 \pm 3,1	10,86
Hund 4	3,59 \pm 3,4	15,16
Gesamt	2,54 \pm 2,4	/

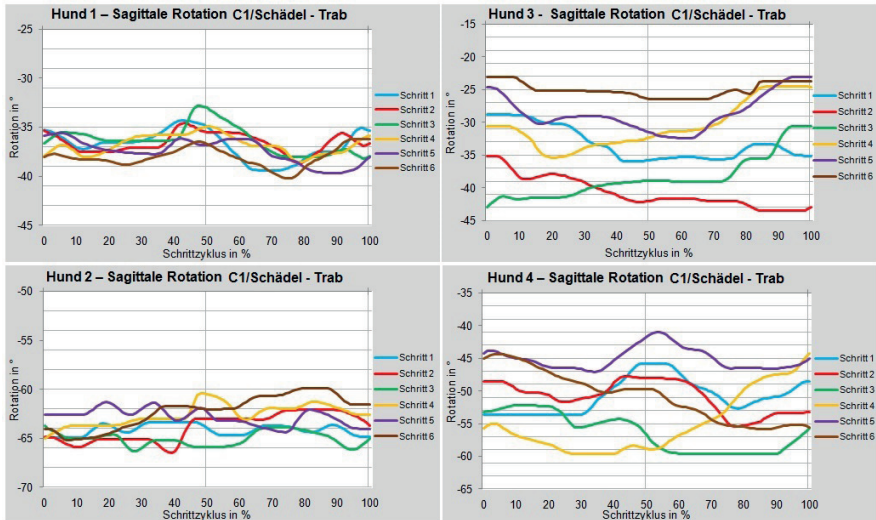


Abbildung 71: Diagramme der sagittalen Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab. Übersicht der Einzelschritte vergleichend. Die vertikale Hilfslinie zeigt den Duty-Faktor an, mit dem die Schrittnormierung durchgeführt wurde.

Zusammenhänge

Schrittzyklusabhängig zeigt sich die sagittale Rotation, wenn sie sich zeigt, im Rahmen der vertikalen Oszillation und steht im Zusammenhang mit den Schrittphasen der Vordergliedmaße. Hund 2 und Hund 3 halten den Kopf stabiler, die Oszillation überträgt sich nicht auf ihre Kopfposition.

Die schrittzyklusabhängige Rotation ist bei einem aktiven Heben oder Senken des Kopfes, einer Aktion die ebenfalls mit einer sagittalen Rotationsbewegung einhergeht, reduziert oder nicht mehr nachzuvollziehen. Die Rotationsrichtung verhält sich gegensätzlich zur Gesamtbewegung.

9.3.4.4 Korrelation der Rotationsbewegungen von C1/Schädel

Die sagittale Rotation kann einem schrittzyklusassoziierten Bewegungsmuster folgen, das mit der vertikalen Oszillation vom Trab verknüpft ist. Eine aktive Kopfbewegung überlagert diesen Zusammenhang. Wird der Kopf stabil gehalten, wird die Oszillationsübertragung reduziert oder verhindert.

Die axiale und laterale Rotation des Kopfes sind aneinander gekoppelt. Die Mischbewegung aus axialer und lateraler Rotation führen zu einer Drehkippbewegung in die gewünschte Richtung. Die axiale Rotation zeigt mehr Bewegungsumfang als die laterale Rotation.

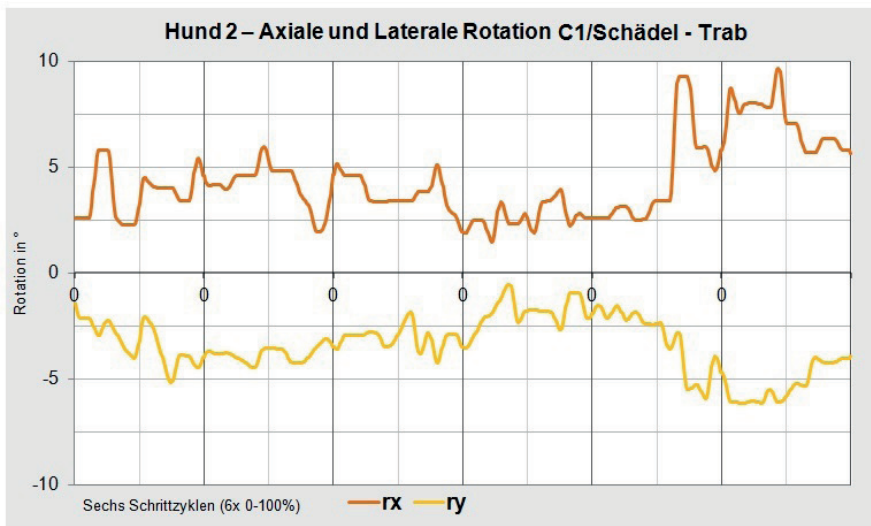


Abbildung 72: Diagramm der Korrelation zwischen axialer Rotation (Rx) und lateraler Rotation (Ry) des Gelenks C1/Schädel im Trab. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Rotation in Grad (°) an.

9.4 Korrelation der Bewegungsdaten

Zur Korrelation der Bewegungsdaten wurde die Spearman Korrelation mit Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten angewendet, um die Bewegungsrichtungen zwischen den Schritten und zwischen den Probanden im Schritt und im Trab zu vergleichen.

Der berechnete Rangkorrelationskoeffizient kann einen Wert zwischen -1 und 1 annehmen, wobei -1 einen perfekten negativen, also gegensätzlichen Zusammenhang aufzeigt, und 1 einen perfekten positiven Zusammenhang. Bei einem Wert von 0 besteht kein Zusammenhang zwischen den im Zuge der Rechnung verglichenen Variablen. Die Interpretation der dazwischen liegenden Wertbereiche, also ob eine sehr geringe/sehr schwache ($r=0-0,2$), geringe/schwache ($r=0,2-0,5/r=0,2-0,4$), mittlere ($r=0,5-0,7/r=0,4-0,6$), hohe/starke ($r=0,7-0,9/r=0,6-0,8$) oder sehr hohe/sehr starke ($r=0,9-0,99/r=0,8-0,99$) Korrelation vorliegt, unterscheidet sich geringfügig je nach hinzugezogener Literatur (Buehl and Zoefel 2002, Brosius 2011).

Interpretiert man die Wertbereiche nach Brosius (Brosius 2011), ergibt sich im Probandenvergleich für die Gelenkkette insgesamt eine sehr starke Korrelation bei der lateralen Translation. Die Korrelation der horizontalen und vertikalen Translation ist im Trab stark und im Schritt schwach bis mittel. Eine starke Korrelation weist ebenfalls die sagittale Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt auf. Eine mittlere Korrelation zeigen die laterale und sagittale Rotation der Gelenkkette im Schritt, die axiale Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt, die laterale Rotation des Gelenks C2/C1 im Trab, die sagittale Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt und laterale Rotation des Gelenks C1/Schädel im Trab. Die weiteren Rotationsbewegungen zeigen nur eine schwache oder sogar sehr schwache Korrelation.

Im Schrittvergleich ergibt sich eine sehr starke Korrelation bei der lateralen Translation im Schritt, im Trab weist sie jedoch einen mittleren Korrelationswert auf. Eine mittlere Korrelation zeigen die anderen Translationsbewegungen der Gelenkkette sowohl im Schritt als auch im Trab, genauso wie die sagittale Rotation der Gelenkkette. Die axiale und laterale Rotation der Gelenkkette und alle Rotationsbewegungen der Gelenke C2/C1 und C1/Schädel erreichen lediglich eine

sehr schwache bis schwache Korrelation.

Vergleicht man die Rotationsbewegungen, ergibt sich zwischen der sagittalen Rotation der Gelenke C3/C3 und C1/Schädel eine starke negative Korrelation im Schritt und sehr starke negative Korrelation im Trab. Eine starke negative Korrelation weisen auch die axiale und laterale Rotation des Gelenks C1/Schädel im Schritt auf. Eine mittlere negative Korrelation zeigen die laterale Rotation der Gelenke C3/C3 und C1/Schädel im Schritt. Eine mittlere Korrelation besteht im Schritt zwischen der lateralen Rotation des Gelenke C2/C1 und C1/Schädel, genauso wie zwischen der sagittalen Rotation dieser beiden Gelenke. Außerdem weisen auch die axiale und laterale Rotation des Gelenks C2/C1 eine mittlere Korrelation auf, die in Schritt und Trab nachzuvollziehen ist. Die weiteren Vergleiche der Rotationsbewegungen ergeben maximal als schwache Korrelation zu wertende Korrelationskoeffizienten.

Tabelle 31: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich der Probanden untereinander.

Gelenk	Bewegung	Schritt			Trab		
		x	y	z	x	y	z
C3/C3	Translation	0,46	0,25	0,87	0,61	0,74	0,83
	Rotation	0,12	0,40	0,59	0,26	0,08	0,37
C2/C1	Rotation	0,68	0,47	0,19	0,15	0,27	0,42
C1/Schädel	Rotation	0,20	0,04	0,42	0,15	0,52	0,14

Tabelle 32: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich der einzelnen Schritte der Probanden.

Gelenk	Bewegung	Schritt			Trab		
		x	y	z	x	y	z
C3/C3	Translation	0,44	0,43	0,83	0,44	0,51	0,53
	Rotation	0,31	0,24	0,48	0,27	0,21	0,43
C2/C1	Rotation	0,39	0,29	0,26	0,14	0,38	0,24
C1/Schädel	Rotation	0,25	0,18	0,36	0,14	0,17	0,37

Tabelle 33: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich der Rotationsbewegungen der Gelenke C3/C3, C2/C1 und C1/Schädel in x-,y- und z-Achse.

Korrelation	Bewegung	Schritt			Trab		
Achse		x	y	z	x	y	z
C3/C3 - C2/C1	Rotation	0,17	-0,38	0,23	0,03	-0,21	0,14
C3/C3 - C1/Schädel	Rotation	0,23	-0,45	-0,71	0,08	-0,28	-0,84
C2/C1 - C1/Schädel	Rotation	-0,04	0,30	-0,21	-0,32	0,28	-0,20

Tabelle 34: Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten bei Vergleich ausgewählter Rotationsbewegungen verschiedener Rotationsachsen, unterschiedlicher Gelenke oder von einem Gelenk.

Korrelation zwischen	Schritt	Trab
sagittale Rotation C2/C1 (Rx) – sagittale Rotation C1/Schädel (Rz)	0,47	-0,01
laterale Rotation C2/C1 (Rz) – laterale Rotation C1/Schädel (Ry)	0,43	0,25
axiale Rotation C2/C1 (Ry) – laterale Rotation C2/C1 (Rz)	0,51	0,51
axiale Rotation C1/Schädel (Rx) – laterale Rotation C1/Schädel (Ry)	-0,68	-0,32

9.5 Simi-Motion® Analyse

Aus den dreidimensionalen Koordinaten, die durch Tracking mittels Simi Motion® bei Hund 1 im Schritt ermittelt wurden, ergibt sich zwischen Kopf und C1 eine Strecke von $1,38 \pm 0,59$ cm, zwischen C1 und C2 eine Strecke von $0,59 \pm 0,07$ cm, zwischen C2 und C3 eine Strecke von $1,66 \pm 0,06$ cm, zwischen C3 und C4 eine Strecke von $1,35 \pm 0,01$ cm, zwischen C4 und C5 eine Strecke von $1,27 \pm 0,02$ cm, zwischen C5 und C6 eine Strecke von $1,21 \pm 0,04$ cm, zwischen C6 und C7 eine Strecke von $1,11 \pm 0,04$ cm und zwischen C7 und Th1 eine Strecke von $1,04 \pm 0,17$ cm.

9.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Eine Korrelation zum Schrittzklus zeigen all die Bewegungen, die mit der Gesamtbewegung während der Lokomotion in Zusammenhang stehen. Dies sind alle Translationsbewegungen der Gelenkkette im Raum sowie die axiale und sagittale Rotation der Gelenkkette. Die Translationsdaten spiegeln die Position des Hundes auf dem Laufband wider und werden durch übermäßige Positionsveränderungen während der Untersuchung beeinflusst. Die schrittzklusabhängige axiale und sagittale Rotation werden durch aktive Kopfbewegungen beeinflusst und überlagert. Die axiale Rotation zeigt sich im Vergleich zur sagittalen Rotation stärker beeinflusst. Die laterale Rotation zeigt keine Korrelation zum Schrittzklus.

Bei den übrigen Gelenken konnte nur für die sagittale Rotation des Atlantookzipitalgelenk ein Zusammenhang zum Schrittzklus beobachtet werden, der ebenfalls durch aktive Kopfbewegungen überlagert oder durch Stabilisation des Kopfes verhindert wird. Die sagittale Rotationsrichtung des Kopfes verhält sich entgegengesetzt zur sagittalen Rotationsrichtung des dritten Halswirbels.

Aktive Kopfbewegungen sind additive Bewegungen. Verschiedene Rotationsbewegungen, die durch mehrere Gelenke erzeugt werden, tragen zur Gesamtbewegung bei. Die axiale und die laterale Rotation sind dabei gekoppelt und können unterschiedlich miteinander kombiniert werden. Im Atlantoaxialgelenk können laterale und axiale Rotationsrichtung beliebig miteinander kombiniert werden, sie erfolgen jedoch stets gemeinsam. So erfolgen die Rotationsrichtungen zum Teil in gleicher und zum Teil in entgegengesetzter Richtung, um die gewünschte Gesamtbewegung zu erzielen. Im Atlantookzipitalgelenk sind axiale und laterale Rotation ebenfalls gekoppelt. Die Rotationsrichtung ist hier überwiegend dieselbe.

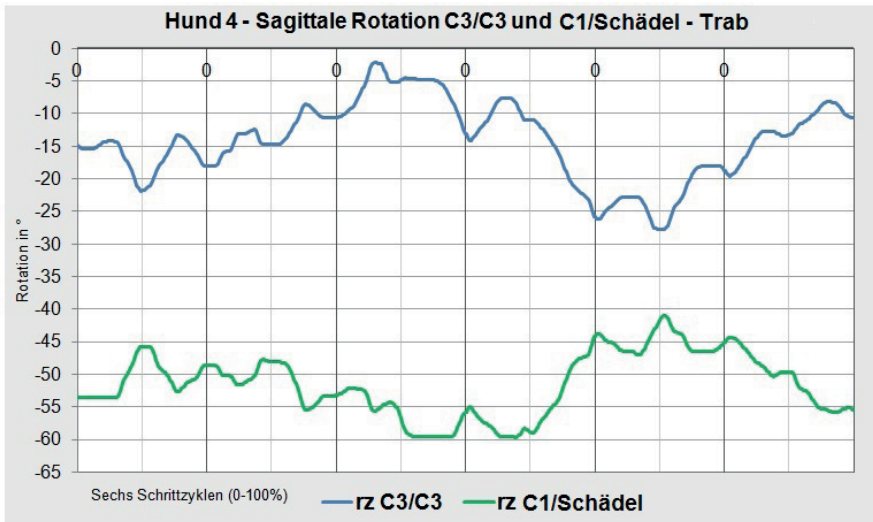


Abbildung 73: Diagramm der Korrelation zwischen sagittaler Rotation des Gelenks C3/C3 und des Gelenks C1/Schädel im Trab. Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß der Rotation in Grad (°) an.

Die Zusammenarbeit mehrerer Gelenke und Rotationsrichtungen bei aktiven Kopfbewegungen wird im Folgenden anhand eines Beispiels erläutert:

Beispiel Hund 3 Schritt 4

Hund 3 zeigt in Schritt 4 eine Kopfbewegung von einer neutralen Stellung nach links und wieder zurück. Während der Rückbewegung werden Kopf und Hals gesenkt.

In der Bewegung nach links werden folgende Rotationsbewegungen registriert: eine laterale Rotation vom dritten Halswirbel nach links kombiniert mit einer axialen Rotation nach rechts. Beim zweiten Halswirbel konnten keine messbaren Bewegungen festgestellt werden. Der erste Halswirbel zeigt eine laterale Rotation nach links und eine axiale Rotation nach rechts, wie schon der dritte Halswirbel. Der Kopf zeigt eine laterale und axiale Rotation nach links. Im Rahmen der Rückbewegung, bei der Kopf und Hals wahrnehmbar gesenkt werden, zeigt der dritte Halswirbel eine sagittale Rotation nach unten und der Kopf nach oben. Der erste und zweite Halswirbel zeigen in dieser Bewegung kaum bzw. keine sagittale Rotation.

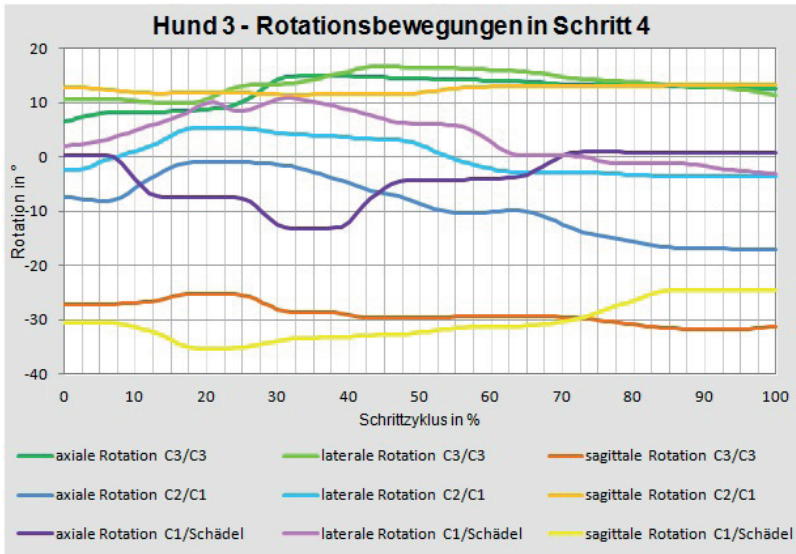


Abbildung 74: Rotationsbewegungen von Hund 3 während Schritt 4 im Trab. In diesem Schritt bewegt der Hund den Kopf von einer neutralen Stellung nach links und wieder zurück.

10 Diskussion

10.1 Auswahl des Scientific Rotoscoping als Messmethode

Das Scientific Rotoscoping wurde als kinematische Messmethode ausgewählt, weil dieses derzeit, trotz Einschränkungen, das genaueste nicht-invasive in vivo Messverfahren ist, um dreidimensionale Knochenbewegungen darzustellen (Kopp 2019). Außerdem wurde es, in Bezug auf die Wirbelsäule, bereits für die Untersuchung der Bewegung des Beckens und der Lendenwirbelsäule beim Beagle und beim Deutschen Schäferhund verwendet (Wachs 2015, Kopp 2019).

Nachteile des Verfahrens sind zum einen die umfassenden technischen Voraussetzungen und Anforderungen an Hardware und Software für die Anfertigung und Bearbeitung der Videos und Schnittbilddatensätze. Zum anderen ist der hohe zeitliche Aufwand der Bewegungsanimation herauszustellen, der notwendig ist, bis dreidimensionale Bewegungsdaten zur weiteren Analyse vorliegen. Die Genauigkeit des Verfahrens wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie der Einstellung der Röntgenanlage, der Röntgenvideoqualität, der Strahlengänge, des Probanden selbst, der zu untersuchenden Region und der Erfahrung und Genauigkeit des Untersuchers (Gatesy et al. 2010). Deshalb erfordert dies die Bestimmung der Messgenauigkeit für die eigens durchgeführte Untersuchung.

Die ermittelte eigene Messgenauigkeit in dieser Arbeit ergab einen Wert von $0,02 \pm 0,00$ cm für Translationsbewegungen und einen Wert von $1,37 \pm 0,5^\circ$ für Rotationsbewegungen. Dies entspricht in etwa der Messgenauigkeit, die bei der Untersuchung des Beckens und Lendenwirbelsäule beim Beagle bzw. beim Deutschen Schäferhund ermittelt wurde. Im Rahmen der eigenen Erfassung wurde die Messgenauigkeit von 2 Hunden verglichen, wobei bei einem Hund die Messungen am einen Tag durchgeführt wurden und beim anderen an verschiedenen Tagen. Dabei weist die Messgenauigkeit zwischen den Hunden einen größeren Unterschied auf als die Messungen beim selben Hund, was den Einfluss des Probanden selbst auf die Messgenauigkeit der Untersuchung verdeutlicht.

Durch die vielen Arbeitsschritte, die das Scientific Rotoscoping beinhaltet, ist die Messgenauigkeit kritisch zu betrachten. Die Messdaten entstehen letztendlich,

gestützt auf in vivo Untersuchungen, virtuell im dreidimensionalen Raum von Autodesk Maya®. Nahezu jeder Arbeitsschritt ist bis dahin mit verschiedenen Einschränkungen verbunden. Die Computertomographie, aus deren Datensätzen die Knochen der Gelenkkette manuell segmentiert werden, impliziert verfahrensbedingt Schichtdickenartefakte, die bei kleinen Hunden vermutlich einen größeren Einfluss haben als bei großen. Im Zuge der Konstruktion der Gelenkketten muss jeweils ein Rotationszentrum für die Intervertebralbewegungen definiert werden. Dieses jeweilige fixe Rotationszentrum steht im Konflikt mit der bei Bewegungen stattfindenden Positionsveränderung des „Instantaneous Center of Rotation“, oder aktuellen Rotationszentrums, das Translationsbewegungen berücksichtigt (Rizzi et al. 1977, Penning and Badoux 1987, König and Spetzger 2014). In biomechanischen Untersuchungen zu Drehmomenten am menschlichen Kiefergelenk z.B. stimmen die Ergebnisse unter Berücksichtigung des Instantaneous Center of Rotation des Gelenks besser mit bisherigen Erkenntnissen dieses Gelenks überein als unter Berücksichtigung einer fixen Rotationsachse (Grant 1973). Im Zuge der Fluoroskopie werden technisch bedingt die Transversalfortsätze vom zweiten und dritten Halswirbel überstrahlt. Die Anpassung der beiden Wirbel hinsichtlich ihrer axialen Orientierung im Rahmen der Bewegungsanimation wird so erschwert. Des Weiteren müssen die Knochen für die Animation in Maya herunter skaliert werden.

10.2 Probandenauswahl

Als Probanden für die Untersuchung dieser Arbeit wurden vier Chihuahuas ausgewählt. Diese Rasse gehört zu den Toy-Rassen und somit auch zu den prädisponierten Rassen für Erkrankungen des kraniozervikalen Übergangs (McCarthy et al. 1995, Beaver et al. 2000, Cerda-Gonzalez and Dewey 2010).

Die Bewegungsmessungen wurden in den Gangarten Schritt und Trab vorgenommen. Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes der Bewegungsanimation wurde nur eine geringe Probandenanzahl untersucht. Wenn man die Bewegungsanalyse jedoch statt in zwei Gangarten nur auf eine beschränkt, könnte eine höhere Probandenanzahl in eine Untersuchung mit eingeschlossen werden.

10.3 Gangbildanalyse und Einfluss des Laufbandes auf das Gangbild

Die Variation des Gangbildes ist stark körpergrößenabhängig, aber auch individuell. Kleine Hunde zeigen die größten Variationen in ihrem Gangbild (Hildebrand 1952, Hildebrand 1968, Nunamaker and Blauner 1985). Die individuelle Variation des Gangbildes konnte vor allem im Trab beobachtet werden. Die diagonale Stützbeinphase nimmt bei allen untersuchten Hunden zwar die meiste Zeit des Schrittzklus ein, dennoch erfolgt das Auf- und Abfußen der diagonalen Gliedmaßenpaare nicht gleichzeitig. Das Maß der zeitlichen Verzögerung im Fußfallmuster ist unterschiedlich ausgeprägt. Ein Unterschied in der Bodenkontaktzeit von Vorder- und Hintergliedmaße konnte bereits in anderen Studien beobachtet werden (Fanchon et al. 2006). Ein Duty-Faktor unter oder gleich 50 %, wie er für den Trab im Allgemeinen definiert wurde (Hildebrand 1966), liegt bei keinem der untersuchten Hunde vor. Symmetrische Gangarten wie Schritt und Trab stellen ein Kontinuum dar, es gibt einen passartigen Schritt und einen trabähnlichen Schritt (Fischer and Lilje 2011). Der 4-Takt-Trab zeigt ebenfalls keinen exakt synchronen Auffußungszeitpunkt der Gliedmaßenpaare (Hildebrand 1976, Nunamaker and Blauner 1985). So könnte man die beobachteten Gangbilder als trabähnlichen Schritt, Variation des 4-Takt-Trabes oder als langsamen Trab betrachten. Aufgrund der Vielfalt an Variationen ist die Definition einer Gangart nur über einen Parameter kritisch zu betrachten. Eine ganzheitliche Betrachtung unter Einbeziehung mehrerer Parameter, wie Schrittfrequenz, Schrittlänge und Geschwindigkeit, ist geeigneter, um Gangarten voneinander zu unterscheiden, der Duty-Faktor als einziges Kriterium ist verwirrend. Ein Duty-Faktor über 50% wurde bereits bei Pferden für langsame Trabgeschwindigkeiten beschrieben (Rubenson et al. 2004, Hoyt et al. 2006).

Die Variation des Gangbildes und die Variation der Bewegungen, die von den Probanden im Rahmen der Untersuchung gezeigt wurden, spiegeln auch die Ergebnisse der Spearman Korrelation wider. Im Gegensatz zum Schrittvergleich zeigen im Probandenvergleich mehr Bewegungsrichtungen einen zumindest als mittlere Korrelation zu interpretierenden Korrelationskoeffizienten. Mathematisch betrachtet korrelieren also die Probanden untereinander besser als ihre einzelnen Schritte. Eine sehr starke Korrelation zeigt nur die laterale Translation im

Probandenvergleich in Schritt und Trab, und im Schrittvergleich in der Gangart Schritt. Eine starke Korrelation zeigen außerdem im Probandenvergleich die vertikale und horizontale Translation der Gelenkkette im Trab, sowie die sagittale Rotation des Gelenks C2/C1 im Schritt. Beim Vergleich der Rotationsbewegungen konnte eine starke bis sehr starke negative Korrelation zwischen der sagittalen Rotation der Gelenkkette und des Gelenks C1/Schädel nachgewiesen werden, ein Zusammenhang, der bei aktiven Kopfbewegungen beobachtet wurde und auf den im Rahmen der Diskussion näher eingegangen wird, ebenso wie auf die negative Korrelation zwischen axialer und lateraler Rotation des Gelenks C1/Schädel, bei der ein starker Korrelationswert im Schritt erreicht wurde, ein Ausdruck gleicher Rotationsrichtung von axialer und lateraler Rotation im Atlantookzipitalgelenk im Gegensatz zur vorwiegend gegensätzlichen Bewegungsrichtung der axialen und lateralen Rotation im Atlantoaxialgelenk, die einen positiven mittleren Korrelationswert aufweisen.

Die Evaluation der Zusammenhänge über die Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten ist für die Lokalisation des kraniozervikalen Übergangs und dessen Bewegungen nur mäßig geeignet, da die meisten Bewegungsrichtungen durch aktive Kopfbewegungen bedingt sind und sich mehrere kleine gegensätzliche Bewegungsrichtungen im Zuge der Mittelwertberechnung entgegenstehen. Außerdem werden schrittzyklusabhängige Bewegungen, wie sich in der Einzelbetrachtung gezeigt hat, von aktiven Kopfbewegungen überlagert. Anzahl, Richtung und Ausmaß der Kopfbewegungen, die die Probanden auf dem Laufband zeigen, sind zufällig. Um aussagekräftige Korrelationswerte zu erhalten, müssten die Bewegungen zuverlässig bei den Probanden provoziert und reproduziert werden können. Dennoch konnte für einzelne Bewegungsrichtungen eine starke oder sehr starke Korrelation gezeigt werden.

Das Laufband und die individuelle Eingewöhnung daran beeinflussen ebenfalls das Gangbild. Ein weitgehend gleichmäßiges Gangbild auf einem Laufband zeigen Menschen, Pferde und Hunde nach einer Eingewöhnungsphase, deren Dauer je nach Studie und Studienpopulation variiert (Buchner et al. 1994, Owen et al. 2004, Clements et al. 2005, Fanchon et al. 2006). In der Anpassungsphase (accommodation phase) wird während der ersten Schritte ein zurückhaltendes oder gar ängstliches Verhalten gezeigt, in der die Probanden ihre Balance und optimale

Position finden müssen, bis eine Gewöhnung (habituation phase) eintritt (Buchner et al. 1994, Fanchon et al. 2006). Dieses Verhalten konnte auch bei den Probanden dieser Arbeit beobachtet werden. Jeder der Hunde bedurfte eines angepassten Trainings. Trotzdem unterscheiden sich die Schrittzyklen eines jeden Hundes in unterschiedlichem Ausmaß. Der größte Faktor, der Einfluss auf die Variabilität des Gangbildes hat, ist der Hund selbst (Fanchon et al. 2006).

Sowohl für Schritt als auch für Trab wurde die Geschwindigkeit des Laufbandes an den Patienten angepasst, so dass ein gleichmäßiges Gangbild zu beobachten war. Ein gleichmäßiger Schritt wurde bei einer Geschwindigkeit von $0,41 \pm 0,08$ m/s gezeigt, und ein gleichmäßiger Trab bei einer Geschwindigkeit von $0,77 \pm 0,12$ m/s. Diese unterscheiden sich zwar von den meisten bisher dokumentierten Geschwindigkeiten, allerdings wurden auch vor allem größere Rassen in Laufbandstudien untersucht (Owen et al. 2004, Clements et al. 2005, Fanchon and Grandjean 2009, Wachs 2015, Kopp 2019). Mit den dokumentierten Geschwindigkeiten der Chihuahuas, die im Rahmen der Jenaer Studie zur Fortbewegung von Hunden bereits untersucht wurden, ähneln sich die Geschwindigkeitswerte aber (Fischer and Lilje 2011). Die Auswahl der Komfortgeschwindigkeit ist für die Compliance der Probanden während der Laufbanduntersuchung wichtig. Außerdem kann eine festgesetzte Geschwindigkeit, die nicht der Komfortgeschwindigkeit der Probanden entspricht, zu einer größeren Variabilität zwischen den Schrittzyklen führen (Fanchon et al. 2006).

10.4 Dreidimensionale Bewegungen mit Schrittzklusabhängigkeit

Eine Korrelation zum Schrittzklus setzt die Beobachtung einer zum gleichen Zeitpunkt wiederkehrenden Bewegung mit gleicher Bewegungsrichtung in allen oder mehreren Schrittzyklen voraus. Das zeigen vor allem Bewegungen, die mit Positionsveränderungen während der Lokomotion in Zusammenhang stehen. In der vorliegenden Arbeit spiegeln die Bewegungen des virtuellen Gelenks C3/C3, als oberstes Gelenk der hierarchischen Gelenkkette, diese Positionsveränderungen wider.

Eine Korrelation von Translationsbewegungen und Rotationsbewegungen zum Schrittzklus konnte immer dann nachvollzogen werden, wenn keine größeren Positionsveränderungen auf dem Laufband durch den Probanden erfolgt sind und keine größeren aktiven Kopfbewegungen durchgeführt wurden. Lokomotionsbewegungen werden durch diese überlagert und sind dann nicht mehr nachzuweisen. Die Rotationsbewegungen sind dahingehend empfindlicher als die Translationsbewegungen, dass die Korrelationen bei weniger Probanden und/oder weniger Schrittzklen zu erkennen sind.

Die Werte der einzelnen Bewegungen sind kritisch zu sehen. Die Werte enthalten sowohl schrittzklusassoziierte als auch nicht schrittzklusassoziierte Bewegungen, da die Einzelwertbetrachtung dabei nahezu unmöglich ist. Lokomotion und aktive Kopfbewegungen treten aufgrund des Versuchsaufbaus gemeinsam auf. Dennoch ergibt sich ein Eindruck bezüglich der Größe der Range of Motion, die im Zuge der Fortbewegung auftritt. Es wurden aber auch zusätzlich Maximalwerte von den einzelnen Probanden erfasst, die während der Untersuchung aufgetreten sind, in der Regel aufgrund größerer Positionswechsel der Probanden auf dem Laufband oder aufgrund aktiver Kopfbewegungen hauptsächlich nach rechts und links.

Die horizontale Translation ist die Translation in kraniokaudaler Richtung und beträgt durchschnittlich im Schritt $0,4 \pm 0,4$ cm und im Trab $0,7 \pm 0,5$ cm. Der Maximalwert im Schritt beträgt 2,0 cm und im Trab 2,9 cm. Sowohl im Schritt als auch im Trab zeigt sich ein biphasisches Kurvenmuster. In beiden Gangarten erfolgt in der ersten Hälfte der Stemmphase der Hintergliedmaßen die Translation nach kaudal mit dem Minimum etwa bei der Hälfte der Stemmphase. Zum Ende der Stemmphase erfolgt die Translation nach kranial, der Zeitpunkt des Kurvenmaximums zeigt sich um den Abfußungszeitpunkt herum. Die messbare Translationsbewegung ist eine durch die Lokomotion übertragene Bewegung, die durch einen Vorschub im Rahmen der Stemmphase der Hintergliedmaßen bedingt ist, also mit beschleunigenden und bremsenden Kräften (Budsberg et al. 1987, Rumph et al. 1997, Fischer and Lilje 2011), und/oder die durch die mit der Lokomotion assoziierten Krümmung der Lendenwirbelsäule in Zusammenhang steht (Schilling and Carrier 2010). Horizontale Translationsbewegungen des Beckens wurden mit einem „Nach-vorne-drücken“ in der Stemmphase korreliert (Kopp 2019). Um herauszufinden, ob es sich bei der horizontalen Translation um eine Bewegung handelt, die aus der Halswirbelsäule

selbst kommt, wurde das zusätzliche dreidimensionale Verfahren Simi Motion® angewendet. Die Strecken im unteren Halswirbelsäulensegment C4-Th1 sind über den Untersuchungszeitraum konstant, die Bewegung geht demnach nicht aus der unteren Halswirbelsäule hervor. Die Werte des kraniozervikalen Übergangs zeigen größere Schwankungen im Vergleich zur unteren Halswirbelsäule. Eine horizontale Translationsbewegung mit Ursprung im kraniozervikalen Übergang selbst kann demnach nicht vollständig ausgeschlossen werden, die Streckenveränderung könnte allerdings auch rotationsbedingt sein. Um eventuell eine genauere Messung zu erhalten, könnten mehr Trackingpunkte gesetzt werden, wobei das Ergebnis möglicherweise unbeeinflusst bleibt. Der eigene Messfehler in diesem Verfahren ist unbekannt.

Die vertikale Translation ist die Translation in ventrodorsaler Richtung und beträgt durchschnittlich im Schritt $0,5 \pm 0,4$ cm und im Trab $0,8 \pm 0,4$ cm. Der Maximalwert im Schritt beträgt 1,9 cm und im Trab 1,8 cm. Sowohl im Schritt als auch im Trab kann ein biphasisches Kurvenmuster identifiziert werden, jedoch sind im Gegensatz zur horizontalen Translation bei der vertikalen Translation größere Unterschiede in Bezug auf das Fußfallmuster zu beobachten. Im Schritt zeigt sich das Kurvenmaximum im ersten Drittel der Stemmphase der Hintergliedmaßen, was mit dem Ende der Vorschwingphase der Vordergliedmaßen koinzidiert. Das Minimum zeigt sich im zweiten Drittel der Stemmphase der Hintergliedmaßen, was dem Anfang der Stemmphase der Vordergliedmaßen entspricht. Im Trab zeigt sich das Maximum jeweils in der zweiten Hälfte der Stemmphase der Hintergliedmaßen und das Minimum zu Beginn, im ersten Drittel.

Erfolgt das Maximum zum Ende der Stemmphase, ist ein Zusammenhang mit dem Impuls des Vortriebs, gekoppelt mit einer vertikalen Translation, im Rahmen der Fortbewegung wahrscheinlich. Dies ist im Trab nachzuvollziehen, der aufgrund seiner federnden Bewegung noch zusätzlich eine vermehrte vertikale Oszillation mit sich bringt. (Cavagna et al. 1977, Blickhan 1989). Maxima und Minima spiegeln demnach im Trab die federnde Bewegung wider. Im Schritt erfolgt die vertikale Translation nach dorsal, jedoch schon im ersten Drittel der Stemmphasen der Hintergliedmaßen, in dem kein Impuls zur Fortbewegung zu erwarten ist, da es erst bei einer beschleunigenden Kraft zu einem Antrieb kommen kann (Budsberg et al. 1987). Ein Zusammenhang mit der Protraktion der Vordergliedmaßen ist also naheliegender. Die vertikale Translation nach ventral ist mit der Gewichtsaufnahme

durch die Vordergliedmaßen erklärbar. Eine Kopplung von horizontaler und vertikaler Translation konnte im Schritt ebenfalls nachgewiesen werden, horizontale und vertikale Translation erfolgen überlappend hintereinander. Dies bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass die zugrundeliegende Aktion im Schrittzyklus die gleiche ist.

Die laterale Translation ist die Translation in lateralolateraler Richtung und beträgt durchschnittlich im Schritt $0,9 \pm 0,8$ cm und im Trab $0,5 \pm 0,6$ cm. Der Maximalwert im Schritt beträgt 3,8 cm und im Trab 2,7 cm. Ein schrittzyklusabhängiges Kurvenmuster ist, wenn nachweisbar, monophasisch. Sowohl im Schritt als auch im Trab zeigt sich jeweils eine maximale linkslaterale und eine maximale rechtslaterale Translation. In beiden Gangarten konnte eine Korrelation zur Stemmphase der Vordergliedmaßen beobachtet werden, in deren Anfangsphase das Maximum bzw. Minimum erreicht wird. Die Translationsrichtung entspricht der Seite, auf der die Vordergliedmaße die Stemmphase ausführt. Im Schritt ist die Translation größer als im Trab, da im Trab diese Translationsrichtung durch die diagonale Gliedmaßenaktion minimiert wird.

Die axiale Rotation der Gelenkkette ist die Rotation um die Horizontalachse und beträgt durchschnittlich im Schritt $2,3 \pm 3^\circ$ und im Trab $2,3 \pm 2,5^\circ$. Der Maximalwert im Schritt beträgt $20,5^\circ$ und im Trab $13,3^\circ$. Durch multiple Bewegungen, die ebenfalls eine axiale Rotation bedingen, wird die Identifikation einer schrittzyklusassoziierten Rotation erschwert. Dennoch ist bei zwei Hunden im Schritt eine Korrelation zwischen axialer Rotation und Schrittzyklus zu erkennen und im Trab bei einem Hund. Ein Zusammenhang besteht mit der Stemmphase der Vordergliedmaßen, Zeitpunkt und Richtung der axialen Rotation wiederholen sich zu deren Beginn. Im Trab besteht der gleiche Zusammenhang bei dem Hund, der ein eher breitbeiniges Gangbild zeigt. Im Rahmen des Schrittzyklus entsteht eine axiale Rotation vermutlich aufgrund einer Rollbewegung über den Rumpf, die im Zusammenhang mit der Aktion der Vordergliedmaßen steht und an der lateralen und vertikalen Translation beteiligt ist. Fortbewegungsassoziierte Rotationen um die Körperlängsachse sind bereits für das Becken und die Lendenwirbelsäule beschrieben (Jenkins and Camazine 1977, Layer 2012, Wachs 2015, Kopp 2019).

Für die laterale Rotation der Gelenkkette, d.h. die Rotation um die Vertikalachse, konnte weder im Schritt noch im Trab ein schrittzyklusabhängiges Kurvenmuster beobachtet werden. Entweder wird diese Rotationsbewegung so stark von anderen Faktoren beeinflusst, dass die Korrelation nicht nachweisbar ist, oder es gibt

tatsächlich keinen Zusammenhang. In den Studien der Lendenwirbelsäule beim Beagle und Deutschen Schäferhund ergab sich für die laterale Beckenrotation ein monophasisches Bewegungsmuster (Wachs 2015, Kopp 2019).

Die sagittale Rotation der Gelenkkette ist die Rotation um die Lateralachse und beträgt durchschnittlich im Schritt $3,1 \pm 3,2^\circ$ und im Trab $2,8 \pm 2,8^\circ$. Der Maximalwert im Schritt $11,8^\circ$ beträgt und im Trab $15,3^\circ$. Lässt sich ein schrittzyklusabhängiges Kurvenmuster nachweisen, ist dieses für die sagittale Rotation biphasisch und steht, sowohl im Schritt als auch im Trab, mit der Stemm- und Schwungphase der Vordergliedmaßen in Zusammenhang. Am Ende der Schwungphase beider Vordergliedmaßen erfolgt eine sagittale Rotation nach oben und am Anfang der Stemmphase nach unten. Eine Kopplung besteht zur vertikalen Translation, die mit der sagittalen Rotation gemeinsam auftritt. Das Ausmaß der sagittalen Rotation ist im Schritt größer als im Trab. In Untersuchungen hinsichtlich Bedeutung und Zusammenhang von Kopf- und Halsbewegungen mit dem Schrittzzyklus beim Pferd, insbesondere den Auf- und Abbewegungen, konnten energetische Vorteile festgestellt werden (Gellman and Bertram 2002, Loscher et al. 2016). Ausmaß und Zeitpunkt von Auf- und Abbewegungen von Kopf und Hals während der Lokomotion werden von Fortbewegungsgeschwindigkeit, Hals-Rumpf-Verhältnis und Schrittfrequenz beeinflusst. Im Zuge der Oszillation überträgt sich die Gewichtskraft auf die Vordergliedmaßen, was durch Phasenverschiebung von Hals-Kopf-Oszillation zu Rumpf-Oszillation den Energieverbrauch minimiert (Loscher et al. 2016). Diese Erkenntnisse unterstreichen den Zusammenhang zwischen Kopf-Hals-Bewegung und Vordergliedmaßenaktion im Zuge der Lokomotion.

Die bisher erwähnten Translations- und Rotationsbewegungen wurden durch die gesamte Gelenkkette ausgeübt. Von den weiteren untersuchten Gelenken, zwischen dem dritten und zweiten Halswirbel, zwischen dem zweiten und ersten Halswirbel und zwischen dem ersten Halswirbel und dem Kopf, konnte nur beim letzten, dem Atlantookzipitalgelenk, eine Korrelation zum Schrittzzyklus beobachtet werden. In diesem Gelenk zeigt die sagittale Rotation sowohl im Schritt als auch im Trab eine Abhängigkeit zum Schrittzzyklus. Es handelt sich um die Rotation des Atlantookzipitalgelenks um die Lateralachse und beträgt durchschnittlich im Schritt $1,9 \pm 2,1^\circ$ und im Trab $2,5 \pm 2,4^\circ$. Der Maximalwert im Schritt beträgt $14,6^\circ$ und im Trab $15,2^\circ$. Lässt sich ein schrittzyklusabhängiges Kurvenmuster nachweisen, ist dieses

für die sagittale Rotation biphasisch und steht, wie die sagittale Rotation der Gelenkkette, in Zusammenhang mit der Stemm- und Schwungphase der Vordergliedmaßen.

Die sagittale Rotationsrichtung des Kopfes verhält sich entgegengesetzt zur sagittalen Rotationsrichtung des dritten Halswirbels. Die gegensätzliche Bewegung ist vermutlich eine Ausgleichsbewegung, um den Blick während der Fortbewegung weiterhin nach vorne zu richten. Bei Anheben des Halses muss somit eine Ausgleichsbewegung des Kopfes nach unten erfolgen und umgekehrt. Das Phänomen der schrittzyklusabhängigen sagittalen Rotation des Atlantookzipitalgelenkes steht vermutlich im gleichen Zusammenhang zur Fortbewegung und Vordergliedmaßenaktion wie die sagittale Rotation der Gelenkkette, da beide Rotationen gekoppelt auftreten. Schon bei Studien hinsichtlich Kopfstabilisierung in Bewegung beim Menschen wurde eine Kopfrotation nach unten bei vertikaler Translation nach oben beschrieben (Pozzo et al. 1990). Die Zusammenwirkung und gegenseitige Beeinflussung von Kopfbewegungen mit optischen und vestibulären Mechanismen (Pozzo et al. 1990, Hirasaki et al. 1999, Dunbar et al. 2008) unterstreicht die Annahme, dass die unterschiedliche Rotationsrichtung der sagittalen Rotation von Gelenkkette und Atlantookzipitalgelenk eine Ausgleichsbewegung im Rahmen der Fortbewegung ist.

Insgesamt konnten also Zusammenhänge von Translationsbewegungen und Rotationsbewegungen der Gelenkkette sowie von sagittaler Rotation des Atlantookzipitalgelenkes mit der Lokomotion in den Gangarten Schritt und Trab aufgezeigt werden. Es wurde versucht, jede auftretende Bewegung mit zumindest einem Ereignis im Schrittzyklus zu korrelieren, dennoch ist ein Zusammenhang mit mehreren Aktionen während des Schrittzyklus denkbar. Aktive Kopfbewegungen beeinflussen jedoch das Ausmaß der schrittzyklusassoziierten Bewegungen und haben so die Interpretation erschwert. Die niedrige Probandenanzahl war diesbezüglich ebenso von Nachteil.

10.5 Dreidimensionale Bewegungen bei aktiven Kopfbewegungen

Aktive Kopfbewegungen erfolgen durch Bewegung des kraniozervikalen Übergangs bestehend aus Kopf, Atlas und Axis. Die im Rahmen der Fortbewegung gezeigten aktiven Kopfbewegungen der Probanden wurden im Rahmen der Bewegungsanimation mit erfasst. Durch die synchron aufgezeichneten Hochgeschwindigkeitsvideos können die auftretenden Intervertebralbewegungen mit den Gesamtbewegungen von Hals und Kopf korreliert werden. Studien zu intervertebral auftretenden Bewegungsrichtungen und dem Bewegungsausmaß der beteiligten Gelenke des kraniozervikalen Übergangs sind rar, sowohl beim Menschen als auch beim Tier und insbesondere beim Hund. Bisherige Untersuchungen, die die beobachteten Intervertebralbewegungen auch quantifizieren, stammen vor allem aus in vitro Untersuchungen mit Messungen an herausgelösten Wirbelsäulenabschnitten und/oder Röntgenuntersuchungen mit Aufnahmen in verschiedenen Positionen (Penning 1978, Goel et al. 1988, Panjabi et al. 1988, McLear and Saunders 2000, Panjabi et al. 2001, Forterre et al. 2015). Beim Menschen basieren dreidimensionale in vivo Studien auf computertomographischen oder magnetresonanztomographischen Aufnahmen in verschiedenen Positionen (Dvorak et al. 1987, Ishii et al. 2004, Zhao et al. 2013). Anhand in vitro Untersuchungen wurde außerdem die Stabilisationsfunktion einzelner Bänder des Bandapparates bei Bewegung des kraniozervikalen Übergangs untersucht, zum Teil mit und zum Teil ohne Angabe von Werten hinsichtlich des Bewegungsausmaßes (Dvorak et al. 1988, Reber et al. 2013, Riedinger et al. 2015). Die vorliegende Arbeit ist demnach die erste in vivo kinematische Bewegungsanalyse des kraniozervikalen Übergangs beim Hund.

Größere aktive Kopfbewegungen haben die Analyse hinsichtlich der Korrelation von Bewegungen zum Schrittzklus erschwert, da diese, wie auch Bewegungen während der Fortbewegung, zu einer Positionsänderung der Gelenkkette führen, d.h. mit einer Bewegung der unteren Halswirbelsäule kombiniert werden. Dies unterstreicht die Zusammenarbeit der unteren und oberen Halswirbelsäule, um Bewegungen auszuführen.

Sowohl im Atlantookzipital- als auch im Atlantoaxialgelenk konnten alle Rotationsrichtungen beobachtet und gemessen werden, also sagittale, axiale und

laterale Rotation. Die dominierende Rotationsrichtung ist bei Atlantookzipital- und Atlantoaxialgelenk unterschiedlich. Die axiale und laterale Rotation sind in beiden Gelenken stets aneinander gekoppelt, positiv und/oder negativ. Diese Kopplung ist beim Menschen bekannt (Goel et al. 1988, Panjabi et al. 1988), beim Hund für das Atlantookzipitalgelenk bisher jedoch nicht beschrieben.

Die im Folgenden erläuterten Rotationsrichtungen und Range of Motion sind Werte, die im Rahmen der Fortbewegung auf dem Laufband bei den Probanden gemessen werden konnten. Die gemessenen Werte dieser Arbeit entsprechen daher wahrscheinlich nicht denen größtmöglicher Kopfbewegungen, sondern sind geringer.

Im Atlantoaxialgelenk wurde in absteigender Reihenfolge durchschnittlich eine axiale Rotation im Schritt von $3,5 \pm 3,3^\circ$ und im Trab von $3,7 \pm 2,7^\circ$, eine laterale Rotation im Schritt von $1,7 \pm 1,9^\circ$ und im Trab von $1,7 \pm 1,6^\circ$, sowie eine sagittale Rotation im Schritt von $0,4 \pm 0,9$ und im Trab von $0,3 \pm 0,9$ gemessen. Maximalwerte, die im Zuge beider Untersuchungen gemessen werden konnten, sind $20,33^\circ$ axiale Rotation, $8,15^\circ$ laterale Rotation und $4,03^\circ$ sagittale Rotation. Die axiale Rotation ist demnach die größte aufgetretene Bewegung im Atlantoaxialgelenk. Die Rotation um die Längsachse charakterisiert dieses Gelenk und grenzt es von allen anderen Gelenken der Halswirbelsäule ab (Stalin et al. 2015). Die axiale Rotation ist mit einer lateralen Rotation gekoppelt, jedoch scheint es keine Richtungskopplung zu geben, d.h. die Rotationsrichtungen werden unterschiedlich miteinander kombiniert. Die axiale Rotation ist mit beiden lateralen Rotationsrichtungen aufgetreten, auch wenn die gegensätzliche Rotationsrichtung häufiger zu beobachten war. Axiale und laterale Rotation des Atlantoaxialgelenks sind in den Hochgeschwindigkeitsvideos Bewegungen des Kopfes nach rechts und links zuzuordnen. Bei einer Kopfbewegung nach rechts erfolgt eine axiale Rotation nach links und eine laterale Rotation nach rechts und umgekehrt. Zu einer sagittalen Rotation kommt es bei Flexion des Halses oder Extension des Halses, bei Flexion nach oben und bei Extension nach unten. Flexion und Extension zeigten die Probanden dieser Untersuchung jedoch nur in Kombination mit Seitwärtsbewegungen des Kopfes, eine Einzelbetrachtung von Extension und Flexion konnte daher nicht erfolgen. Zu berücksichtigen ist dennoch, dass die absoluten Werte der sagittalen Rotation alle im positiven Bereich liegen, mit dem größten Wert bei $23,3^\circ$. Die Stellung des Atlantoaxialgelenkes ist also in Relation zur Referenzposition, die der CT-Lagerung entspricht, bereits in positiver

sagittaler Rotation. Die Nullposition wurde für die Maximalwerterfassung nicht berücksichtigt, da die Arbeit nur die Messung des jeweiligen aktiven Bewegungsumfangs der auftretenden Rotationsbewegungen beinhaltet. Der Unterschied zwischen den Werten der durchschnittlich gemessenen Range of Motion, maximal gemessenen Range of Motion und den absoluten Werten der sagittalen Rotation verdeutlicht eine mögliche Diskrepanz zu Werten, zu denen es bei größtmöglichen aktiven Kopfbewegungen kommen könnte.

Im Atlantookzipitalgelenk ergab sich in absteigender Reihenfolge durchschnittlich eine axiale Rotation im Schritt von $2,2 \pm 2,4^\circ$ und im Trab von $2,0 \pm 2,5$, eine sagittale Rotation im Schritt von $1,9 \pm 2,1^\circ$ und im Trab von $2,5 \pm 2,5$, sowie eine laterale Rotation im Schritt von $1,4 \pm 1,1$ und im Trab von $1,5 \pm 1,5^\circ$. Maximalwerte, die im Zuge beider Untersuchungen gemessen werden konnten, sind $17,96^\circ$ axiale Rotation, $15,16^\circ$ sagittale Rotation und $13,97^\circ$ laterale Rotation. Die sagittale Rotation ist in der Fortbewegung also nicht die größte vom Atlantookzipitalgelenk ausgeführte Bewegung, sondern die axiale Rotation, auch wenn, bezieht man die absoluten Werte der Rotationsbewegungen wieder mit ein, die sagittale Rotation die größten im negativen Bereich liegenden Werte hat, da sich der Kopf im Vergleich zur CT-Lagerung in negativer sagittaler Rotationsstellung befindet. Der größte gemessene Wert im Vergleich zur Nullposition ist $-66,51^\circ$. Die sagittale Rotation ist also die Hauptrotationsbewegung des Atlantookzipitalgelenks (Penning and Badoux 1987, Goel et al. 1988, Panjabi et al. 1988, Wolfla 2006), sie spielt jedoch bei Fortbewegung in Schritt und Trab eine untergeordnete Rolle. Für die sagittale Rotation wurde eine Schrittzklusabhängigkeit beobachtet. Bei Fortbewegung ist jedoch die axiale Rotation die größte zu beobachtende Rotationsbewegung bei den untersuchten Hunden, da Seitwärtsbewegungen des Kopfes überwiegen. Mit diesen konnte in den Hochgeschwindigkeitsvideos die Rotation korreliert werden. Wie schon beim Atlantoaxialgelenk ist auch beim Atlantookzipitalgelenk eine Kopplung von axialer und lateraler Rotation aufgetreten, im Gegensatz zum Atlantoaxialgelenk aber eher richtungsgekoppelt. Bei einer axialen Rotation nach rechts kommt es zu einer lateralen Rotation rechts und umgekehrt. Über eine physiologische axiale Rotationsbewegung im Atlantookzipitalgelenk beim Hund gibt es bisher keine Publikationen, und sie ist als größte zu verzeichnende Rotationsbewegung während der Fortbewegung in Schritt und Trab ebenfalls nicht bekannt. Betrachtet man diese Bewegung am Knochenmodell, fällt auf, dass eine alleinige Rotationsbewegung nach

lateral oder axial aufgrund der Gelenkflächenkonformation der Foveae articulares craniales des Atlas, die mit den Condyli occipitales artikulieren, gar nicht auszuführen ist.

Für eine aktive Kopfbewegung arbeiten Atlantookzipitalgelenk und Atlantoaxialgelenk zusammen, an größeren Positionsveränderungen ist auch die untere Halswirbelsäule beteiligt. So erfolgt bei Flexion zunächst eine atlantookzipitale Rotation, die sich dann auf die dahinter liegenden Halswirbelsäulenabschnitte überträgt (Buonocore et al. 1966, Bogduk and Mercer 2000). Für die laterale Rotation bewegen sich Atlas und Axis in entgegengesetzter Richtung, sie tragen in etwa gleich viel zur Gesamtbewegung bei (Morgan et al. 1986, Penning and Badoux 1987, Goel et al. 1988). Das Zusammenwirken von Atlantookzipitalgelenk und Atlantoaxialgelenk sowie die Beteiligung der unteren Halswirbelsäule in Form von Positionsbewegungen der Gelenkkette konnten erstmals in aktiver Bewegung nachvollzogen werden. Gekoppelte Rotationen und Rotationsrichtungen wurden ebenfalls erfasst. Allerdings sind alle aktiven Kopfbewegungen, die gezeigt wurden, Mischbewegungen. Die Maximalwerte der Range of Motion, die bei aktiven Bewegungen in dieser Arbeit gemessen werden konnten, bleiben wegen der oben erwähnten nicht vorliegenden größtmöglichen Kopfbewegungen unter den Werten, die in der Literatur für die sagittale und laterale Rotation beschrieben sind.

Tabelle 35: Vergleich der Range of Motion vom Atlantookzipitalgelenk und Atlantoaxialgelenk aus der Literatur mit den Maximalwerten der Range of Motion, die im Rahmen dieser Arbeit gemessen wurden. Die Literaturwerte stammen aus den Arbeiten von Morgan et al. (1986), Penning and Badoux (1987) und McLearn and Saunders (2000).

Gelenk	Sagittale Rotation		Laterale Rotation		Axiale Rotation	
	Werte Literatur	ROM _{max} dieser Arbeit	Werte Literatur	ROM _{max} dieser Arbeit	Werte Literatur	ROM _{max} dieser Arbeit
Atlantoaxialgelenk	3-38°	4,03°	18,3-30°	8,15°	/	20,33°
Atlantookzipitalgelenk	60-98°	15,16°	13,5-30°	13,97°	/	17,96°

Im Gelenk zwischen dem zweiten und dritten Halswirbel konnte keine messbare Bewegung festgestellt werden, obwohl im Rahmen von Kadaverstudien dort Bewegungsdaten erhoben werden konnten (Johnson et al. 2011). Die Bewegungen in Fortbewegung und den dabei gezeigten aktiven Kopfbewegungen sind vermutlich zu klein, um Bewegungsdaten in diesem Gelenk zu erhalten. Im Rahmen von Kadaverstudien wirken unter Umständen aber auch Kräfte auf die Wirbelsäulensegmente, die in vivo dort nicht einwirken.

10.6 Tiermedizinische Relevanz und Ausblick für die Forschung

Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen zum Verständnis der Fortbewegung und der Kopfbewegung des Hundes bei. Die Studie liefert erstmalig dreidimensionale in vivo Bewegungsdaten des kaninen kraniozervikalen Übergangs mit Entschlüsselung von Bewegungsmustern und Bewegungsumfang von Bewegungen, die im Schritt und Trab aufgezeichnet wurden.

Korrelationen mit dem Schrittzzyklus zeigen Translations- und Rotationsbewegungen der Gelenkkette, außer der lateralen Rotation, und die sagittale Rotation des Atlantookzipitalgelenks. Der Zusammenhang wird durch aktive Kopfbewegungen reduziert oder gar verhindert. Von Relevanz sind diese Ergebnisse insbesondere deshalb, da Kopfbewegungen bei der Lahmheitsdiagnostik von Bedeutung sind und das Verständnis von physiologischen Zusammenhängen zum Verständnis pathologischer Vorgänge unerlässlich ist. Die Korrelation zur Stemm- und Schwungphase beider Vordergliedmaßen ist die am häufigsten beobachtete Korrelation. Eine abnorme Auf- und Abbewegung des Kopfes charakterisiert Lahmheiten der Vordergliedmaßen. Bei Lahmheit einer Vordergliedmaße wird der Kopf angehoben, wenn die betroffene Vordergliedmaße Bodenkontakt zeigt, und abgesenkt, wenn die gesunde Vordergliedmaße das Gewicht aufnimmt (Leach et al. 1977, Scott and Witte 2011). Bei den klinisch gesunden Hunden dieser Studie ist die Auf- und Abbewegung des Kopfes eine im Schrittzzyklus biphasisch zu beobachtende Bewegung. Bei beiden Vordergliedmaßen wird der Kopf am Ende der jeweiligen Schwungphase angehoben und am Anfang der jeweiligen Stemmphase abgesenkt. Eine Kombination aus kinetischen und kinematischen Aspekten würde die

Aussagekraft der Ganganalyse erhöhen. Die rein kinetische Untersuchung ist aber sicherlich auch bei größeren Rassen als den Chihuahuas von Bedeutung und könnte weitere Erkenntnisse liefern.

Die Bewegungsdaten der aktiven Kopfbewegungen, die im Rahmen der Fortbewegung durch die Probanden gezeigt wurden, entschlüsseln die den Bewegungen zu Grunde liegenden Bewegungsmuster von Atlantookzipital- und Atlantoaxialgelenk. So konnte eine axiale Rotation im Atlantookzipitalgelenk des Hundes erstmals dokumentiert und quantifiziert werden. Die Kopplung zwischen axialer und lateraler Rotation konnte nun für beide Gelenke des kraniozervikalen Übergangs auch in vivo beobachtet werden. Die im Zuge dieser Arbeit gemessenen Maximalwerte der Range of Motion der Gelenke sind Werte, die von aktiven Kopfbewegungen stammen, die während der Laufbanduntersuchung mit aufgezeichnet wurden. Dies sind vor allem Seitwärtsbewegungen, die mit einem geringen Maß an Flexion oder Extension kombiniert wurden. Die Werte sind als Anhaltspunkt zu betrachten, denn absolute Maximalwerte werden darüber liegen. Die Anwendung dieser Methode bei aktiven Kopfbewegungen ohne Lokomotion, möglichst mit vom Untersucher beeinflussten und standardisierten Bewegungsrichtungen, könnte weitere Erkenntnisse liefern. Da im Rahmen der Untersuchung jedoch Röntgenstrahlung zum Einsatz kommt und die Beeinflussung der Kopfbewegung, vor allem standardisiert, kaum möglich ist, würden weiterhin diverse Einschränkungen bestehen. Die größtmögliche Beweglichkeit ist mit diesem Versuchsaufbau nur schwer herbeizuführen.

Die bildgebende Diagnostik bei Anomalien des kraniozervikalen Übergangs kann durch diese Methode nicht revolutioniert werden. Zum einen ist die Methode zu aufwändig, um zum klinischen Einsatz zu kommen. Zum anderen gibt es noch keine dreidimensional verlässlichen, etablierten und gut durchführbaren Distanzmessungen beim Scientific Rotoscoping, deren Erkenntnisse zu Messmethoden, die zur Evaluation von atlantoaxialer Instabilität im Röntgen und in der Computertomographie (Takahashi et al. 2017, Cummings et al. 2018) oder zur Evaluation von atlantookzipitalem Overlapping in der Magnetresonanztomographie (Cerdeira-Gonzalez et al. 2016) publiziert wurden, beitragen könnten. Aufgrund der in der vorliegenden Arbeit beobachteten physiologischen Gelenkstellung ist jedoch bei

nicht gestreckter Haltung des kraniozervikalen Übergangs eine atlantookzipitale Überlappung in Lokomotion eher unwahrscheinlich.

Bei der Interpretation der Befunde sollte der iatrogene Einfluss im Zuge der Patientenlagerung auf die Stellung der Wirbelkörper mit einbezogen werden. Die abweichende Position sowohl des Atlantoaxialgelenks als auch des Atlantookzipitalgelenks in Lokomotion im Vergleich zur Lagerungsposition in der Computertomographie verdeutlicht, dass Rückschlüsse auf die Situation in vivo schwierig sein können. Bei Betrachtung von kraniozervikal angewendeten chirurgischen Fixationsmethoden, etabliert vor allem bei atlantoaxialer Instabilität, fällt auf, dass alle Methoden die Hauptrotationsbewegung, also die axiale Rotation, vollkommen verhindern. Diese spielt bei der reinen Lokomotion eine untergeordnete Rolle, ist aber essenziell für Seitwärtsbewegungen des Kopfes. Bei chirurgischer Fixation des Atlantoaxialgelenkes entspricht, lagerungsbedingt, die fixierte Position der Halswirbel zueinander in etwa der Position in der Computertomographie. Diese weicht, wie bereits erwähnt, jedoch von der in Lokomotion beobachteten physiologischen Stellung ab, in der der Atlas zum Axis in geringgradiger positiver sagittaler Rotation steht. Es sollte eine dynamische Stabilisationstechnik entwickelt werden, die alle physiologisch beobachteten Rotationsrichtungen, zumindest in geringem Ausmaß, erlaubt.

Insgesamt sollte bei Betrachtung von Intervertebralbewegungen ein Umdenken erfolgen. Im Zuge des Scientific Rotoscopings wird eine Gelenkkette konstruiert, und als solche sollte die Halswirbelsäule auch betrachtet werden. Die zentrale Frage, die es sich zu stellen gilt, ist: Wer rotiert um wen? Mit dieser Denkweise rückt eine aktive Rotation des Atlas um den Dens axis stärker in den Vordergrund. Die Atlasrotation ist demnach für die Positionsveränderung des Dens axis im Wirbelkanal verantwortlich und nicht der Axis selbst. Dies könnte die Sicht auf die Instabilität, insbesondere auf die atlantoaxiale Instabilität, verändern.

11 Zusammenfassung

Zur Biomechanik des kraniozervikalen Übergangs vom Hund ist wenig bekannt. Bisherige Erkenntnisse stützen sich auf Untersuchungen an anästhesierten Hunden oder auf Untersuchungen an herausgelösten Wirbelsäulenabschnitten. Erkrankungen des kraniozervikalen Übergangs, wie die atlantoaxiale Instabilität und das atlantookzipitale Overlapping, für die die Zwergassen prädisponiert sind, sind mit respektiven Positionsveränderungen der gelenkbildenden Knochen zueinander verbunden und gehen daher vermutlich mit einer pathologischen Beweglichkeit bezüglich Bewegungsmuster und/oder –ausmaß einher. Physiologische Bewegungsmuster des kraniozervikalen Übergangs und deren Größenordnung sind in vivo bisher jedoch nicht untersucht worden.

Ziel der Arbeit war eine dreidimensionale nicht invasive in vivo Bewegungsanalyse des kraniozervikalen Übergangs beim klinisch gesunden Chihuahua (n=4), mit Fokus sowohl auf schrittzklusassozierte Bewegungen in Schritt und Trab als auch auf aktive Kopfbewegungen, die während der Fortbewegung gezeigt wurden. Die kinematische Untersuchung erfolgte mittels „Scientific Rotoscoping“, eines markerlosen Verfahrens der XROMM-Methodik (X-Ray Reconstruction of Moving Morphology). Beim Scientific Rotoscoping werden durch multiple Arbeitsschritte Bewegungsdaten erzeugt. Zu diesem Zweck wird eine knöcherne Gelenkkette konstruiert, die der Knochensilhouette der Röntgenvideos entsprechend der Bewegung angepasst wird. Grundlage für die knöcherne Gelenkkette sind Daten aus der computertomographischen Untersuchung der Probanden, Grundlage für die Röntgenvideos die Aufzeichnung von Bewegungen mittels biplanarer Röntgenvideographie. Die Daten beider Untersuchungen unterliegen verschiedener Arbeitsprozesse vor der eigentlichen Animation, also der Anfertigung des Videos, in dem die virtuelle Knochenmarionette die Bewegungen aus dem Röntgenvideo ausführt. Aus diesen Bewegungen der Knochenmarionette gehen die dreidimensionalen Bewegungsdaten hervor.

In der vorliegenden Untersuchung waren die Translations- und Rotationsdaten der Gelenkkette, ausgenommen der lateralen Rotation, schrittzklusabhängig. Außerdem zeigte die sagittale Rotation des Atlantookzipitalgelenks einen Zusammenhang mit dem Schrittzklus. Ein Zusammenhang konnte zum einen mit allgemeinen

Positionsveränderungen während der Fortbewegung nachvollzogen werden, da eine biphasische horizontale Translation und monophasische laterale Translation der Gelenkkette beobachtet werden. Zum anderen besteht ein Zusammenhang zur Stemm- und Schwungphase der Vorderliedmaßen, die zu einer vertikalen Translation, einer sagittalen und axialen Rotation der Gelenkkette sowie zu einer sagittalen Rotation vom Atlantookzipitalgelenk führen, wenn keine aktiven Kopfbewegungen den Zusammenhang überlagern. Das Ausmaß der schrittzyklusabhängigen Bewegungen unterscheidet sich in Schritt und Trab. Die laterale Translation ist im Trab geringer als im Schritt (im Schritt $0,9 \pm 0,8$ cm und im Trab $0,5 \pm 0,6$ cm), während die horizontale und vertikale Translation im Trab größer ist (horizontale Translation im Schritt $0,4 \pm 0,4$ cm und im Trab $0,7 \pm 0,5$ cm, vertikale Translation im Schritt $0,5 \pm 0,4$ cm und im Trab $0,8 \pm 0,4$ cm). Die axiale Rotation der Gelenkkette ist in Schritt und Trab vergleichbar (im Schritt $2,3 \pm 3^\circ$ und im Trab $2,3 \pm 2,5^\circ$). Die sagittale Rotation der Gelenkkette ist im Trab geringer (im Schritt $3,1 \pm 3,2^\circ$ und im Trab $2,8 \pm 2,8^\circ$), die sagittale Rotation des Atlantookzipitalgelenkes im Trab größer (im Schritt $1,9 \pm 2,1^\circ$ und im Trab $2,5 \pm 2,4^\circ$).

Die Analyse der Bewegungsmuster und der Range of Motion der in Fortbewegung gezeigten Kopfbewegungen ergeben für den kraniozervikalen Übergang ein physiologisches Auftreten sagittaler, lateraler und axialer Rotation sowohl im Atlantookzipital- als auch im Atlantoaxialgelenk. Laterale und axiale Rotation treten bei Bewegungen gekoppelt auf. In Fortbewegung werden in den Gangarten Schritt und Trab hauptsächlich Seitwärtsbewegungen vom Kopf beobachtet, die mit geringen Flexions- und Extensionsbewegungen einhergehen, woraus sich die Größenverteilung der gemessenen Bewegungen ergibt. Die Seitwärtsbewegungen in Fortbewegung entsprechen vermutlich nicht den größtmöglichen Kopfbewegungen. Im Atlantookzipitalgelenk sind die größten gemessenen Range of Motion $17,96^\circ$ axiale Rotation, $15,16^\circ$ sagittale Rotation und $13,97^\circ$ laterale Rotation. Im Atlantoaxialgelenk sind die größten gemessenen Range of Motion $20,33^\circ$ axiale Rotation, $8,15^\circ$ laterale Rotation und $4,03^\circ$ sagittale Rotation

Bei einer Kopfbewegung nach rechts kommt es im Atlantoaxialgelenk zu einer axialen Rotation nach links und einer lateralen Rotation nach rechts. Im Atlantookzipitalgelenk kommt es bei dieser Kopfbewegung zu einer axialen und lateralen Rotation nach rechts. Dabei gilt stets die Betrachtung der Rotation des

vorderen Knochens um den dahinter liegenden. Die sagittale Rotation steht in Zusammenhang mit Extensions- und Flexionsbewegungen. Im Gelenk zwischen zweitem und drittem Halswirbel hat keine messbare Bewegung stattgefunden. Bei größeren Kopfbewegungen trägt die untere Halswirbelsäule (C3-C7) zur Gesamtbewegung bei.

Die Ergebnisse der Studie zeigen den Zusammenhang zwischen Kopf-Hals-Bewegung und Fortbewegung. Allgemeine zyklisch auftretende Positionsveränderungen in Schritt und Trab und die Aktion der Vordergliedmaßen beeinflussen die Kopf-Hals-Bewegung, wenn der kraniozervikale Übergang nicht aktiv bewegt wird. Außerdem konnte die axiale Rotationsbewegung im Atlantookzipitalgelenk nachgewiesen werden, eine Rotationsrichtung, die beim Hund atlantookzipital unbekannt war. Des Weiteren konnten physiologische in vivo auftretende Range of Motion im kraniozervikalen Übergang für die sagittale, laterale und axiale Rotation bestimmt werden.

Die vorliegende Arbeit liefert damit Erkenntnisse zur dreidimensionalen kraniozervikalen Bewegung in Fortbewegung und bei aktiven Kopfbewegungen beim Chihuahua. Sie schafft eine Grundlage für weitere Vergleichsstudien und liefert einen Beitrag zum besseren Verständnis von kraniozervikalen Erkrankungen und mit diesen assoziierter Instabilität.

12 Summary

Little is known about the biomechanics of the craniocervical junction of the dog. Previous findings are based on studies with anesthetized dogs or investigations on detached spinal sections. Craniocervical junction abnormalities, such as atlantoaxial instability and atlantooccipital overlapping, i.e. diseases the dwarf dog breeds are predisposed to, are associated with position changes of the joints among each other and are therefore likely to come along with pathological mobility. Physiological movement patterns of the craniocervical junction and their magnitude have, however, not yet been investigated *in vivo*.

The aim of this study was a three-dimensional non-invasive *in vivo* motion analysis of the craniocervical junction in clinically sound chihuahuas ($n = 4$), with focus on gait-cycle-related movements while walking and trotting, as well as active head movements during locomotion. The kinematic analysis was realized by means of "Scientific Rotoscoping", a markerless method of XROMM methodology (X-Ray Reconstruction of Moving Morphology). In Scientific Rotoscoping, movement data are produced in a step-by-step process. For this purpose, a bone marionette is constructed to be matched with the bony silhouette on X-ray videos, according to the movement observed. Basis for the bone marionette are data obtained from a computed tomographic examination of the subjects. The X-ray videos are based on recorded movements using biplanar X-ray videography. The data from both examinations undergo various work processes before animation begins, producing a video in which the virtual bone marionette performs the movements observed on the X-ray video. The three-dimensional motion data result from these movements of the bone marionette.

In the present study, translational and rotational data of the bone marionette were gait-cycle-dependent, except the lateral rotation. Furthermore, the sagittal rotation of the atlanto-occipital joint revealed a correlation to the gait cycle. On the one hand, general position changes could be stated during locomotion, since biphasic horizontal translation and monophasic lateral translation of the bone marionette were observed. On the other hand, a correlation to the stem and swing phase of the forelimbs was found, if no active head movements superimposed this phenomenon, leading to a vertical translation, sagittal and axial rotation of the bone marionette and

to a sagittal rotation of the atlantooccipital joint. The extent of the observed gait-cycle-dependent movements differ at walk and trot. The lateral translation is smaller trotting than walking (at walk $0,9\pm0,8$ cm and at trot $0,5\pm0,6$ cm), the horizontal and vertical translation is larger at trot (at walk $0,4\pm0,4$ cm and at trot $0,7\pm0,5$ cm horizontal translation; at walk $0,5\pm0,4$ cm and at trot $0,8\pm0,4$ cm vertical translation). The axial rotation of the bone marionette is similar at walk and trot (at walk $2,3\pm3^\circ$ and at trot $2,3\pm2,5^\circ$). The sagittal rotation of the bone marionette is smaller at trot (at walk $3,1\pm3,2^\circ$ and at trot $2,8\pm2,8^\circ$), the sagittal rotation of the atlantooccipital joint is larger (at walk $1,9\pm2,1^\circ$ and at trot $2,5\pm2,4^\circ$).

The analysis of the movement patterns and the range of motion of head movements performed in locomotion revealed a physiological presence of sagittal, lateral and axial rotation in both joints of the craniocervical junction, the atlantooccipital and atlantoaxial joint. When moving, lateral and axial rotation occur as a coupled motion pattern. In locomotion, at walk and trot, lateral movements of the head are the predominant movements observed, accompanied by small flexion and extension, which adds up to the size distribution of the measured motion patterns. The side movements in locomotion presumably do not correspond to the maximal possible head movements. In the atlantooccipital joint, the largest measured range of motion are $17,96^\circ$ axial rotation, $15,16^\circ$ sagittal rotation, and $13,97^\circ$ lateral rotation. In the atlantoaxial joint, the largest measured range of motion are $20,33^\circ$ axial rotation, $8,15^\circ$ lateral rotation and $4,03^\circ$ sagittal rotation.

When moving the head to the right, axial rotation to the left and lateral rotation to the right occur in the atlantoaxial joint and axial and lateral rotation to the right occur in the atlantooccipital joint, taking into consideration that the front bone rotates around the bone behind it. The sagittal rotation is related to extension and flexion movements. There was no measurable movement in the joint between the second and third cervical vertebrae. When larger head movements are executed, the lower cervical spine contributes to the overall movement.

The results of this study demonstrate the correlation between head-neck movement and locomotion. General cyclical position changes at walk and trot as well as movements of the forelimbs have an effect on the head-neck movement in locomotion, when the craniocervical junction is not actively moved. In addition, the axial rotational movement at the atlantooccipital joint could be found, a direction of

rotation in this joint in dogs which has been unknown by now. Furthermore, physiological range of motion of sagittal, lateral and axial rotation in the craniocervical junction occurring in vivo could be determined.

The present work gives insights into three dimensional kinematics of the craniocervical junction in locomotion and in active head movements of the Chihuahua. It provides a basis for further comparative studies and contributes to a better understanding of craniocervical diseases and the associated instability.

13 Anhang

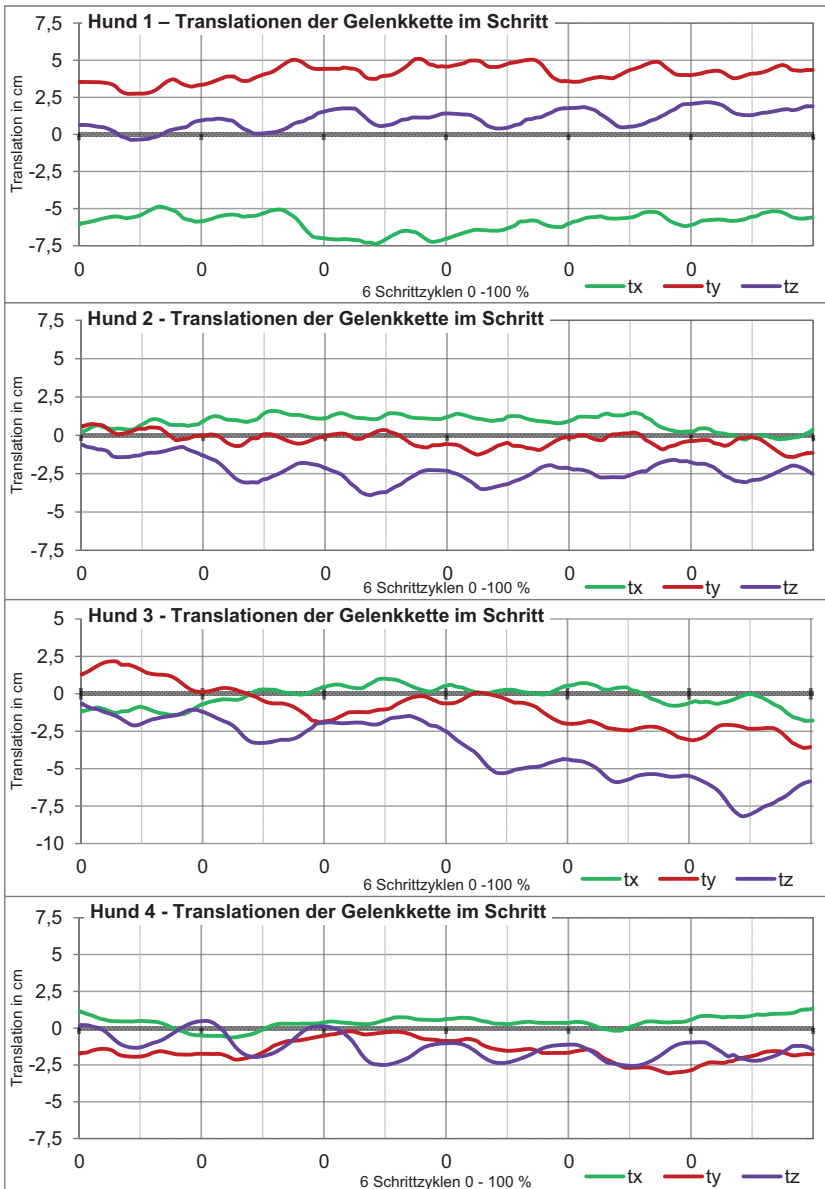


Abbildung 75: Diagramm der Translationsbewegungen der Gelenkkette im Schritt (horizontale Translation – Tx, vertikale Translation – Ty, laterale Translation – Tz). Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Translation in cm an.

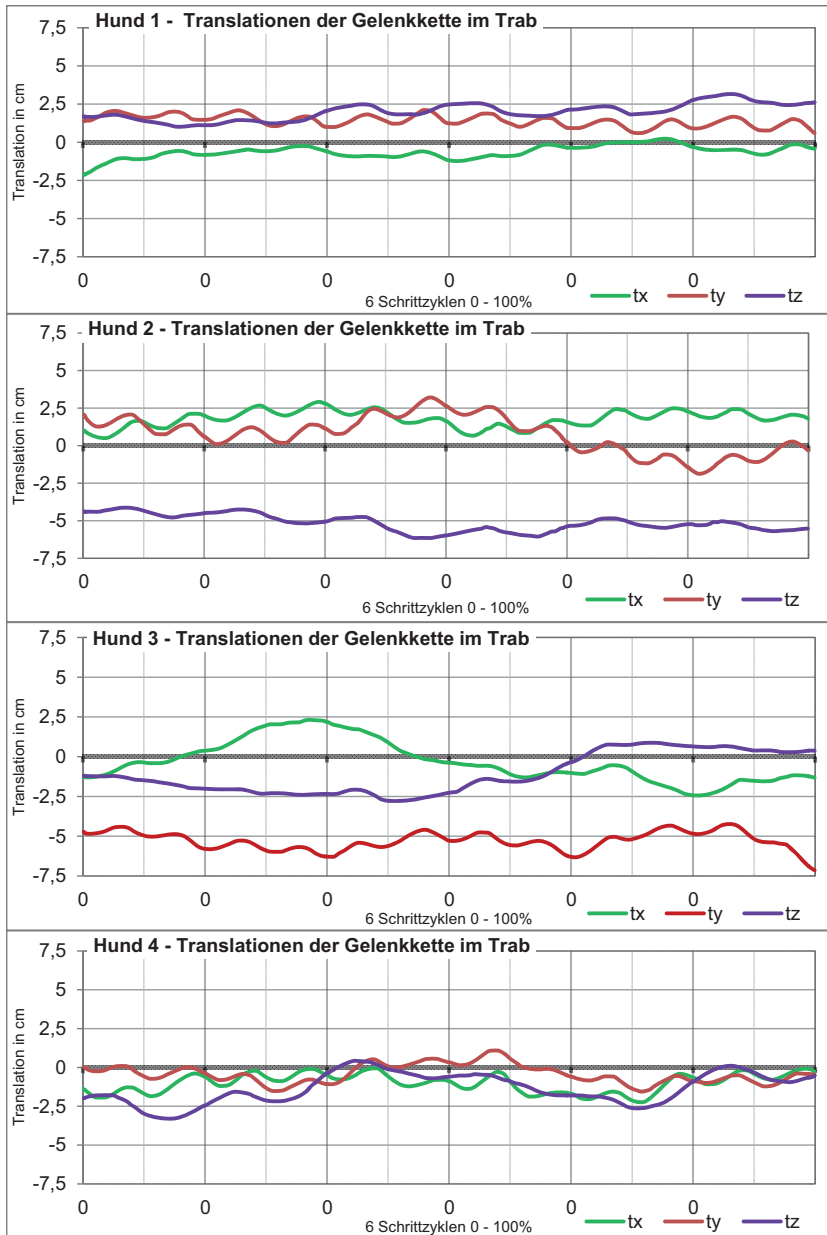


Abbildung 76: Diagramm der Translationsbewegungen der Gelenkkette im Trab (horizontale Translation – Tx, vertikale Translation – Ty, laterale Translation – Tz). Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Translation in cm an.

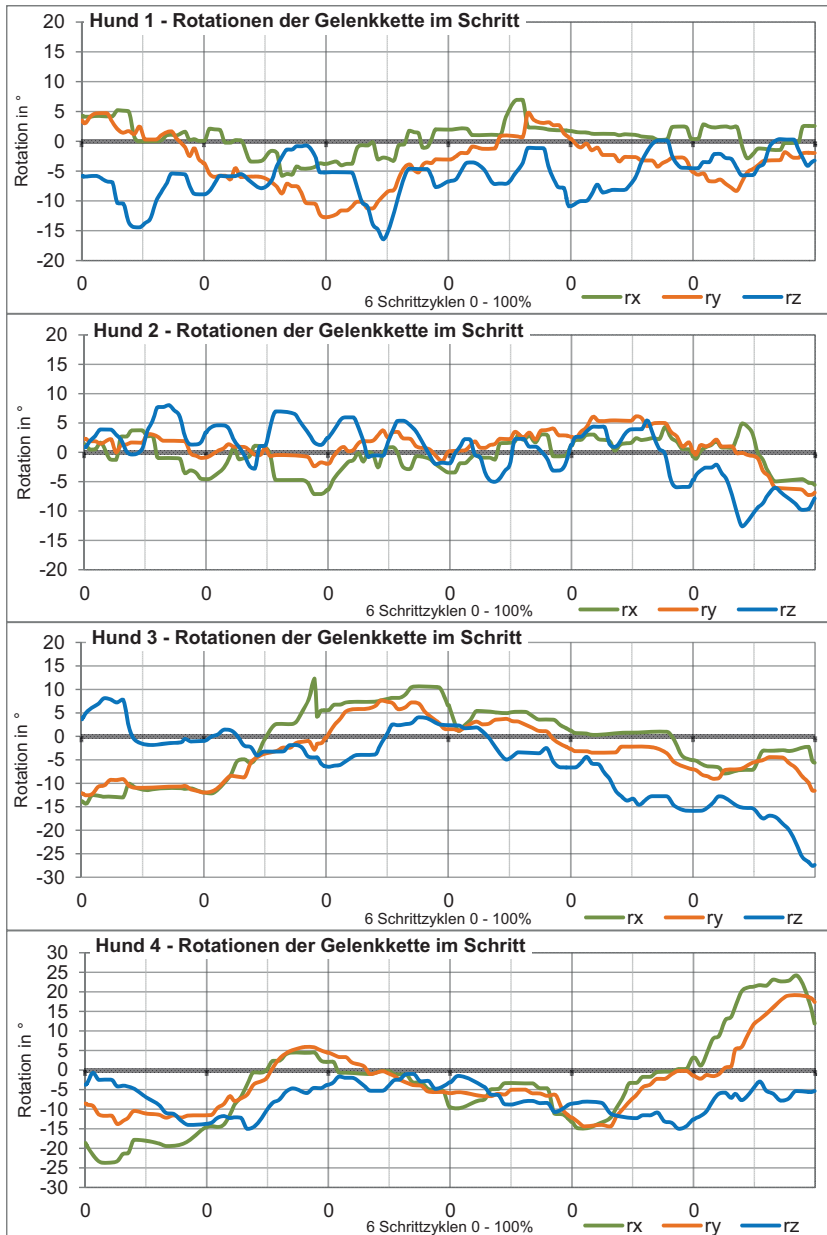


Abbildung 77: Diagramm der Rotationsbewegungen der Gelenkkette im Schritt (axiale Rotation – Rx, laterale Rotation – Ry, sagittale Rotation – Rz). Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Rotation in Grad an.

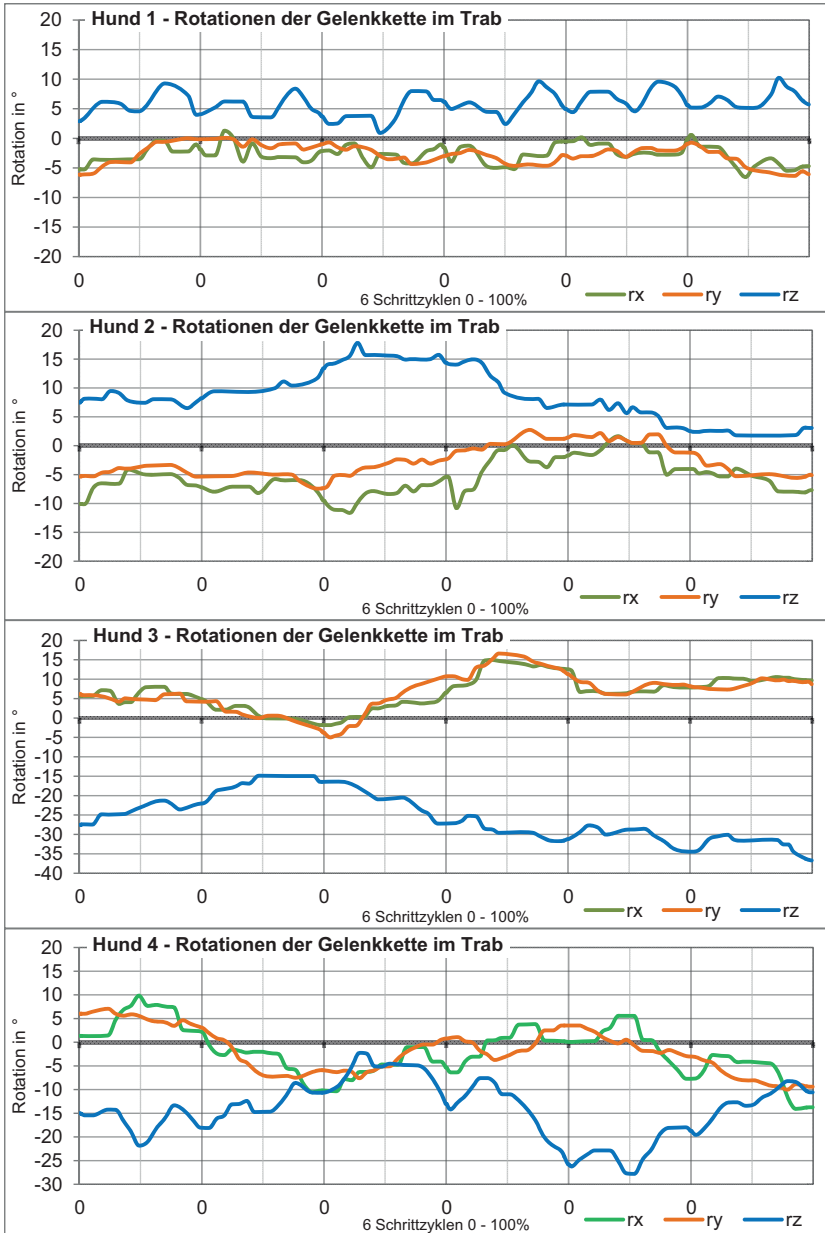


Abbildung 78: Diagramm der Rotationsbewegungen der Gelenkkette im Trab (axiale Rotation – Rx, laterale Rotation – Ry, sagittale Rotation – Rz). Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Rotation in Grad an.

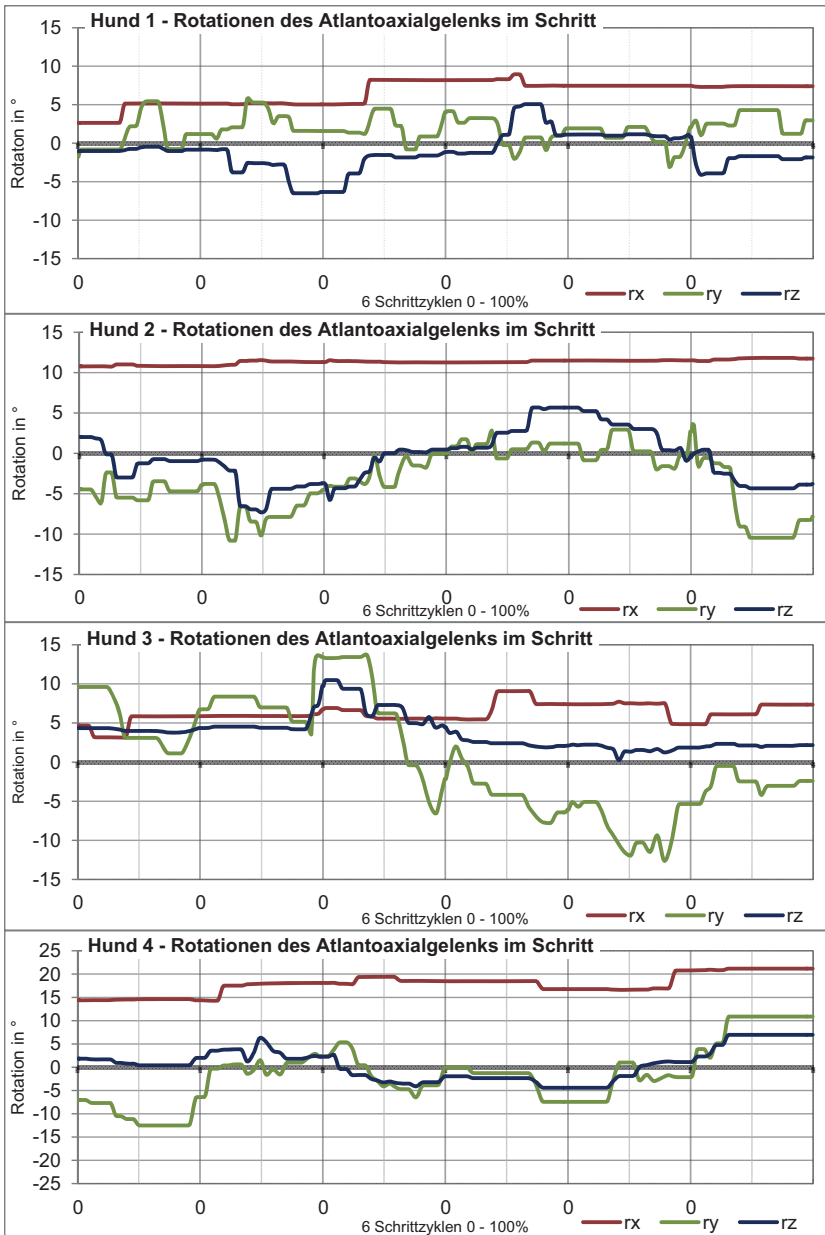


Abbildung 79: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantoaxialgelenks im Schritt (sagittale Rotation – Rx, axiale Rotation – Ry, laterale Rotation – Rz). Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Rotation in Grad an.

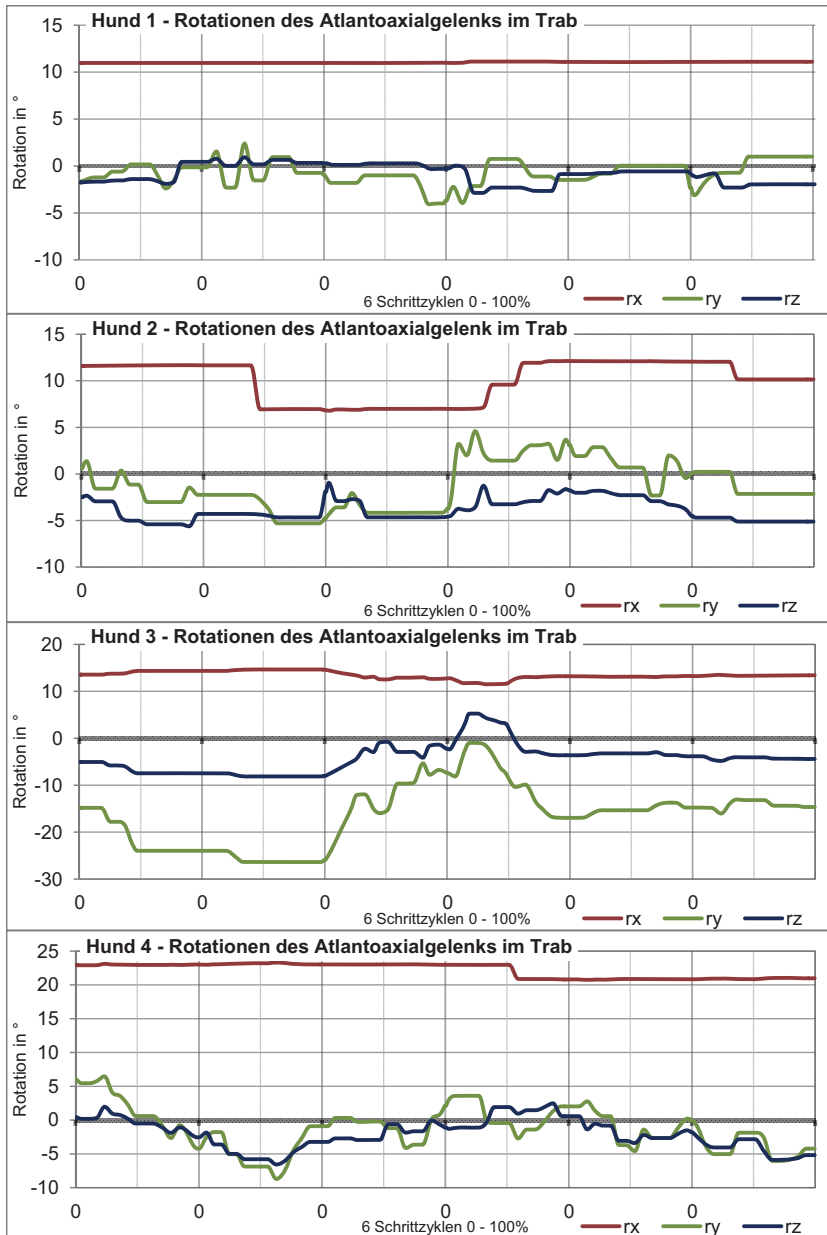


Abbildung 80: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantoaxialgelenks im Trab (sagittale Rotation – Rx, axiale Rotation – Ry, laterale Rotation – Rz). Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Rotation in Grad an.

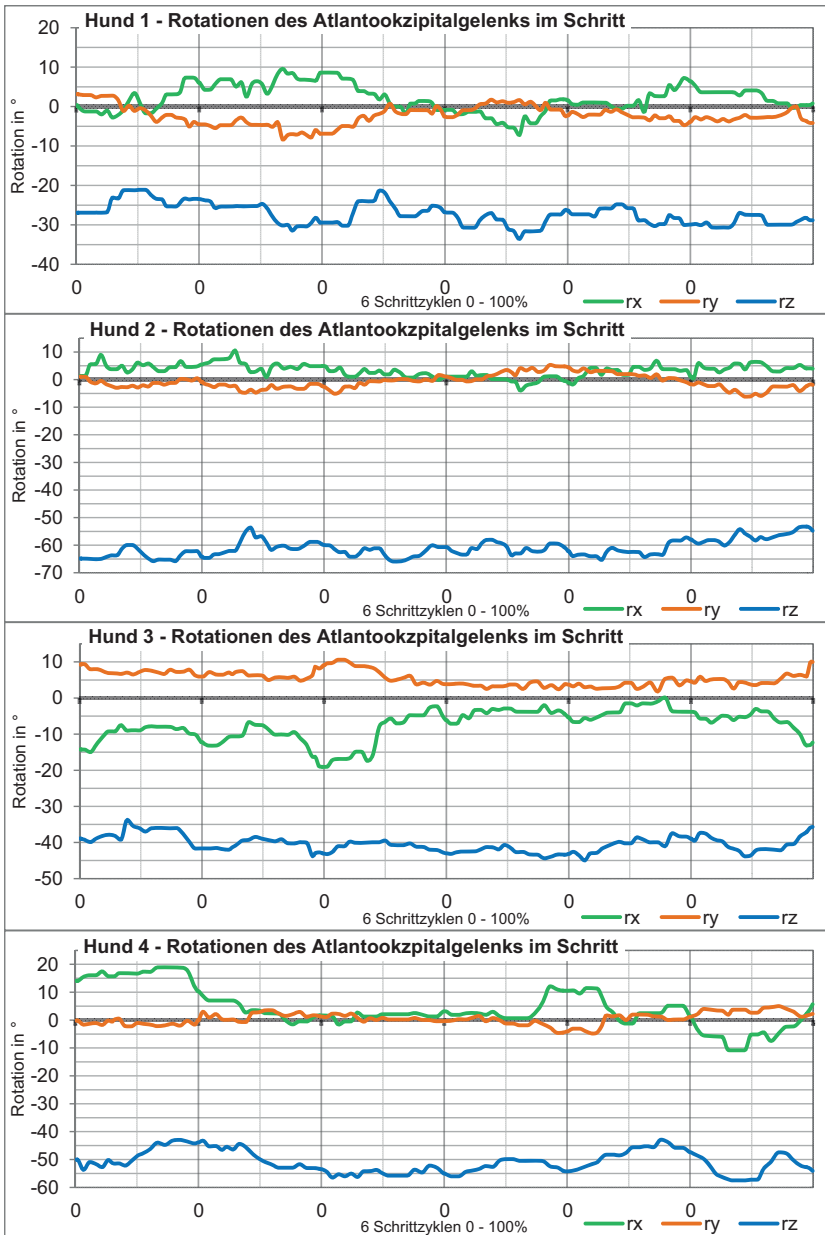


Abbildung 81: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantookzipitalgelenks im Schritt(axiale Rotation – Rx, laterale Rotation – Ry, sagittale Rotation – Rz). Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Rotation in Grad an.



Abbildung 82: Diagramm der Rotationsbewegungen des Atlantookzipitalgelenks im Trab(axiale Rotation – Rx, laterale Rotation – Ry, sagittale Rotation – Rz) Die X-Achse zeigt alle 6 Schrittzyklen hintereinander, deren Beginn jeweils mit 0 gekennzeichnet ist. Die Y-Achse zeigt das Maß an Rotation in Grad an.

Tabelle 36: Schrittanalyse der Gangart Schritt von Hund 1 und Hund 2 mit Bestimmung der Auffußungszeitpunkte aller Gliedmaßen, prozentual zum Schritzyklus der linken Hintergliedmaße als Referenzgliedmaße.

Hund 1	HL auf	HL ab	VL auf	VL ab	HR auf	HR ab	VR auf	VR ab	HL auf %	VL auf %	HL auf %	VL auf %	HR auf %	VR auf %	HL ab %	VL ab %	HR ab %	VR ab %				
0	1282	1528	1385	1637	1458	1709	1566	1797	100	17,36	1990	26	101,2	1916	20	1916	78	1797	45			
1	1638	1870	1738	1981	1812	2060	1916	2154	100	20,91	2335	27	2389	101	2168	49	2083	80	2154	45		
2	1990	2236	2081	2359	2168	2428	2283	2522	100	24,55	2722	28	2853	48	2428	20	2851	80	2522	45		
3	2353	2596	2465	2715	2533	2760	2651	2872	100	2818	3059	28	3034	92	2897	51	2760	17	2895	78	2872	44
4	2722	2960	2818	3034	2897	3112	2985	3208	100	3145	3403	25	3378	92	3233	50	3112	15	3322	76	3208	43
5	3059	3290	3145	3378	3233	3464	3322	3553	100	3496	3753	26	3734	94	3580	50	3464	17	3675	77	3553	42
6	3403	3634	3466	3734	3580	3809	3675	3903	100,00		100,00	26,83		95,67	18,00		2,00		78,17		44,00	
7	3753	3982	3848	4083	3923	xxx	4018	xxx	0,00		0,00	1,17		3,61	2,00				1,60		1,26	
Hinten links																						
1	1638	1870	1990	352	1638	0	1670	65,00	1990	26	1990	26	1990	49	1709	20	1916	78	1797	45		
2	1990	2236	2353	363	1990	0	2236	67,00	2335	27	2335	27	2389	51	2060	19	2389	80	2154	45		
3	2353	2596	2722	369	2353	0	2596	65,00	2722	28	2722	28	2853	48	2428	20	2851	80	2522	45		
4	2722	2960	3059	337	2722	0	2960	67,00	3059	28	3059	28	3034	92	2760	17	2895	78	2872	44		
5	3059	3290	3403	344	3059	0	3290	67,00	3403	25	3403	25	3378	92	3112	15	3322	76	3208	43		
6	3403	3634	3753	350	3403	0	3634	66,00	3753	26	3753	26	3734	94	3464	17	3675	77	3553	42		
7								66,17		26,83		1,17		49,50	3809	18,00		78,17		44,00		
								0,98		1,17				1,05		2,00		1,60		1,26		
Hund 2																						
1	30	238	86	314	200	407	270	473	100	86	371	16	314	83	200	49	270	70	x			
2	371	580	429	645	535	736	590	806	100	429	689	16	645	86	535	51	407	68	473	32		
3	689	909	756	971	867	1064	917	1126	100	756	1021	20	971	84	867	53	736	68	806	35		
4	1021	1238	1073	1304	1195	1402	1242	1459	100	1073	1360	15	1304	83	1195	51	1064	65	1126	30		
5	1360	1563	1407	1631	1523	1727	1572	1796	100	1407	1685	14	1631	83	1523	50	1402	65	1459	30		
6	1685	1895	1748	1960	1860	2046	1910	2111	100	1748	2004	19	1960	86	1860	54	1727	70	1796	34		
7	2004	2205	2060	2278	2195	2367	2222	2433	100,00		100,00	17,00		84,17	12,40		67,67		2433,00			
								2,25	0,00	2,37			1,47	1,96	1,14		2,25		1,26			
Hinten links																						
1	30	238	371	341	30	238	60,00	371	371	16	314	16	314	83	200	49	x	70	x			
2	371	580	689	318	371	0	580	65,00	689	16	645	16	645	86	535	51	407	68	473	32		
3	689	909	1021	332	689	0	909	66,00	1021	20	1021	20	1021	84	867	53	736	68	806	35		
4	1021	1238	1360	339	1021	0	1238	64,00	1360	15	1360	15	1304	83	1195	51	1064	65	1126	30		
5	1360	1563	1685	325	1360	0	1563	62,00	1685	14	1631	14	1631	83	1523	50	1402	65	1459	30		
6	1685	1895	2004	319	1685	0	1895	65,00	2004	19	1960	19	1960	86	1860	54	1727	70	1796	34		
								63,67		17,00			84,17	1,47	1,96	1,14		67,67		2433,00		
								2,25	0,00	2,37			1,47	1,96	1,14		2,25		1,26			

Tabelle 37: Schrittanalyse der Gangart Schritt von Hund 3 und Hund 4 mit Bestimmung der Auffußungszeitpunkte aller Gliedmaßen, prozentual zum Schrittzyklus der linken Hintergliedmaße als Referenzgliedmaße.

Hund 3	HL auf	HL ab	VL auf	VL ab	HR auf	HR ab	VR auf	VR ab	HL auf %	HL ab %	VL auf %	VL ab %	HR auf %	HR ab %	VR auf %	VR ab %						
1	497	664	579	778	633	839	731	939	100	1089	883	29	1077	95	1030	79						
2	795	973	863	1077	937	1123	1030	1217	100	1370	1162	25	1354	94	1233	47						
3	1089	1255	1162	1354	1223	1414	1312	1511	100	1665	1453	28	1667	100	1512	48						
4	1370	1557	1453	1667	1512	1708	1618	1804	100	1950	1753	30	1939	96	1815	52						
5	1665	1848	1753	1939	1815	1988	1895	2083	100	2237	2029	27	2238	100	2103	53						
6	1950	2138	2039	2238	2103	2275	2185	2385	100	2544	2331	30	2536	97	2386	48						
7	2237	2432	2331	2536	2386	2569	2483	2697	100													
	2544	2727	2638	xxxx	2687	xxxx	2800	xxx														
Hinten links																						
1	795	973	1089	294	795	0	973	60,00	1089	60,00	294	29	1077	95	1030	79	939	48				
2	1089	1255	1370	261	1089	0	1255	59,00	1370	59,00	261	25	1354	94	1233	47	1123	12	1217	45		
3	1370	1557	1665	295	1370	0	1557	63,00	1665	63,00	295	28	1667	100	1512	48	1414	14	1618	84		
4	1665	1848	1950	285	1665	0	1848	64,00	1950	64,00	285	30	1939	96	1815	52	1708	14	1895	80		
5	1950	2138	2237	287	1950	0	2138	65,00	2237	65,00	287	27	2238	100	2103	53	1988	13	2185	81		
6	2237	2432	2544	307	2237	0	2432	63,00	2544	63,00	307	30	2536	97	2386	48	2275	12	2483	80		
					2544		2727	62,33		62,33		28,17	97,00	49,33		80,50					47,00	
						0,00		2,34		2,34		1,94	2,53	2,50		1,87					1,26	
Hund 4																						
1	1432	1615	1524	1694	1432	1576	1771	1657	1840	1657	1576	27	1975	83	1885	48	1771	14	1939	75	1840	39
2	1732	1908	1806	1975	1865	2043	1939	2098	2280	2280	2070	23	2243	86	2138	47	2043	13	2209	74	2098	33
3	2006	2176	2070	2243	2136	2324	2209	2385	2554	2554	2351	25	2517	86	2412	48	2324	16	2485	74	2385	38
4	2280	2465	2351	2517	2412	2589	2485	2652	2813	2813	2624	27	2780	87	2677	47	2589	13	2748	74	2652	37
5	2554	2716	2624	2780	2677	2851	2748	2912	3079	3079	2882	25	3043	88	2942	48	2851	14	3012	74	2912	37
6	2813	2979	2882	3043	2942	3120	3012	3177	3352	3352	3144	23	3328	91	3213	49	3120	15	3289	76	3177	35
7	3079	3256	3144	3328	3213	3393	3289	3450														
8	3352	3523	3422	3567	3482	3663	3554	3728														
Hinten links																						
1	1732	1908	2006	274	1732	0	1908	64,00	2006	64,00	274	27	1975	83	1885	48	1771	14	1939	75	1840	39
2	2006	2176	2280	274	2006	0	2176	62,00	2280	62,00	274	23	2243	86	2138	47	2043	13	2209	74	2098	33
3	2280	2465	2554	274	2280	0	2465	63,00	2554	63,00	274	25	2517	86	2412	48	2324	16	2485	74	2385	38
4	2554	2716	2624	2716	2554	0	2716	62,00	2813	62,00	2716	27	2780	87	2677	47	2589	13	2748	74	2652	37
5	2813	2979	3079	296	2813	0	2979	62,00	3079	62,00	296	25	3043	88	2942	48	2851	14	3012	74	2912	37
6	3079	3256	3352	273	3079	0	3256	64,00	3352	64,00	273	23	3328	91	3213	49	3120	15	3289	76	3177	35
						0,00		62,83		62,83		25,00	87,33	47,83		74,50						38,50
						0,00		0,96		0,96		1,79	1,97	1,75		1,87						1,26

Tabelle 38: Schrittanalyse der Gangart Trab von Hund 1 und Hund 2 mit Bestimmung der Auffußungszeitpunkte aller Gliedmaßen, prozentual zum Schritzyklus der linken Hintergliedmaße als Referenzgliedmaße.

Hund 1		HL auf	HL ab	VL auf	VL ab	HR auf	HR ab	VR auf	VR ab														
Hinter links		ab	auf	Dauer	HL auf 1	HL auf%	HL ab	HL ab %	HL auf	HL auf %	VL auf	VL auf %	VL ab	VL ab %	HR auf	HR auf %	HR ab	HR ab %	VR auf	VR auf %	VR ab	VR ab %	
0	644	779	709	850	760	883	591	739															
1	867	985	929	1059	970	1097	823	951															
2	1077	1194	1152	1287	1182	1302	1036	1173															
3	1284	1412	1370	1506	1396	1527	1261	1391															
4	1509	1629	1584	1719	1619	1756	1470	1603															
5	1719	1842	1797	1938	1836	1979	1688	1822															
6	1935	2055	2016	2150	2047	2167	1909	2035															
7	2147	2270	2236	2369	2256	2379	2127	2253															
Hinter links																							
1	867	985	1077	210	967	0	985	56,00	1077	100	929	29	1089	96	970	49	883	7	1036	80	951	40	
2	1077	1194	1284	207	1077	0	1194	56,00	1284	100	1152	36	1287	101	1182	50	1037	9	1261	88	1173	46	
3	1284	1412	1509	225	1284	0	1412	56,00	1509	100	1370	38	1506	98	1399	51	1302	8	1479	86	1391	47	
4	1509	1629	1719	210	1509	0	1629	57,00	1719	100	1584	35	1713	97	1619	52	1527	8	1688	85	1603	44	
5	1719	1842	1935	216	1719	0	1842	56,00	1935	100	1797	36	1938	101	1826	49	1736	7	1909	87	1822	47	
6	1935	2055	2147	212	1935	0	2055	56,00	2147	100	2016	38	2150	101	2047	52	1949	6	2127	90	2035	47	
Hinter rechts																							
0						0,00		56,17		100,00	35,33		99,00		50,50		7,50			86,00		45,17	
1						0,00		0,41		0,00	3,33		2,28		1,38		1,05			3,41		2,79	
Hund 2																							
0	1041	1168	1142	1265	1159	1271	1033	1157															
1	1267	1372	1369	1475	1372	1477	1257	1366															
2	1479	1583	1582	1698	1584	1696	1471	1584															
3	1690	1808	1803	1924	1807	1927	1693	1810															
4	1917	2025	2020	2130	2026	2128	1910	2022															
5	2131	2234	2229	2339	2232	2338	2120	2228															
6	2340	2454	2446	2561	2444	2566	2332	2447															
7	2557	2672	2657	2777	2665	2774	2547	2663															
Hinter links																							
1	1267	1372	1479	212	1267	0	1372	49,00	1479	100	1369	48	1265	0	1372	49	1271	1	1471	96	1366	46	
2	1479	1583	1690	211	1479	0	1583	49,00	1690	100	1582	48	1475	-1	1584	49	1477	0	1693	101	1584	49	
3	1690	1808	1917	227	1690	0	1808	51,00	1917	100	1803	49	1698	3	1807	51	1698	3	1910	96	1810	52	
4	1917	2025	2131	214	1917	0	2025	50,00	2131	100	2020	48	1924	3	2026	4	1927	4	2120	94	2022	49	
5	2131	2234	2340	209	2131	0	2234	49,00	2340	100	2229	46	2130	0	2332	48	2128	-1	2332	96	2238	46	
6	2340	2454	2557	217	2340	0	2454	52,00	2557	100	2446	48	2339	0	2444	47	2338	0	2547	95	2447	49	
Hinter rechts																							
						0,00		50,00		100,00	47,83		0,83		49,00		1,17			96,33		48,50	
						0,00		1,26		0,00	0,96		1,72		1,41		1,94			2,42		2,26	

Tabelle 41: Ermittlung der Messgenauigkeit (nach Wachs 2015)- Teil 2 – Messgenauigkeit bei Hund 2, bei dem ein Schrittzklus dreimal an zwei Folgetagen animiert wurde mit Vergleich auch zwischen den Messtagen sowie Ermittlung der Gesamtgenauigkeit.

C3	LAUF 1, Tag1, abends				LAUF 2, Tag2, vormittags				LAUF 3, Tag2, nachmittags				rz					
	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz						
1267	0,98	1,95	-4,37	-11,01	5,02	8,30	-10,15	-5,17	7,45	0,97	1,97	-4,36	-10,92	7,37				
1300	0,70	1,64	-4,16	-6,24	-3,59	9,62	-7,84	-3,82	8,51	0,73	1,68	-4,17	-6,43	-3,99				
1372	1,57	1,43	-4,31	-6,73	-3,13	7,47	-1,52	-1,38	-4,34	-1,59	1,39	-4,41	-5,14	-4,24				
1425	1,42	1,03	-4,75	-6,79	-3,52	8,64	-1,07	-1,70	-8,83	-2,39	8,28	1,47	1,06	-4,77				
1479	1,97	0,56	-4,46	-8,98	-4,82	8,80	1,94	0,55	-4,43	-10,13	-4,25	6,57	1,95	0,55				
LAUF 1	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz		
1267	0,00	0,00	0,00	11,58	2,67	-3,52	0,00	0,00	11,58	2,48	-3,56	0,00	0,00	0,00	11,58	2,83	-3,49	
1300	0,00	0,00	0,00	11,57	-0,39	-4,14	0,00	0,00	11,57	0,63	-3,94	0,00	0,00	0,00	11,57	-0,94	-4,26	
1372	0,00	0,00	0,00	11,57	-0,39	-4,14	0,00	0,00	11,57	0,63	-3,94	0,00	0,00	0,00	11,60	-2,29	-4,49	
1425	0,00	0,00	0,00	11,57	-0,39	-4,14	0,00	0,00	11,55	0,94	-5,43	0,00	0,00	0,00	11,60	-2,29	-4,49	
1479	0,00	0,00	0,00	11,57	-0,39	-4,14	0,00	0,00	11,55	0,94	-5,43	0,00	0,00	0,00	11,60	-1,33	-4,29	
LAUF 1	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz		
1267	0,00	0,00	0,00	2,05	-2,04	-66,03	-0,01	0,02	0,00	1,96	-2,95	-65,02	0,02	-0,02	0,00	2,87	-2,69	
1300	0,00	0,00	0,00	5,15	-3,44	-64,62	-0,02	0,03	0,00	4,82	-2,72	-63,63	-0,02	0,03	0,00	3,50	-2,18	
1372	-0,01	0,01	0,00	5,77	-3,86	-64,87	-0,02	0,03	0,00	4,90	-3,34	-64,69	-0,02	0,03	0,00	4,74	-3,31	
1425	-0,01	0,01	0,00	4,58	-6,05	-65,10	-0,02	0,03	0,00	4,50	-4,96	-64,74	-0,02	0,03	0,00	4,74	-3,31	
1479	-0,01	0,01	0,00	4,63	-4,29	-65,76	-0,02	0,03	0,00	3,40	-3,43	-65,20	-0,02	0,03	0,00	4,79	-3,24	
LAUF 2	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz	bx	ty	tz	rz		
1267	0,37	0,01	1,86	SD _{ty}	M _{tz}	SD _{tz}	M _{ty}	SD _{ty}	M _{tz}	SD _{tz}	M _{ty}	SD _{ty}	M _{tz}	SD _{tz}	M _{ty}	SD _{ty}	M _{tz}	
0,71	0,01	1,67	0,02	4,16	0,01	-8,63	0,47	-4,33	0,23	7,71	0,62	0,70	0,73	0,03	1,64	1,68	0,03	
1,96	0,04	1,40	0,03	-4,75	0,05	-8,23	0,94	-3,84	0,68	9,22	0,67	1,52	1,59	0,08	1,38	1,43	0,05	
1,46	0,03	1,06	0,02	4,34	0,04	-7,71	1,03	-3,06	0,39	8,01	0,07	1,94	1,37	0,03	0,95	0,95	0,01	
1,95	0,02	0,53	0,01	-4,46	0,02	-3,28	0,85	-4,35	0,23	0,12	0,15	Mittelwert:	1,31	1,35	0,84	1,31	1,34	0,83
M Lauf 1-3	SD_{ty}	M_{tz}	SD_{tz}	M_{ty}	SD_{ty}	M_{tz}	SD_{tz}	M_{ty}	SD_{ty}	M_{tz}	SD_{tz}	M_{ty}	SD_{ty}	M_{tz}	SD_{tz}	M_{ty}	SD_{ty}	
0,00	0,00	0,00	0,00	10,28	0,00	2,86	0,17	-3,52	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	0,02	-0,68	1,48	-4,19	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	0,03	-0,68	1,62	-4,68	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	0,02	-0,28	1,14	-4,62	0,70	Mittelwert:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	2,28	0,50	0,47	-66,60	0,60	-0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	1,86	
-0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	4,49	0,67	-63,87	0,67	-0,02	0,01	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	3,50	
-0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	5,14	0,56	-64,74	0,58	-0,02	0,01	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	4,58	
-0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	4,74	0,37	-64,86	0,17	-0,02	0,01	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	3,40	
-0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	4,27	0,76	-65,62	0,37	Mittelwert:	-0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	3,64	
Mittelswert aus allen Mittelwerten	M	der Mittelwerte	(Differenz	M	aller SDs	Trans	M	der Mittelwerte	(Differenz	M	aller SDs	Trans	M	der Mittelwerte	(Differenz	M	aller SDs	Trans
C3.1	Mittelwert aus allen Mittelwerten	0,02	M der MS Rota	1,78	0,01	M SD Rotation	0,06	Mittelwert aus allen Mittelwerten	0,02	M der MS Rota	1,78	0,01	M SD Rotation	0,06	Mittelwert aus allen Mittelwerten	0,02	M der MS Rota	1,78
C3.2	Mittelwert aus allen Mittelwerten	0,02	M der MS Rota	1,00	0,01	M SD Rota	0,38	Mittelwert aus allen Mittelwerten	0,02	M der MS Rota	1,00	0,01	M SD Rota	0,38	Mittelwert aus allen Mittelwerten	0,02	M der MS Rota	1,00
MM	MM	0,02	MM	1,37	0,01	MM	0,56	MM	0,02	MM	1,37	0,01	MM	0,56	MM	0,02	MM	1,37
MM	MM	0,00	MM	0,95	0,00	MM	0,39	MM	0,00	MM	0,95	0,00	MM	0,39	MM	0,00	MM	0,95

Tabelle 42: Spearman Korrelation – Vergleich der Schritte der einzelnen Hunde in Schritt und Trab. In der Tabelle sind bereits die Mittelwerte der 6 Schrittzyklen jedes Hundes als Wert erfasst.

C3							C1								
Translation		Schritt			Trab			Rotation		Schritt			Trab		
	tx	ty	tz	tx	ty	tz	rx	ry	rz	rx	ry	rz	rx	ry	rz
Hund 1	0,69	0,51	0,91	0,63	0,79	0,59	Hund 1	0,49	0,34	0,32	0,10	0,42	0,15	0,42	0,17
Hund 2	0,40	0,63	0,87	0,58	0,4	0,85	Hund 2	0,2	0,2	0,15	0,05	0,52	0,47	0,05	0,47
Hund 3	0,44	0,39	0,57	0,05	0,30	0,19	Hund 3	0,51	0,56	0,49	0,24	0,05	0,26	0,05	0,26
Hund 4	0,24	0,18	0,95	0,48	0,54	0,49	Hund 4	0,36	0,07	0,078	0,18	0,51	0,08	0,51	0,08
Mittelwert	0,44	0,43	0,83	0,44	0,51	0,53	Mittelwert	0,39	0,29	0,26	0,14	0,38	0,24	0,38	0,24
C3							C1								
Rotation		Schritt			Trab			Kopf Rotation		Schritt			Trab		
	rx	ry	rz	rx	ry	rz	rx	ry	rz	rx	ry	rz	rx	ry	rz
Hund 1	0,15	0,04	0,65	0,30	0,16	0,84	Hund 1	0,21	0,2	0,45	0,11	0,10	0,10	0,10	0,6
Hund 2	0,36	0,33	0,69	0,29	0,25	0,28	Hund 2	0,20	0,2	0,62	0,1	0,15	0,3	0,15	0,3
Hund 3	0,40	0,40	0,38	0,12	0,15	0,28	Hund 3	0,47	0,19	0,18	0,08	0,08	0,26	0,27	0,31
Hund 4	0,32	0,19	0,18	0,35	0,26	0,31	Hund 4	0,117	0,13	0,2	0,27	0,15	0,31	0,15	0,31
Mittelwert	0,31	0,24	0,48	0,27	0,21	0,43	Mittelwert	0,25	0,18	0,36	0,14	0,17	0,37	0,17	0,37

Tabelle 43: Spearman Korrelation – Vergleich der Gelenkbewegungen in Schritt und Trab. In der Tabelle sind bereits die Mittelwerte der 6 Schrittzyklen jedes Hundes als Wert erfasst.

Rx							Ry						
Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf	Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf
Hund 1	1	-0,772	0,295	1	-0,534	1	Hund 1	1	-0,231	-0,348	1	0,433	1
Hund 2	1	0,318	0,322	1	-0,178	1	Hund 2	1	-0,291	-0,83	1	0,072	1
Hund 3	1	0,652	0,721	1	0,759	1	Hund 3	1	-0,497	-0,842	1	0,678	1
Hund 4	1	0,468	-0,433	1	-0,2	1	Hund 4	1	-0,504	0,203	1	0,022	1
Mittelwert	1	0,17	0,23	1,00	-0,04	1,00	Mittelwert	1,00	-0,38	-0,45	1,00	0,30	1,00
Trab							Trab						
Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf	Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf
Hund 1	1	-0,248	0,528	1	-0,479	1	Hund 1	1	-0,712	-0,082	1	0,086	1
Hund 2	1	-0,484	0,072	1	-0,365	1	Hund 2	1	-0,486	-0,081	1	0,411	1
Hund 3	1	0,296	0,356	1	0,456	1	Hund 3	1	-0,498	-0,678	1	0,774	1
Hund 4	1	0,562	-0,626	1	-0,898	1	Hund 4	1	0,832	-0,308	1	-0,144	1
Mittelwert	1	0,03	0,08	1,00	-0,32	1,00	Mittelwert	1,00	-0,21	-0,28	1,00	0,28	1,00
Rz							Rz						
Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf	Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf
Hund 1	1	0,081	-0,943	1	-0,022	1	Hund 1	1	0,081	-0,943	1	-0,022	1
Hund 2	1	0,463	-0,913	1	-0,451	1	Hund 2	1	0,463	-0,913	1	-0,451	1
Hund 3	1	0,535	-0,388	1	-0,592	1	Hund 3	1	0,535	-0,388	1	-0,592	1
Hund 4	1	-0,145	-0,602	1	0,213	1	Hund 4	1	-0,145	-0,602	1	0,213	1
Mittelwert	1,00	0,23	-0,71	1,00	-0,21	1,00	Mittelwert	1,00	0,23	-0,71	1,00	-0,21	1,00
Trab							Trab						
Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf	Schritt	Korr C3-C3	Korr C3-C1	Korr C3-Kopf	Korr C1-C1	Korr C1-Kopf	Korr Kopf-Kopf
Hund 1	1	-0,304	-0,927	1	0,119	1	Hund 1	1	-0,304	-0,927	1	0,119	1
Hund 2	1	0,739	-0,808	1	-0,847	1	Hund 2	1	0,739	-0,808	1	-0,847	1
Hund 3	1	0,552	-0,677	1	-0,519	1	Hund 3	1	0,552	-0,677	1	-0,519	1
Hund 4	1	-0,416	-0,94	1	0,431	1	Hund 4	1	-0,416	-0,94	1	0,431	1
Mittelwert	1,00	0,14	-0,84	1,00	-0,20	1,00	Mittelwert	1,00	0,14	-0,84	1,00	-0,20	1,00

Tabelle 44: Spearman Korrelation – Vergleich ausgewählter Gelenkbewegungen in Schritt und Trab. In der Tabelle sind bereits die Mittelwerte der 6 Schrittzyklen jedes Hundes als Wert erfasst.

Schritt	sagittale Rotation C2/C1 -C1/Kopf	laterale Rotation C2/C1 -C1/Kopf	axiale - laterale Rotation C2/C1	axiale - laterale Rotation C1/Kopf
Hund 1	0,259	0,141	0,436	-0,661
Hund 2	0,712	0,591	0,42	-0,361
Hund 3	0,563	0,656	0,864	-0,878
Hund 4	0,353	0,329	0,309	-0,802
Mittelwert	0,47	0,43	0,51	-0,68
Trab	sagittale Rotation C2/C1 -C1/Kopf	laterale Rotation C2/C1 -C1/Kopf	axiale - laterale Rotation C2/C1	axiale - laterale Rotation C1/Kopf
Hund 1	-0,365	-0,362	-0,26	0,009
Hund 2	-0,592	0,485	0,9	-0,267
Hund 3	0,588	0,919	0,643	-0,592
Hund 4	0,326	-0,028	0,771	-0,423
Mittelwert	-0,01	0,25	0,51	-0,32

Tabelle 45: Spearman Korrelation – Vergleich der untersuchten Hunde im Schritt, der Vergleich wurde für alle Bewegungsrichtungen durchgeführt.

C3 Tx						C1 Rx								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,401	0,102	0,325									
	Hund 2	Korrelation	0,401	1	0,723		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,56	0,844	0,659		
	Hund 3	Korrelation	0,102	0,723	1	-0,151		Hund 2	Korrelation	0,56	1	0,388	0,548	
	Hund 4	Korrelation	0,325	0,306	-0,151	1		Hund 3	Korrelation	0,844	0,388	1	0,471	
								Hund 4	Korrelation	0,659	0,548	0,471	1	
								Mittelwert		0,77	0,62	0,68	0,67	0,68
C3 Ty						C1 Ry								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,645	-0,213	0,499		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,247	0,244	0,563		
	Hund 2	Korrelation	-0,645	1	0,224	-0,03		Hund 2	Korrelation	-0,247	1	0,638	0,029	
	Hund 3	Korrelation	-0,213	0,224	1	0,163		Hund 3	Korrelation	0,244	0,638	1	0,514	
	Hund 4	Korrelation	0,499	-0,03	0,163	1		Hund 4	Korrelation	0,563	0,029	0,514	1	
								Mittelwert		0,39	0,35	0,60	0,53	0,47
C3 Tz						C1 Rz								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,658	0,924	0,956		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,337	-0,638	0,609		
	Hund 2	Korrelation	0,658	1	0,778	0,865		Hund 2	Korrelation	-0,337	1	0,357	-0,296	
	Hund 3	Korrelation	0,924	0,778	1	0,953		Hund 3	Korrelation	-0,638	0,357	1	-0,163	
	Hund 4	Korrelation	0,956	0,953	0,953	1		Hund 4	Korrelation	0,609	-0,296	-0,163	1	
								Mittelwert		0,16	0,18	0,14	0,29	0,19
C3 Rx						Kopf Rx								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,07	-0,662	-0,806		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,023	-0,603	0,861		
	Hund 2	Korrelation	-0,07	1	-0,328	-0,063		Hund 2	Korrelation	0,023	1	-0,184	0,087	
	Hund 3	Korrelation	-0,662	-0,328	1	0,965		Hund 3	Korrelation	-0,603	-0,184	1	-0,611	
	Hund 4	Korrelation	-0,806	-0,063	0,965	1		Hund 4	Korrelation	0,861	0,087	-0,611	1	
								Mittelwert		0,32	0,23	-0,10	0,33	0,20
C3 Ry						Kopf Ry								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,298	0,553	0,746		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,791	-0,306	0,506		
	Hund 2	Korrelation	-0,298	1	0,382	-0,551		Hund 2	Korrelation	-0,791	1	0,018	-0,443	
	Hund 3	Korrelation	0,553	0,382	1	0,39		Hund 3	Korrelation	-0,306	0,018	1	-0,681	
	Hund 4	Korrelation	0,746	-0,551	0,39	1		Hund 4	Korrelation	0,506	-0,443	-0,681	1	
								Mittelwert		0,10	-0,05	0,01	0,10	0,04
C3 Rz						Kopf Rz								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,411	0,122	0,072		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,502	-0,399	-0,347		
	Hund 2	Korrelation	0,411	1	0,497	0,814		Hund 2	Korrelation	0,502	1	0,333	0,28	
	Hund 3	Korrelation	0,122	0,497	1	0,784		Hund 3	Korrelation	-0,399	0,333	1	0,172	
	Hund 4	Korrelation	0,072	0,814	0,784	1		Hund 4	Korrelation	-0,347	0,28	0,172	1	
								Mittelwert		0,39	0,53	0,48	0,28	0,42

Tabelle 46: Spearman Korrelation – Vergleich der untersuchten Hunde im Trab, der Vergleich wurde für alle Bewegungsrichtungen durchgeführt.

C3 Tx						C1 Rx								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,378	0,163	0,471		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,074	-0,172	0,138		
	Hund 2	Korrelation	0,378	1	0,481	0,864		Hund 2	Korrelation	0,074	1	-0,328	0,384	
	Hund 3	Korrelation	0,163	0,481	1	0,515		Hund 3	Korrelation	-0,172	-0,328	1	-0,851	
	Hund 4	Korrelation	0,471	0,864	0,515	1		Hund 4	Korrelation	0,138	0,384	-0,851	1	
								Mittelwert		0,26	0,26	-0,09	0,15	0,15
C3 Ty						C1 Ry								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,594	0,818	0,8		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,621	-0,018	-0,776		
	Hund 2	Korrelation	0,594	1	0,342	0,887		Hund 2	Korrelation	-0,621	1	0,519	0,842	
	Hund 3	Korrelation	0,818	0,342	1	0,499		Hund 3	Korrelation	-0,018	0,519	1	0,186	
	Hund 4	Korrelation	0,8	0,887	0,499	1		Hund 4	Korrelation	-0,776	0,842	0,186	1	
								Mittelwert		-0,10	0,44	0,42	0,31	0,27
C3 Tz						C1 Rz								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,839	0,71	0,988		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,134	-0,399	0,454		
	Hund 2	Korrelation	0,839	1	0,526	0,882		Hund 2	Korrelation	0,134	1	0,402	0,611	
	Hund 3	Korrelation	0,71	0,526	1	0,657		Hund 3	Korrelation	-0,399	0,402	1	0,191	
	Hund 4	Korrelation	0,988	0,882	0,657	1		Hund 4	Korrelation	0,454	0,611	0,191	1	
								Mittelwert		0,30	0,54	0,30	0,56	0,42
C3 Rx						Kopf Rx								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,788	-0,582	-0,582		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,458	-0,438	-0,392		
	Hund 2	Korrelation	-0,788	1	0,717	0,794		Hund 2	Korrelation	-0,458	1	0,117	-0,113	
	Hund 3	Korrelation	-0,582	0,717	1	0,506		Hund 3	Korrelation	-0,438	0,117	1	0,483	
	Hund 4	Korrelation	-0,582	0,794	0,506	1		Hund 4	Korrelation	-0,392	-0,113	0,483	1	
								Mittelwert		-0,07	0,14	0,29	0,24	0,15
C3 Ry						Kopf Ry								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,357	-0,781	0,677		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	0,104	0,439	0,566		
	Hund 2	Korrelation	-0,357	1	0,484	-0,774		Hund 2	Korrelation	0,104	1	0,581	0,043	
	Hund 3	Korrelation	-0,781	0,484	1	-0,619		Hund 3	Korrelation	0,439	0,581	1	0,468	
	Hund 4	Korrelation	0,677	-0,774	-0,619	1		Hund 4	Korrelation	0,566	0,043	0,468	1	
								Mittelwert		0,53	0,43	0,61	0,50	0,52
C3 Rz						Kopf Rz								
	Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert		Hund 1	Hund 2	Hund 3	Hund 4	Mittelwert			
Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,347	-0,137	0,781		Spearman-Hund 1	Korrelation	1	-0,38	-0,414	0,782		
	Hund 2	Korrelation	-0,347	1	0,616	-0,082		Hund 2	Korrelation	-0,38	1	-0,188	-0,535	
	Hund 3	Korrelation	-0,137	0,616	1	0,134		Hund 3	Korrelation	-0,414	-0,188	1	-0,151	
	Hund 4	Korrelation	0,781	-0,082	0,134	1		Hund 4	Korrelation	0,782	-0,535	-0,151	1	
								Mittelwert		0,25	-0,03	0,06	0,27	0,14

14 Literaturverzeichnis

Afonso, P. J. P. (2014).

"Atlantoaxial instability in dogs"

Doctoral Thesis, Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro.

Aikawa, T., Shibata, M. and Fujita, H. (2013).

"Modified ventral stabilization using positively threaded profile pins and polymethylmethacrylate for atlantoaxial instability in 49 dogs."

Veterinary surgery 42(6): 683-692.

Andrada, E., Reinhardt, L., Lucas, K. and Fischer, M. S. (2017).

"Three-dimensional inverse dynamics of the forelimb of Beagles at a walk and trot."

American journal of veterinary research 78(7): 804-817.

Arnold, P. (2014).

"On the functional morphology and regionalization of the canine cervical spine"

Master Thesis, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Arnold, P., Forterre, F., Lang, J. and Fischer, M. S. (2016).

"Morphological disparity, conservatism, and integration in the canine lower cervical spine: Insights into mammalian neck function and regionalization."

Mammalian Biology 81(2): 153-162.

Aubert, G. (2002).

"From Photography to Cinematography: Recording Movement and Gait in a Neurological Context."

Journal of the History of the Neurosciences 11(3): 255-264.

Bagley, R. S., Harrington, M. L., Tucker, R. L., Sande, R. D., Root, C. R. and Kramer, R. W. (1996).

"Occipital dysplasia and associated cranial spinal cord abnormalities in two dogs."

Veterinary Radiology & Ultrasound 37(5): 359-362.

Beaver, D. P., Ellison, G. W., Lewis, D. D., Goring, R. L., Kubilis, P. S. and Barchard, C. (2000).

"Risk factors affecting the outcome of surgery for atlantoaxial subluxation in dogs: 46 cases (1978–1998)."

Journal of the American Veterinary Medical Association 216(7): 1104-1109.

Blaszczyk, J. and Dobrzecka, C. (1989).

"Speed control in quadrupedal locomotion: principles of limb coordination in the dog."

Acta Neurobiol Exp (Wars) 49(2-3): 105-124.

Blickhan, R. (1989).

"The spring-mass model for running and hopping."

Journal of biomechanics 22(11-12): 1217-1227.

Bockstahler, B., Henninger, W. and Mayrhofer, E. (2008).

"Kinematische Ganganalyse der Vorderextremitäten bei Militärhunden mit klinisch inapparenten Tendopathien des Schultergelenks."

Wien Tierarztl Monat 95: 139-146.

Bogduk, N. and Mercer, S. (2000).

"Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics."

Clinical biomechanics 15(9): 633-648.

Brainerd, E. L., Baier, D. B., Gatesy, S. M., Hedrick, T. L., Metzger, K. A., Gilbert, S. L. and Crisco, J. J. (2010).

"X-ray reconstruction of moving morphology (XROMM): precision, accuracy and applications in comparative biomechanics research."

Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology 313(5): 262-279.

Breit, S. and Kunzel, W. (2002).

"Shape and orientation of articular facets of cervical vertebrae (C3-C7) in dogs denoting axial rotational ability: an osteological study."

European journal of morphology 40(1): 43-51.

Bresler, E. (1950).

"The forces and moments in the leg during level walking."
Journal of Applied Mechanics 72: 27-36.

Brosius, F. (2011).

SPSS 19.
MITP-Verlags GmbH & Co. KG.

Brown, C. M. and Dalzell, B. (1986).

Dog locomotion and gait analysis.
Hoflin Pub.

Buchner, H., Savelberg, H., Schamhardt, H., Merkens, H. and Barneveld, A. (1994).

"Habituation of horses to treadmill locomotion."
Equine veterinary journal 26(S17): 13-15.

Budsberg, S. C., Verstraete, M. C. and Soutas-Little, R. W. (1987).

"Force plate analysis of the walking gait in healthy dogs."
American journal of veterinary research 48(6): 915-918.

Buehl, A. and Zoefel, P. (2002).

"SPSS 11: introduction in modern data analysis."
Munich, Germany: Addison-Wesley.

Buonocore, E., Hartman, J. T. and Nelson, C. L. (1966).

"Cineradiograms of cervical spine in diagnosis of soft-tissue injuries."
Jama 198(1): 25-29.

Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. and Boone, J. M. (2002).

"The essential physics of medical imaging. 2nd."
Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins 16: 933.

Cavagna, G. A., Heglund, N. C. and Taylor, C. R. (1977).

"Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure."

American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology 233(5): R243-R261.

Cerda-Gonzalez, S., Bibi, K. F., Gifford, A. T., Mudrak, E. L. and Scrivani, P. V. (2016).

"Magnetic resonance imaging-based measures of atlas position: Relationship to canine atlantooccipital overlapping, syringomyelia and clinical signs."

The Veterinary Journal 209: 133-138.

Cerda-Gonzalez, S. and Dewey, C. W. (2010).

"Congenital diseases of the craniocervical junction in the dog."

The Veterinary clinics of North America. Small animal practice 40(1): 121-141.

Cerda-Gonzalez, S., Dewey, C. W., Scrivani, P. V. and Kline, K. L. (2009).

"Imaging Features of Atlanto-Occipital Overlapping in Dogs."

Veterinary Radiology & Ultrasound 50(3): 264-268.

Chambers, J. (1977).

"The use of nonmetallic suture material for stabilization of atlantoaxial subluxation."

Journal of the American Animal Hospital Association 13: 602-604.

Clements, D., Owen, M., Carmichael, S. and Reid, S. (2005).

"Kinematic analysis of the gait of 10 labrador retrievers during treadmill locomotion."

The Veterinary record 156(15): 478-481.

Cook, J. and Oliver, J. (1981).

"Atlantoaxial luxation in the dog."

Compendium on Continuing Education for the Practicing Veterinarian 3(3): 242-250.

Corbin, I. (2004).

"Kinematische Analyse des Bewegungsablaufes bei Pferden mit Gliedmaßenfehlstellungen und deren Behandlung durch Beschlagskorrekturen"
Doctoral Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover.

Cummings, K. R., Vilaplana Grosso, F., Moore, G. E., Rochat, M., Thomovsky, S. A. and Bentley, R. T. (2018).

"Objective measurements of the atlantoaxial joint on radiographs performed without flexion can increase the confidence of diagnosis of atlantoaxial instability in toy breed dogs."
Veterinary Radiology & Ultrasound 59(6): 667-676.

De Lahunta, A., Glass, E. N. and Kent, M. (2014).

Veterinary Neuroanatomy and Clinical Neurology-E-Book.
Elsevier Health Sciences.

Deban, S. M., Schilling, N. and Carrier, D. R. (2012).

"Activity of extrinsic limb muscles in dogs at walk, trot and gallop."
Journal of Experimental Biology 215(2): 287-300.

DeCamp, C. E. (1997).

"Kinetic and kinematic gait analysis and the assessment of lameness in the dog."
The Veterinary clinics of North America. Small animal practice 27(4): 825-840.

Denny, H., GIBBS, C. and WATERMAN, A. (1988).

"Atlanto-axial subluxation in the dog: a review of thirty cases and an evaluation of treatment by lag screw fixation."
Journal of Small Animal Practice 29(1): 37-47.

Dewey, C. W., Cerda-Gonzalez, S. and Scrivani, P. V. (2009).

"Case report: surgical stabilization of a craniocervical junction abnormality with atlanto-occipital overlapping in a dog."
Compendium: Continuing Education For Veterinarians 31(10): E1-6.

Dewey, C. W., Marino, D. J. and Loughin, C. A. (2013).

"Cranio-cervical junction abnormalities in dogs."

New Zealand veterinary journal 61(4): 202-211.

Dickomeit, M., Alves, L., Pekarkova, M., Gorgas, D. and Forterre, F. (2011).

"Use of a 1.5 mm butterfly locking plate for stabilization of atlantoaxial pathology in three toy breed dogs."

Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 24(03): 246-251.

Dunbar, D. C., Macpherson, J. M., Simmons, R. W. and Zarcades, A. (2008).

"Stabilization and mobility of the head, neck and trunk in horses during overground locomotion: comparisons with humans and other primates."

Journal of Experimental Biology 211(24): 3889-3907.

Dvorak, J., Hayek, J. and Zehnder, R. (1987).

"CT-functional diagnostics of the rotatory instability of the upper cervical spine. Part 2. An evaluation on healthy adults and patients with suspected instability."

Spine 12(8): 726-731.

Dvorak, J., Schneider, E., Saldinger, P. and Rahn, B. (1988).

"Biomechanics of the cranio-cervical region: the alar and transverse ligaments."

Journal of Orthopaedic Research 6(3): 452-461.

Evans, H. E. and de Lahunta, A. (2013).

Miller's Anatomy of the Dog.

Elsevier Health Sciences.

Fanchon, L. and Grandjean, D. (2009).

"Habituation of healthy dogs to treadmill trotting: repeatability assessment of vertical ground reaction force."

Research in veterinary science 87(1): 135-139.

Fanchon, L., Valette, J. P., Sanaa, M. and Grandjean, D. (2006).

"The measurement of ground reaction force in dogs trotting on a treadmill: an investigation of habituation."

Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 19(2): 81-86.

Fischer, M. S. and Lilje, K. E. (2011).

Hunde in Bewegung.

Franckh-Kosmos-Verlag, Stuttgart.

Forterre, F., Precht, C., Riedinger, B. and Burki, A. (2015).

"Biomechanical properties of the atlantoaxial joint with naturally-occurring instability in a toy breed dog. A comparative descriptive cadaveric study."

Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 28(5): 355-358.

Forterre, F., Vizcaino Reves, N., Stahl, C., Gendron, K. and Spreng, D. (2012).

"An indirect reduction technique for ventral stabilization of atlantoaxial instability in miniature breed dogs."

Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 25(4): 332-336.

Gage, E. and Smallwood, J. (1970).

"Surgical repair of atlanto-axial subluxation in a dog."

Veterinary medicine, small animal clinician: VM, SAC 65(6): 583.

Gatesy, S. M., Baier, D. B., Jenkins, F. A. and Dial, K. P. (2010).

"Scientific rotoscoping: a morphology-based method of 3-D motion analysis and visualization."

Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology 313(5): 244-261.

Geary, J., Oliver, J. and Hoerlein, B. (1967).

"Atlanto axial subluxation in the canine."

Journal of Small Animal Practice 8(10): 577-582.

Gellman, K. and Bertram, J. (2002).

"The equine nuchal ligament 2: passive dynamic energy exchange in locomotion."
Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 15(01): 07-14.

Gillette, R. L. and Angle, T. C. (2008).

"Recent developments in canine locomotor analysis: a review."
Veterinary journal 178(2): 165-176.

Gilmore, D. (1984).

"Nonsurgical management of four cases of atlantoaxial subluxation in the dog."
Journal of the American Animal Hospital Association 20: 93.

Goel, V., Clark, C., Gallaes, K. and Liu, Y. K. (1988).

"Moment-rotation relationships of the ligamentous occipito-atlanto-axial complex."
Journal of Biomechanics 21(8): 673-675.

Graf, W., de Waele, C. and Vidal, P. P. (1995).

"Functional anatomy of the head-neck movement system of quadrupedal and bipedal mammals."
Journal of anatomy 186 (Pt 1)(Pt 1): 55-74.

Grant, P. G. (1973).

"Biomechanical significance of the instantaneous center of rotation: the human temporomandibular joint."
Journal of biomechanics 6(2): 109-113.

Greenwood, K. and Oliver, J. J. (1978).

"Traumatic atlanto-occipital dislocation in two dogs."
Journal of the American Veterinary Medical Association 173(10): 1324-1327.

Griffon, D. J., McLaughlin Jr, R. and Roush, J. (1994).

"Vertical ground reaction force redistribution during experimentally induced shoulder lameness in dogs."
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology 7(04): 154-157.

Havig, M. E., Cornell, K. K., Hawthorne, J. C., McDonnell, J. J. and Selcer, B. A. (2005).

"Evaluation of nonsurgical treatment of atlantoaxial subluxation in dogs: 19 cases (1992-2001)."

Journal of the American Veterinary Medical Association 227(2): 257-262.

Headrick, J. (2012).

"A Description of the Movement of the Canine Pelvic Limb in Three Dimensions Using an Inverse Dynamics Method, and a Comparison of Two Techniques to Surgically Repair a Cranial Cruciate Ligament Deficient Stifle"

PhD diss, University of Tennessee.

Hildebrand, M. (1952).

"An analysis of body proportions in the Canidae."

American Journal of Anatomy 90(2): 217-256.

Hildebrand, M. (1965).

"Symmetrical gaits of horses."

Science 150(3697): 701-708.

Hildebrand, M. (1966).

"Analysis of the symmetrical gaits of tetrapods."

Folia biotheoretica 6: 9-22.

Hildebrand, M. (1968).

"Symmetrical gaits of dogs in relation to body build."

Journal of Morphology 124(3): 353-359.

Hildebrand, M. (1976).

Analysis of tetrapod gaits: general considerations and symmetrical gaits. Neural control of locomotion. Springer: 203-236.

Hirasaki, E., Moore, S. T., Raphan, T. and Cohen, B. (1999).

"Effects of walking velocity on vertical head and body movements during locomotion."

Experimental brain research 127(2): 117-130.

Hitz, M., Schütz, P., Angst, M., Taylor, W. R. and List, R. (2018).

"Influence of the moving fluoroscope on gait patterns."

PloS one 13(7): e0200608.

Hofstetter, M., Gedet, P., Doherr, M., Ferguson, S. J. and Forterre, F. (2009).

"Biomechanical analysis of the three-dimensional motion pattern of the canine cervical spine segment C4-C5."

Veterinary surgery 38(1): 49-58.

Hoyt, D. F., Wickler, S. J., Dutto, D. J., Catterfeld, G. E. and Johnsen, D. (2006).

"What are the relations between mechanics, gait parameters, and energetics in terrestrial locomotion?"

Journal of Experimental Zoology Part A: Comparative Experimental Biology 305(11): 912-922.

Ishii, T., Mukai, Y., Hosono, N., Sakaura, H., Nakajima, Y., Sato, Y., Sugamoto, K. and Yoshikawa, H. (2004).

"Kinematics of the upper cervical spine in rotation: in vivo three-dimensional analysis."

Spine 29(7): E139-E144.

Jeffery, N. D. (1996).

"Dorsal cross pinning of the atlantoaxial joint: new surgical technique for atlantoaxial subluxation."

Journal of small animal practice 37(1): 26-29.

Jenkins, F. A. and Camazine, S. M. (1977).

"Hip structure and locomotion in ambulatory and cursorial carnivores."

Journal of Zoology 181(3): 351-370.

Jeserevics, J., Srenk, P., Beranekl, J., Jaggy, A., Touru, S. and Cizinauskas, S. (2008).

"Stabilisation of atlantoaxial subluxation in the dog through ventral arthrodesis."
Schweizer Archiv für Tierheilkunde 150(2): 69-76.

Johnson, J. A., da Costa, R. C., Bhattacharya, S., Goel, V. and Allen, M. J. (2011).

"Kinematic motion patterns of the cranial and caudal canine cervical spine."
Veterinary surgery 40(6): 720-727.

Johnson, S. and Hulse, D. (1989).

"Odontoid dysplasia with atlantoaxial instability in a dog."
Journal of the American Animal Hospital Association 25(4): 400-404.

Kent, M., Eagleson, J. S., Neravanda, D., Schatzberg, S. J., Gruenenfelder, F. I. and Platt, S. R. (2010).

"Intraaxial spinal cord hemorrhage secondary to atlantoaxial subluxation in a dog."
Journal of the American Animal Hospital Association 46(2): 132-137.

Kishigami, M. (1984).

"Application of an atlantoaxial retractor for atlantoaxial subluxation in the cat and dog."
The Journal of the American Animal Hospital Association (USA).

König, S. A. and Spetzger, U. (2014).

Biomechanische Aspekte. Degenerative Erkrankungen der Halswirbelsäule: Therapeutisches Management im subaxialen Abschnitt. Springer Berlin Heidelberg: 19-24.

Kopp, K. I. (2019).

"Kinematik des Beckens und der kaudalen Lendenwirbelsäule beim Deutschen Schäferhund : eine Untersuchung mittels biplanarer Röntgenvideographie und Scientific Rotoscoping"
Doctoral Thesis, Justus-Liebig-Universität Gießen.

Krismer, M., Haid, C., Ogon, M., Behensky, H. and Wimmer, C. (1997).

"Biomechanics of lumbar instability."

Der Orthopäde 26(6): 516-520.

Krüger, W. (1937).

"Ueber den Bewegungsablauf an dem oberen Teil der Vordergliedmaße des Pferdes im Schritt, Trab und Galopp."

Tierärztliche Rundschau 43: 809-816.

Kupczynska, M., Wieladek, A. and Janczyk, P. (2012).

"Cranio-cervical junction in dogs revisited--new ligaments and confirmed presence of enthesis fibrocartilage."

Research in veterinary science 92(3): 356-361.

Layer, A. F. (2012).

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

Doctoral Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Leach, D., Sumner-Smith, G. and Dagg, A. (1977).

"Diagnosis of lameness in dogs: a preliminary study."

The Canadian Veterinary Journal 18(3): 58.

LeCouteur, R., McKeown, D., Johnson, J. and Eger, C. (1980).

"Stabilization of atlantoaxial subluxation in the dog, using the nuchal ligament."

Journal of the American Veterinary Medical Association 177(10): 1011-1017.

Lee, S.-W., Draper, E. R. C. and Hughes, S. P. F. (1997).

"Instantaneous Center of Rotation and Instability of the Cervical Spine: A Clinical Study."

Spine 22(6): 641-647.

Lorinson, D., Bright, R., Thomas, W., Selcer, R. and Wilkens, B. (1998).

"Atlanto-axial subluxation in dogs: the results of conservative and surgical therapy."
Canine practice, Santa Barbara, Calif.: 1990 (USA).

Loscher, D. M., Meyer, F., Kracht, K. and Nyakatura, J. A. (2016).

"Timing of head movements is consistent with energy minimization in walking ungulates."

Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 283(1843): 20161908.

Marino, D. J., Loughin, C. A., Dewey, C. W., Marino, L. J., Sackman, J. J., Lesser, M. L. and Akerman, M. B. (2012).

"Morphometric features of the craniocervical junction region in dogs with suspected Chiari-like malformation determined by combined use of magnetic resonance imaging and computed tomography."

American journal of veterinary research 73(1): 105-111.

McCarthy, R. J., Lewis, D. D. and Hosgood, G. (1995).

"Atlantoaxial subluxation in dogs."

The Compendium on continuing education for the practicing veterinarian (USA) 17:
215-227

McLaughlin, R. M. (2001).

"Kinetic and kinematic gait analysis in dogs."

The Veterinary clinics of North America. Small animal practice 31(1): 193-201.

McLear, R. and Saunders, H. (2000).

"Atlantoaxial mobility in the dog."

Veterinary Radiology & Ultrasound 41: 558.

Meershoek, L. and Van den Bogert, A. (2001).

"Mechanical analysis of locomotion."

Equine Locomotion (ed. W. Back and HM Clayton): 305-326.

Middleton, G., Hillmann, D. J., Trichel, J., Bragulla, H. H. and Gaschen, L. (2012).

"Magnetic resonance imaging of the ligamentous structures of the occipitoatlantoaxial region in the dog."

Veterinary Radiology & Ultrasound 53(5): 545-551.

Morgan, J. P., Miyabayashi, T. and Choy, S. (1986).

"Cervical spine motion: radiographic study."

American journal of veterinary research 47(10): 2165-2169.

Muybridge, E. (1887).

Animal locomotion: an electro-photographic investigation of consecutive phases of animal movements. 1872-1885. Philadelphia: J. B.

Lippincott Company.

Nickel, R., Seiferle, E. and Schummer, A. (1968).

Lehrbuch der Anatomie der Haustiere.

Paul Parey.

Nunamaker, D. M. and Blauner, P. D. (1985).

"Normal and abnormal gait."

Textbook of small animal orthopaedics 1083: 1095.

Off, W. and Matis, U. (1997).

"Ganganalyse beim Hund. Teil 1: Dynamometrische und kinemetrische Messverfahren und ihre Anwendung beim Tetrapoden."

Tierärztliche Praxis 25(1): 8-14.

Oliver, J. and Lewis, R. (1973).

"Lesions of the atlas and axis in dogs."

Journal of the American Animal Hospital Association 9: 303-313.

Onan, O. A., Heggeness, M. H. and Hipp, J. A. (1998).

"A motion analysis of the cervical facet joint."

Spine (Phila Pa 1976) 23(4): 430-439.

Owen, M., Richards, J., Clements, D., Drew, S., Bennett, D. and Carmichael, S. (2004).

"Kinematics of the elbow and stifle joints in greyhounds during treadmill trotting An investigation of familiarisation."

Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology 17(03): 141-145.

Ozak, A., Nisbet, H. O., Yardimci, C. and Sirin, Y. S. (2009).

"Stabilisation with dorsal and ventral fixation of a traumatic cervical instability in a dog."

Australian veterinary journal 87(10): 413-416.

Panjabi, M., Dvorak, J., Duranceau, J., Yamamoto, I., Gerber, M., Rauschnig, W. and Bueff, H. U. (1988).

"Three-dimensional movements of the upper cervical spine."

Spine 13(7): 726-730.

Panjabi, M. M., Crisco, J. J., Vasavada, A., Oda, T., Cholewicki, J., Nibu, K. and Shin, E. (2001).

"Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load–displacement curves."

Spine 26(24): 2692-2700.

Parker, A. and Park, R. (1974).

"Occipital dysplasia in the dog."

Journal of the American Animal Hospital Association 10: 520-525.

Parry, A. T., Upjohn, M. M., Schlegl, K., Kneissl, S. and Lamb, C. R. (2010).

"Computed tomography variations in morphology of the canine atlas in dogs with and without atlantoaxial subluxation."

Veterinary Radiology & Ultrasound 51(6): 596-600.

Pearcy, M. J. (1985).

"Stereo radiography of lumbar spine motion."
Acta Orthopaedica Scandinavica 56(sup212): 1-45.

Penning, L. (1978).

"Normal movements of the cervical spine."
American Journal of Roentgenology 130(2): 317-326.

Penning, L. and Badoux, D. M. (1987).

"Radiological study of the movements of the cervical spine in the dog compared with those in man."
Anatomia, histologia, embryologia 16(1): 1-20.

Platt, S. R., Chambers, J. N. and Cross, A. (2004).

"A modified ventral fixation for surgical management of atlantoaxial subluxation in 19 dogs."
Veterinary surgery 33(4): 349-354.

Pozzo, T., Berthoz, A. and Lefort, L. (1990).

"Head stabilization during various locomotor tasks in humans."
Experimental brain research 82(1): 97-106.

Pujol, E., Bouvy, B., Omana, M., Fortuny, M., Riera, L. and Pujol, P. (2010).

"Use of the Kishigami Atlantoaxial Tension Band in eight toy breed dogs with atlantoaxial subluxation."
Veterinary surgery 39(1): 35-42.

Reber, K., Burki, A., Vizcaino Reves, N., Stoffel, M., Gendron, K., Ferguson, S. J. and Forterre, F. (2013).

"Biomechanical evaluation of the stabilizing function of the atlantoaxial ligaments under shear loading: a canine cadaveric study."
Veterinary surgery 42(8): 918-923.

Riedinger, B., Bürki, A., Stahl, C., Howard, J. and Forterre, F. (2015).

"Biomechanical Evaluation of the Stabilizing Function of Three Atlantoaxial Implants Under Shear Loading: A Canine Cadaveric Study."
Veterinary surgery 44(8): 957-963.

Rizzi, M. A., Covelli, B., Bivetti, J. and Lüthi, B. (1977).

"Biomechanisches Verhalten der Wirbelsäule-Segmente."
Archiv für orthopädische und Unfall-Chirurgie, mit besonderer Berücksichtigung der Frakturenlehre und der orthopädisch-chirurgischen Technik 87(1): 111-116.

Rochat, M. and Shores, A. (1999).

"Fixation of an atlantoaxial subluxation by use of cannulated screws."
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology 12(01): 43-46.

Rubenson, J., Heliams, D. B., Lloyd, D. G. and Fournier, P. A. (2004).

"Gait selection in the ostrich: mechanical and metabolic characteristics of walking and running with and without an aerial phase."
Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 271(1543): 1091.

Rumph, P., Lander, J., Kincaid, S., Baird, D., Kammermann, J. and Visco, D. (1994).

"Ground reaction force profiles from force platform gait analyses of clinically normal mesomorphic dogs at the trot."
American journal of veterinary research 55(6): 756-761.

Rumph, P. F., Steiss, J. E. and Montgomery, R. D. (1997).

"Effects of selection and habituation on vertical ground reaction force in greyhounds."
American journal of veterinary research 58(11): 1206-1208.

Rylander, H. and Robles, J. C. (2007).

"Diagnosis and treatment of a chronic atlanto-occipital subluxation in a dog."
Journal of the American Animal Hospital Association 43(3): 173-178.

Saleh, M. and Murdoch, G. (1985).

"In defence of gait analysis. Observation and measurement in gait assessment."
The Journal of bone and joint surgery. British volume 67(2): 237-241.

Salomon, F. V., Geyer, H. and Gille, U. (2005).

Anatomie für die Tiermedizin.
Enke.

Sanchez-Masian, D., Lujan-Feliu-Pascual, A., Font, C. and Mascort, J. (2014).

"Dorsal stabilization of atlantoaxial subluxation using non-absorbable sutures in toy breed dogs."
Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 27(1): 62-67.

Sanders, S. G., Bagley, R. S., Silver, G. M., Moore, M. and Tucker, R. L. (2004).

"Outcomes and complications associated with ventral screws, pins, and polymethyl methacrylate for atlantoaxial instability in 12 dogs."
Journal of the American Animal Hospital Association 40(3): 204-210.

Schilling, N. and Carrier, D. R. (2010).

"Function of the epaxial muscles in walking, trotting and galloping dogs: implications for the evolution of epaxial muscle function in tetrapods."
Journal of Experimental Biology 213(9): 1490-1502.

Schlegel, K., Parry, A. T., Lamb, C. R., Kneiss, S., Probst, A., Tichy, A. and Mayrhofer, E. (2010).

"X-ray and CT morphology of atlas variants in the dog."
Berliner und Münchener tierärztliche Wochenschrift 123(9-10): 425-430.

Schmaltz, R. (1922).

"Die Analyse der Gangarten des Pferdes durch den Film."
Berliner Tierärztliche Wochenschrift 38: 523-527.

Schulz, K. S., Waldron, D. R. and Fahie, M. (1997).

"Application of ventral pins and polymethylmethacrylate for the management of atlantoaxial instability: results in nine dogs."

Veterinary surgery 26(4): 317-325.

Schwencke, M., Smolders, L. A., Bergknut, N., Gustås, P., Meij, B. P. and Hazewinkel, H. A. (2012).

"Soft tissue artifact in canine kinematic gait analysis."

Veterinary surgery 41(7): 829-837.

Scott, H. and Witte, P. (2011).

"Investigation of lameness in dogs."

In Practice 33(1): 20.

Seireg, A. and Arvikar, R. (1973).

"A mathematical model for evaluation of forces in lower extremities of the musculo-skeletal system."

Journal of biomechanics 6(3): 313-322.

Sharir, A., Milgram, J. and Shahar, R. (2006).

"Structural and functional anatomy of the neck musculature of the dog (*Canis familiaris*)."

Journal of anatomy 208(3): 331-351.

Shores, A. and Tepper, L. C. (2007).

"A modified ventral approach to the atlantoaxial junction in the dog."

Veterinary surgery 36(8): 765-770.

Simoens, P., Poels, P. and Lauwers, H. (1994).

"Morphometric analysis of the foramen magnum in Pekingese dogs."

American journal of veterinary research 55(1): 34-39.

Spörl, I. (2014).

"Zur okzipitalen Dysplasie des Foramen magnum und Morphometrie des Atlas beim Hund: eine computertomographische Studie."

Doctoral Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Stalin, C., Gutierrez-Quintana, R., Faller, K., Guevar, J., Yeamans, C. and Penderis, J. (2015).

"A review of canine atlantoaxial joint subluxation."

Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 28(1): 1-8.

Stead, A., Anderson, A. and Coughlan, A. (1993).

"Bone plating to stabilize atlantoaxial subluxation in four dogs."

Journal of Small Animal Practice 34(9): 462-465.

Steffen, F., Flueckiger, M. and Montavon, P. M. (2003).

"Traumatic atlanto-occipital luxation in a dog: associated hypoglossal nerve deficits and use of 3-dimensional computed tomography."

Veterinary surgery 32(5): 411-415.

Stigen, Ø., Aleksandersen, M., Sørby, R. and Jørgensen, H. J. (2013).

"Acute non-ambulatory tetraparesis with absence of the dens in two large breed dogs: case reports with a radiographic study of relatives."

Acta Veterinaria Scandinavica 55(1): 31.

Takahashi, F., Hakozi, T., Kanno, N., Harada, Y., Yamaguchi, S. and Hara, Y. (2017).

"Evaluation of the dens-to-axis length ratio and dens angle in toy-breed dogs with and without atlantoaxial instability and in healthy Beagles."

American journal of veterinary research 78(12): 1400-1405.

Thomas, W. B., Sorjonen, D. C. and Simpson, S. T. (1991).

"Surgical management of atlantoaxial subluxation in 23 dogs."

Veterinary surgery 20(6): 409-412.

Van den Bogert, A., Van Weeren, P. and Schamhardt, H. (1990).

"Correction for skin displacement errors in movement analysis of the horse."

Journal of biomechanics 23(1): 97-101.

Van Ee, R., Pechman, R. and Van Ee, R. (1989).

"Failure of the atlantoaxial tension band in two dogs."

The Journal of the American Animal Hospital Association (USA).

Voss, K., Imhof, J., Kaestner, S. and Montavon, P. (2007).

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

Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology.

Voss, K., Steffen, F. and Montavon, P. (2006).

"Use of the ComPact UniLock System for ventral stabilization procedures of the cervical spine."

Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology 19(01): 21-28.

Wachs, K. (2015).

"Kinematische Analyse von 3D-rekonstruierten Bewegungen der Lendenwirbelsäule und des Beckens beim Beagle in Schritt und Trab"

Doctoral Thesis, Tierärztlichen Hochschule Hannover.

Wang, J. and Blackburn, T. J. (2000).

"The AAPM/RSNA physics tutorial for residents: X-ray image intensifiers for fluoroscopy."

Radiographics 20(5): 1471-1477.

Watson, A. and Stewart, J. (1990).

"Postnatal ossification centers of the atlas and axis in miniature schnauzers."

American journal of veterinary research 51(2): 264-268.

Watson, A. G., de Lahunta, A. and Evans, H. E. (1988).

"Morphology and embryological interpretation of a congenital occipito-atlanto-axial malformation in a dog."

Teratology 38(5): 451-459.

Watson AG, d. L. A. (1989).

"Atlantoaxial subluxation and absence of transverse ligament of the atlas in a dog."

J Am Vet Med Assoc.

Watson, A. G., Evans, H. E. and Lahunta, A. (1986).

"Gross Morphology of the Composite Occipito-Atlas-Axis Joint Cavity in the Dog*."

Anatomia, Histologia, Embryologia 15(2): 139-146.

Watson, A. G., Evans, H. E. and Lahunta, A. (1986).

"Ossification of the Atlas-Axis Complex in the Dog*."

Anatomia, Histologia, Embryologia 15(2): 122-138.

Watson, A. G., Lahunta, A. and Evans, H. E. (1989).

"Dorsal notch of foramen magnum due to incomplete ossification of supraoccipital bone in dogs."

Journal of Small Animal Practice 30(12): 666-673.

Wheeler, S. (1986).

"Surgical conditions of the canine spine."

British Veterinary Journal 142(2): 95-115.

Wheeler, S. J. and Sharp, N. J. (1994).

Small animal spinal disorders, diagnosis and surgery.

Mosby-Wolfe Publishers.

Wiedmer, L. and Forterre, F. (2016).

"Therapie der atlantoaxialen Instabilität beim Hund."

kleintier konkret 19(05): 29-37.

Wolfla, C. E. (2006).

"Anatomical, biomechanical, and practical considerations in posterior occipitocervical instrumentation."

The Spine Journal 6(6): S225-S232.

Zhao, X., Wu, Z.-x., Han, B.-j., Yan, Y.-b., Zhang, Y. and Lei, W. (2013).

"Three-dimensional analysis of cervical spine segmental motion in rotation."

Archives of medical science: AMS 9(3): 515.

Zsoldos, R., Groesel, M., Kotschwar, A., Kotschwar, A., Licka, T. and Peham, C. (2010).

"A preliminary modelling study on the equine cervical spine with inverse kinematics at walk."

Equine Veterinary Journal 42: 516-522.

Ich erkläre: Ich habe die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen, die ich in der Dissertation angegeben habe, angefertigt. 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 wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Nicola Kelleners



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: 978-3-8359-6816-5

