

Aus dem Department für Kleintiere und Pferde
der Veterinärmedizinischen Universität Wien

Universitätsklinik für Pferde
(Leiterin: Univ.-Prof. Dr.med.vet. Florian Jenner, Dipl.ACVS Dipl.ECVS)

**Deskriptive kinematische Erstbeschreibung
der Kaubewegung von Ponys durch intraossäre Tantal-Markerkugeln
mittels biplanarer Hochfrequenz-Fluoroskopie**

Diplomarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

vorgelegt von
Lisa-Hélène Wagner

Wien, im Juni 2020

BetreuerIn: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Peham
Veterinärmedizinische Universität Wien
Department für Kleintiere und Pferde
Universitätsklinik für Pferde
Team der Bewegungsanalyse Movements Science Group

Dr.med.vet. Sandra Geiger
Veterinärmedizinische Universität Wien
Institut für Topographische Anatomie

Begutachter: Univ.-Prof. Dr.med.vet. Eberhart Ludewig, Dipl. ECVDI
Veterinärmedizinische Universität Wien
Department für Kleintiere und Pferde
Klinische Abteilung für Bildgebende Diagnostik

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Literaturübersicht.....	7
2.1	Anatomische Grundlage:	7
2.2	Übersicht über die Biomechanik der Kaubewegungen	8
2.3	Chronologische Übersicht der beschriebenen Methoden	9
	Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie	13
2.3.1	Grundlagen.....	13
2.3.2	Biplanare Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie.....	13
3	Material und Methoden	16
3.1	Tiere	16
3.2	Markerpositionen	17
3.3	Computertomographie und Modellerstellung.....	19
3.4	Biplanare Röntgenvideoaufnahme	20
3.5	Entzerrung und Kalibration	21
3.6	Markerbasiertes Tracking	22
3.7	Animation der Schädelmodelle und Rohdatenbearbeitung.....	23
3.8	Datenauswertung und Statistik	24
4	Ergebnisse.....	26
4.1	Gruppenauswertung	26
4.1.1	Unterkieferbewegungen.....	26
4.2	Einzelergebnisse	28
4.2.1	Pony 1	29
4.2.2	Pony 2	31
4.2.3	Pony 3	34
4.2.4	Pony 4	37

4.2.5	Pony 5	39
5	Diskussion	42
6	Zusammenfassung	46
7	Summary	48
8	Abkürzungsverzeichnis	50
8.1	Alphabetisch	50
8.2	Andere	50
9	Literaturverzeichnis.....	51
10	Abbildungs-/Tabellenverzeichnis.....	55
11	Danksagung.....	57

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten wurde dem Kauapparat des Pferdes einige wissenschaftliche Aufmerksamkeit zuteil, da viele klinische Fragestellungen wie gastrointestinale Erkrankungen und Koliken sowie Rittigkeitsproblematik durch Pathologien in diesem Bereich verursacht werden können (Baker und Easley 2005).

Einige Arbeitsgruppen haben sich intensiv mit der Untersuchung des *Cavum oris* (Baker 1998; Scrutchfield und Schumacher 1993), den Erkrankungen des Zahnapparats (Brigham und Duncanson 2000; Dixon 2002; Dixon und Dacre 2005; Guerra S. et al. 2016; DeLorey 2007) sowie der Durchführung und Auswirkung von Zahnkorrekturen (Easley 1998a, 1998b; Dixon 2000; Graham 2002) beschäftigt. Es wurden zudem einige Veröffentlichungen zum Thema Beweglichkeit des Kiefers (Carmalt et al. 2003; Rucker 2004; Bonin et al. 2007) und des Kiefergelenks (Baker 2002; Bonin et al. 2006) publiziert. Die Kaubewegung und das Bewegungsmuster eines Kauzyklus beim Pferd wurde vergleichsweise wenig untersucht (Niederl 2007).

Leue (Leue 1941; Leue 1944) machten den Beginn und beschäftigte sich damit, wie sich die Kaubilder im Hinblick auf verschiedene Zahnpathologien verändern und wie diese mit der Anfälligkeit für gastrointestinale Erkrankungen und Koliken zusammen hängen. Baker (1999) erarbeitete als Erster eine Einteilung des Kauzyklus in einzelne Kauzyklusphasen, *opening stroke*, *closing stroke* und *power stroke*. Diese Einteilung wurde in den meisten darauffolgenden Arbeiten übernommen. Bonin et al. (2006) haben in erster Linie die Bewegungen des Kiefergelenks mithilfe eines optoelektronischen Messsystems dargestellt. Anen (2008) und Niederl (2007) untersuchten die Auswirkung von Zahnbehandlungen auf das Aussehen des Kauzyklus. Diese kinematischen Messungen mit optoelektronischen Messsystemen sind alle auf die Verwendung von verhältnismäßig ortsstabilen hautfixierten Markern zurückzuführen. Im Zuge dieser Arbeiten kam immer wieder die Vermutung auf, dass sich die Verschieblichkeit der Haut auf die gemessenen Ergebnisse auswirken kann. Um den dadurch entstehenden Fehler so gering wie möglich zu halten, wurden die verwendeten Marker an Lokalisationen am Schädel fixiert, an denen sich wenig subkutan Gewebe und Muskulatur zwischen dem darunter liegenden Knochen und der Haut befanden. Trotz der möglichst günstig gewählten Markerlokalisierung kann ein verzerrender Effekt durch die Hautverschieblichkeit, nicht vollends ausgeschlossen werden.

Eine weitere Einteilung des Kauzyklus kann mittels Kaurichtung getroffen werden. Laut Baker (2002) und Bonin et al. (2006) haben manche Probanden eine bevorzugte Kaurichtung, wohingegen bei Niederl (2007) und Simhofer (2011) die meisten Probanden die Kaurichtung änderten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Kaubewegung von Ponys durch intraossäre Tantal-Markerkugeln mittels biplanarer Hochfrequenz-Fluoroskopie in einer deskriptiven kinematischen Erstbeschreibung darzustellen. Diese intraossären Marker sind unbeeinflusst durch die Verschieblichkeit der Haut und ermöglichen die direkte Übertragung der dargestellten Markerbewegungen auf den Schädelknochen und die *Mandibula*. Somit wird der Fehler durch mögliche Verschiebung der Haut eliminiert. Die verwendete Methode ermöglicht eine dreidimensionale Darstellung des Kauvorgangs sowie die kinematische Analyse der gewonnenen Daten. Bisher sind keine weiteren Daten mit dieser Methode publiziert worden, die zu einem direkten Vergleich herangezogen werden können.

Hypothesen:

1. Die Kauzyklen, welche in diesem Versuch durch biplanare Hochfrequenz-Fluoroskopie aufgezeichnet wurden, unterscheiden sich in der Literatur von optoelektronisch aufgezeichneten.
2. Die intraindividuelle Kaurichtung ist variabel.

2 Literaturübersicht

2.1 Anatomische Grundlage:

Die Anatomie vom Pferdeschädel ist Bestandteil jedes gebräuchlichen Lehrbuches über die Anatomie der Haussäugetiere im Allgemeinen (Frewein et al. 2004; Salomon und Geyer 2011; König und Liebich 2015) oder die des Equiden im Speziellen (Budras 2009; Wissdorf 2011). Nachfolgend wird hauptsächlich auf die für diese Arbeit relevanten Aspekte näher eingegangen (Hagebeuker 2017).

Die knöcherne Grundlage des Kopfes wird von den Schädelknochen gebildet. Der größte Teil des Gesichtsschädels bildet die *Maxilla* (Oberkieferknochen). Der größte Schädelknochen beim Pferd ist die *Mandibula* (Unterkieferknochen). Im kaudalen Bereich des Unterkieferknochens befindet sich die Gelenkwalze, die mit der *Fossa mandibularis* des *Os temporale* artikuliert. Die Verbindung zwischen *Maxilla* und *Mandibula* wird durch das Kiefergelenk – *Articulatio temporomandibularis* hergestellt. Das Gelenk ist ein inkongruentes Walzengelenk und wird von dem *Discus articularis* zweigeteilt, welcher aus Faserknorpel besteht. Damit setzt sich das Kiefergelenk aus zwei Gelenkhöhlen zusammen, die durch die *Membranae synoviales dorsales* und *ventrales* gebildet werden – eine geräumige dorsale und eine kleinere ventrale Gelenkhöhle. Die Kapsel des Kiefergelenks wird durch zwei Bänder verstärkt, das straffe *Ligamentum laterale* und das elastische *Ligamentum caudale* (Frewein et al. 2004; Baker 2002; Budras 2009; Salomon et al. 2008; König und Liebich 2005).

2.2 Übersicht über die Biomechanik der Kaubewegungen

Kauen ist eine komplexe dreidimensionale (3D) Bewegung, welche aus wiederholten Unterkieferbewegungen besteht. Diese wird durch die gepaarten Kiefergelenke (engl. *temporomandibular joints*, TMJ) spezifiziert und begrenzt (Simhofer et al. 2011).

Bestehende Bewegungsmöglichkeiten des Kiefergelenks:

- Öffnung bzw. Schließung des Mauls
- Seitwärtsbewegung für die Mahlarbeit beim Kauen
- Senken und Heben der *Mandibula*
- Vor- und Zurückschieben der *Mandibula*

(Frewein et al. 2004)

Im Vergleich hierzu kann beim Fleischfresser kaum von eigentlichem Kauen gesprochen werden. Diese besitzen ein Scherengebiss und können hauptsächlich ein Auf- und Abbewegen des Unterkiefers praktizieren. Zudem schlingen Fleischfresser ihre Nahrung herunter oder zertrümmern sie zuerst und verschlingen sie anschließend. Schweine hingegen zerquetschen ihre Nahrung zwischen ihren schmelzhöckrigen Backenzähnen. Pflanzenfresser sind die einzigen Tiere, die ihre rohfaserige Nahrung durch Mahlbewegungen zerkleinern (Frewein et al. 2004).

Zwischen dem Ober- und Unterkiefer des Pferdes besteht eine physiologische Anisognathie. Der linguale Kauflächenrand der Unterkieferzähne ist höher als der bukkale Rand. Im Oberkiefer ist es umgekehrt. Hier ist der bukkale Kauflächenrand höher als der palatinale Rand (König und Liebich 2005; Salomon et al. 2008; Niederl 2007).

Neben dem Öffnen und Schließen ist eine Schiebebewegung möglich, welche beim Pferd durch dessen anisognathe Gebissform in einer mahlenden Kaubewegung mit starker Seitwärtsbewegung des Unterkiefers resultiert. Durch die laterale Mahlbewegung wird die Kaufläche annähernd gleichförmig abgerieben (Budras 2009). Der *Discus articularis* ermöglicht einerseits eine Scharnierbewegung zwischen ihm und der *Mandibula* und andererseits eine Gleitbewegung zwischen sich und der *Fossa mandibularis* (König und Liebich 2005).

Der Kauvorgang lässt sich im Wesentlichen in drei Phasen einteilen und läuft annähernd elliptisch ab. Die erste Phase stellt das Öffnen des Maules und die laterale Auslenkung des Unterkiefers dar. Die zweite Phase entspricht dem Kieferschluss, welcher in einer bogenförmigen Bewegung abläuft. Die letzte Phase ist die Mahlphase. Dies ist der einzige Zeitpunkt, bei dem es zu einer Berührung zwischen Ober- und Unterkiefer kommt und das Futter zermahlen wird. Diese Mahlbewegung verläuft quer zur Kopfachse. Der Druck von der Zunge drückt die zerkleinerten Partikel gegen die Gaumenkämme und durch die rotierende Wirkung des Kauens in Kombination mit der Kompression von Zunge und Wange wird die Nahrung spiralförmig kaudal bewegt (Frewein et al. 2004; Dixon und Dacre 2005).

2.3 Chronologische Übersicht der beschriebenen Methoden

Die ersten wissenschaftlichen Analysen von Kaubewegungen wurden von Leue (1941) durchgeführt. Dieser erfand ein mechanisches Gerät, mit welchem man zwei-dimensionale Kaubewegungen aufzeichnen konnte, den so genannten Molographen (Abb. 1, Abb. 2). Dieses Gerät passt über den Ober- und Unterkiefer des Pferdes und zeichnet die Unterkieferbewegung nach. Leue identifizierte den Zusammenhang von Zahnveränderungen und damit verbundenen Auswirkungen auf die Kaubewegungen. Er teilte die Kaubilder in drei

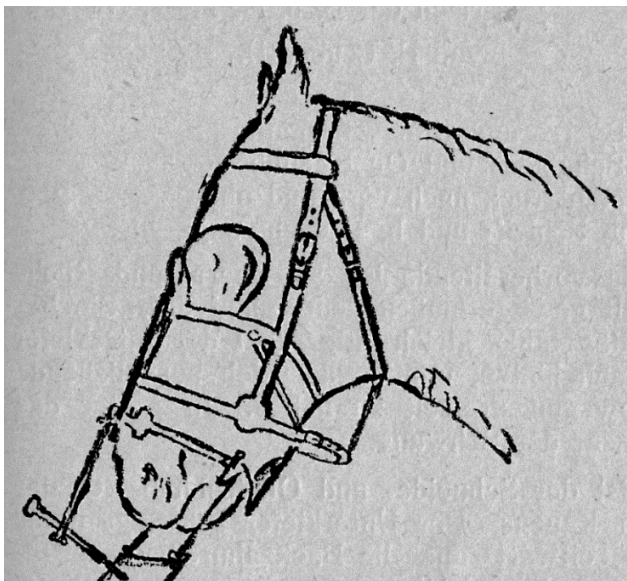


Abb. 1: Kauzeichner und Kaubild von P. Leue aus (Leue 1941)

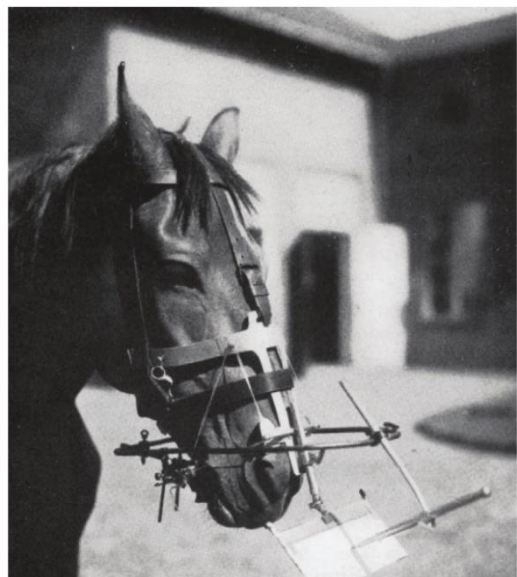


Abb. 2: Molograph nach Leue (Joest 1969)

Formen ein: die Ovalen, die Spitzkehrigen und die Eingebuchteten. Spitzkehrige und eingebuchtete Formen der Mologramme wiesen auf Gebissveränderungen hin. Zudem sah Leue (1941) einen Zusammenhang zwischen Gebissveränderungen und Krankheitsbildern und empfahl in der Zucht mehr auf zahngesunde Pferde zu selektieren.

Andere Techniken wie die Magnetometrie (Plesh et al. 1993) waren seither weniger zufriedenstellend. Entweder waren sie übermäßig aufwendig oder mit biologischem Risiko verbunden, wie zum Beispiel die Radionuklide-Tracking Verfahren (Salomon und Waysenson 1979).

Baker (1999) erschloss seine Daten durch Videoaufzeichnungen, indem er die Pferde in Frontalansicht beim Fressen filmte und anschließend jedes einzelne Bild auswertete. Baker teilte den Kauzyklus in drei Abschnitte ein (Abb. 3):

1. „*opening stroke*“: Öffnungsphase des Mauls
2. „*closing stroke*“: Maulschluss
3. „*power stroke*“: Mahlphase

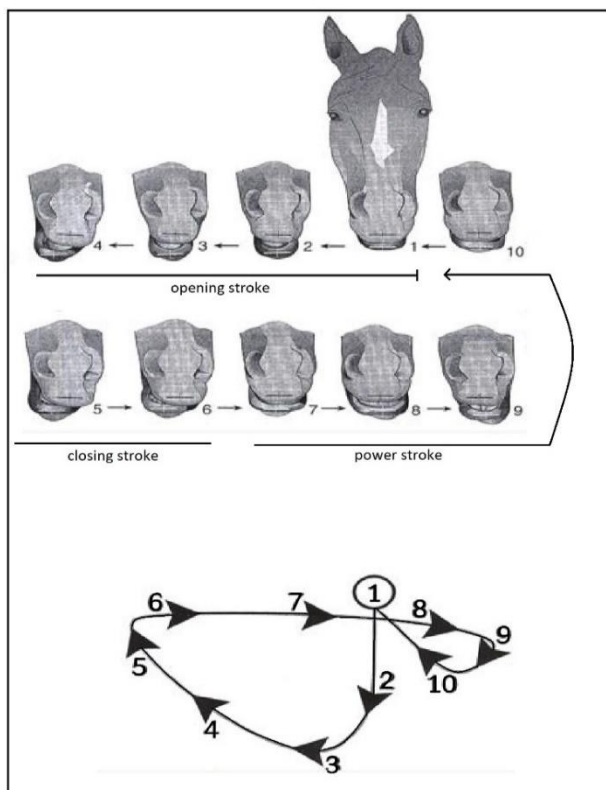


Abb. 3: Kauzyklus wie dieser von Baker dargestellt wurde (Baker 1998)

Während des Eröffnungshubs wird der Unterkiefer in ventrorostrolateraler Richtung bewegt, bis der Punkt der maximalen ventralen Exkursion erreicht ist. Beim Schließhub wird der Unterkiefer dann auf die gegenüberliegende Seite bewegt, in dorsokaudo-laterale Richtung, bis die Backenzähne einer Seite Kontakt aufnehmen. Beim Krafthub scheren die okklusalen Flächen der Zähne des Unterkiefers in laterodorsaler Richtung über ihre Gegenstücke im Oberkiefer. Der Krafthub endet am dorsalsten Punkt des Kauzyklus (Simhofer et al. 2011).

Eine weitere Einteilung kann mittels Kaurichtung getroffen werden. Zum einen kann diese aus Sicht des Pferdes getroffen

werden. Hierbei werden diese in Rechts- und Linkskauer eingeteilt. Zum anderen kann die Kauichtung aus Frontalsicht des Pferdes bestimmt werden. Diese erfolgt dann in *clockwise* bzw. *counter-clockwise* (Baker 1999).

Bonin et al. (2006) haben in erster Linie die Bewegungen des Kiefergelenks mit Hilfe eines optoelektronischen Messsystems dargestellt. Es wurden vier Pferden jeweils zwölf Hautmarker an definierten Knochenpunkten angebracht und ein virtueller Marker wurde errechnet. Die Einteilung eines Kauzyklus in „*opening-stroke*“, „*closing-stroke*“ und „*power-stroke*“ wurde von Baker (1999) übernommen. Bonin et al. (2006) nehmen an, dass die Bewegung des Kiefergelenks durch die Zahnabnutzung und das Vorhandensein von Malokklusionen beeinflusst werden würde. Sie zeigen auf, dass das Abrunden und Glätten der Zahnarkaden, auch als Dental-Floating bekannt, die Kiefergelenksbeweglichkeit in rostrokaudaler Richtung positiv beeinflussen.

Niederl (2007) hat die Kaubewegungen dreidimensional mittels optoelektronischem Messsystem bestimmt. Es wurden drei Messungen vor jeder Zahnbehandlung im Zeitraum von einer Woche durchgeführt. Die Einteilung des Kauzyklus wurde von Baker (1999) übernommen. Die Kauzyklen wiesen die gleiche Grundbewegung wie die von Baker (1999) auf. Allerdings konnte der schleifenartige Verlauf am Ende des Kauvorgangs von Niederl (2007) nicht bestätigt werden. Zur Verwendung kamen zehn Markerbälle, welche an definierten Lokalisationen am Pferdeschädel befestigt wurden. Zur Auswertung wurde Marker neun, welcher die invariabelsten Messergebnisse aufwies und am Kaudalrand der *Sutura intermandibularis* lokalisiert war, verwendet.

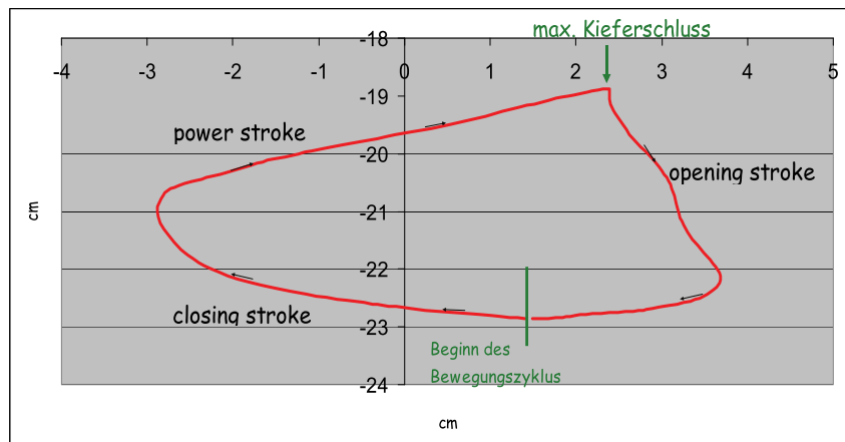


Abb. 4: Abbildung eines Kauzyklus (Niederl, 2007) - Frontalansicht, der im Uhrzeigersinn („clockwise“) verläuft (Y- und Z-Achse)

Anen (2008) hat das selbe Messsystem wie Niederl (2007) verwendet. Sie hat die Kauzyklen von 15 Pferden vor und nach einer Zahnbehandlung aufgezeichnet und analysiert. Die Grundbewegung der Kauzyklen entsprach ebenfalls der von Baker (1999) beschriebenen. Jedoch fehlte die von ihm beschriebene Schleife am Ende des Kauvorgangs. Zudem konnten signifikante Unterschiede vor und nach den Zahnbehandlungen in der rostrokaudalen Unterkieferauslenkung und bei manueller Auswertung des „*power strokes*“ festgestellt werden. Im Hinblick auf die Kauichtung (rechts, links, *clockwise*, *counterclockwise*) konnte dargestellt werden, dass Pferde zwischen zwei Messungen die Richtung änderten, aber nicht innerhalb einer Aufnahme.

Einen weiteren großen Einfluss auf die Kaubewegung stellt die Beschaffenheit des Futters dar. Das Ausmaß der lateralen Exkursion der *Mandibula* und die Kaufrequenz wird hierdurch maßgeblich beeinflusst (Leue 1941; Bonin et al. 2007; Collinson 1994; Baker 2002).

Infolge eines geringen Futters volumens und der gesteigerten Kaufrequenz verbringen Pferde, welche eine kraftfutterreichere Ernährung erhalten, weniger Zeit mit Kauen als Pferde mit einer rohfaserreicheren Fütterung. Das kann zu einem Überwachsen des Zahnschmelzes führen (Bonin et al. 2007). Während übermäßiges Überwachsen von Zähnen und Parodontitis schmerzhaft Zustände sind, die die Kautätigkeit stark beeinträchtigen können (Dixon und

Dacre 2005), kann selbst das Vorhandensein von weniger schweren Überwucherungen die normale Kinematik des Unterkiefers negativ beeinflussen (Simhofer et al. 2011).

Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie

2.3.1 Grundlagen

Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie stellt einen Zusammenschluss von Fluoroscopen und Hochgeschwindigkeitskameras dar, mit denen Röntgenvideos aufgenommen werden. Sehr stark vereinfacht besteht eine fluoreszenzkinematographische Einheit aus einem Röntgenstrahlenabgebenden und einem Röntgenstrahlendetektierenden Teil.

Der detektierende Teil wandelt die Röntgenstrahlung anschließend in ein Bild um (Brainerd et al. 2010). Dieses Umwandeln entsteht in der Fluoreszenzschicht, welche die Energie der Röntgenstrahlen mit Hilfe einer Fotokathode in sichtbare Wellenlängen umwandelt. Anschließend werden die sichtbaren Photonen durch den Bildverstärker multipliziert und so kommen diese zu Tausenden an der Hochgeschwindigkeitskamera an (Wang und Blackburn 2000). Dies macht es möglich, ein Bild in Echtzeit zu generieren (van Lysel 2000). Notwendig ist auch das Ankoppeln einer Hochfrequenzkamera (Brainerd et al. 2010). Diese ermöglicht die Aufzeichnung von Bildsequenzen mit hoher Bildwiederholungsrate. Hierbei ist es möglich ein einzelnes (uniplanar) oder zwei synchrone (biplanar) Röntgenvideos aufzunehmen, um anschließend, mithilfe von computertomographischen Modellen, die dreidimensionale Rekonstruktion und Animation von Knochen zu erstellen. Diese ermöglichen hochpräzise Messungen der Bewegungen der animierten Knochen (Brainerd et al. 2010; Geiger 2017).

2.3.2 Biplanare Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie

Bei der biplanaren Fluoreszenzkinematographie kommen zwei fluoreszenzkinematographischen Einheiten zum Einsatz. Ziel hierbei ist es, die aufgenommene Bewegung mittels Computeranimation in 3D zu analysieren.

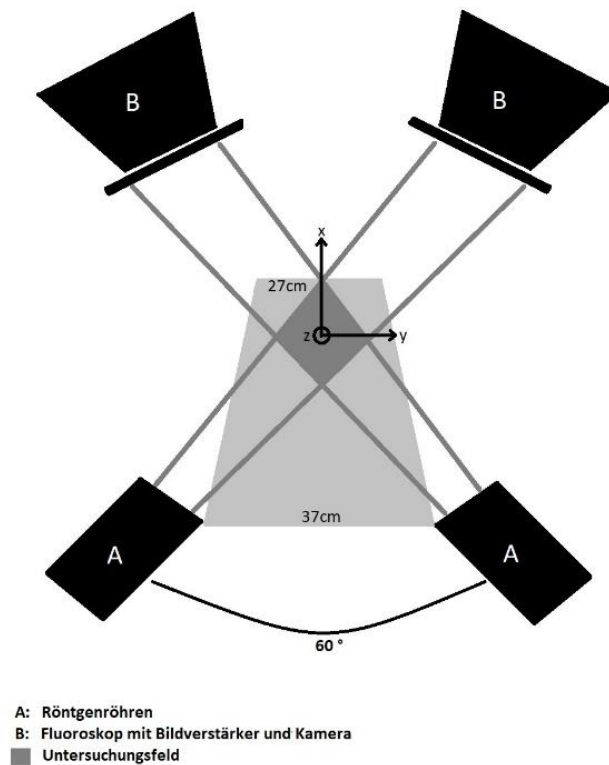


Abb. 5: Schematische Darstellung der hochfrequenz-fluoreszenzkinematischen Anlage, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig

You et al. (2001) beschrieben erstmals diese Methode und wendeten sie bei der Untersuchung der caninen sowie humanen Kniebewegung an. Brainerd et al. (2010) adaptierten diese Methode und stärkten diese mit öffentlich zugänglichen Skripten für die Entzerrung, Kalibration, Animation und Bewegungsanalyse (www.xromm.org). Die Anordnung der fluoreszenzkinematographischen Einheiten erfolgt so, dass sich deren Zentralstrahlen idealerweise in einem 90° Winkel kreuzen. So ergibt sich ein sich überlagerndes Feld von ca. 6000 cm^3 Volumen (etwa so groß wie ein Fußball). Damit die beiden Kameras gleichzeitig anlaufen und zeitlich synchrone Videos aufnehmen, müssen die Kameras auf Hardwareebene aktiviert werden. Zur Erstellung eines Computermodells muss der Versuchsraum dreidimensional kalibriert werden. Hierfür wird eine biplanare Aufnahme von einem Kubus aus Lego®-Steinen (LEGO System A/S, DK-7190 Billund, Dänemark) (Abb. 10), bestehend aus vier gleich weit entfernten Ebenen, mit 64 eingelassenen Tantal kugeln (X-medics Scandinavia S.M.B.A Sankt Knuds Vej 11, KLD-TH DK-1903 Frederiksberg Dänemark) von 1,6 mm Durchmesser im Abstand von 6,5 cm genutzt. Die dargestellten Positionen der Kugeln in den Röntgenvideos werden dann mit ihren realen

Positionen im Kubus abgeglichen und so auf ihre Anordnung im Raum rückgeschlossen (Knörlein et al. 2016). Anschließend kann eine Rekonstruktion der Versuchsanordnung am Computer durchgeführt werden und die Oberflächenmodelle der untersuchten Knochen erstellt werden. Diese werden mit der Rekonstruktion des Versuchsaufbaus und den Röntgenvideos kombiniert und mittels einer Matching- oder Tracking- Technologie wie z.B. Markertracking kann eine dreidimensionale Knochenbewegung konstruiert werden (Brainerd et al. 2010).

3 Material und Methoden

Der Tierversuchsantrag A22/17 wurde von Herr Prof. Dr.med. vet. Mülling dem Leiter des Veterinär-Anatomischen Instituts der Veterinärmedizinischen Fakultät Leipzig gestellt und von der Landesdirektion Sachsen genehmigt worden. Der Versuch war nicht invasiv und beschränkte sich auf ein Mindestmaß an notwendigen Versuchsdurchgängen. Den Tieren wurde durch den Versuch keine Schmerzen, Leiden oder Schäden zugefügt. Die Strahlenbelastung durch die röntgenkinematographische Anlage war sehr gering, woraus sich keine Erhöhung des Sterberisikos ergab. Aufgrund des Versuchsaufbaus war kein Anbinden und Sedieren der Tiere möglich, daher war es unabdinglich, dass sich das Untersuchungspersonal mit im Raum befand. Es wurden alle strahlenschutzrechtlichen Maßnahmen entsprechend den zum Untersuchungszeitraum geltenden Rechtsvorschriften getroffen für das Untersuchungspersonal getroffen, sodass die Strahlenexposition so gering wie möglich ausfiel. Derzeit gelten das Strahlenschutzgesetz (Recht 2020) und die Strahlenschutzverordnung (Recht 2019). Immer vorliegend war die Strahlenschutzanweisung explizit zu dieser hochfrequenz-fluoreszenzkinematographischen Anlage.

Die biplanare fluoroskopische Kinematografie ist der aktuelle Goldstandard zur in vivo Bestimmung der dreidimensionalen Kinematik beim Mensch und Tier.

3.1 Tiere

Verwendet wurden fünf Mini-Shetlandponys (Stuten n=4, Wallach n=1), denen in einer vorangegangenen, unabhängigen Studie Tantalkugeln mit einem Durchmesser von 1,6 mm an definierte Lokalisationen im Schädelknochen, der *Mandibula* und in den Zähnen implantiert wurden.

Pony 1: Shetlandpony, Stute, 7 Jahre alt, ca. 120 kg Körpermasse (KGM)

Pony 2: Shetlandpony, Wallach, 8-9 Jahre alt, ca. 100 kg KGM

Pony 3: Shetlandpony, Stute, 8 Jahre alt, ca. 120 kg KGM

Pony 4: Shetlandpony, Stute, 10 Jahre alt, ca. 100 kg KGM

Pony 5: Shetlandpony, Stute, 5-6 Jahre alt, ca. 90 kg KGM

Alle Ponys waren zuvor Probanden in einer ernährungswissenschaftlichen Studie und wurden in diesem Zusammenhang regelmäßig zahnmedizinisch untersucht und gegebenenfalls behandelt.

3.2 Markerpositionen

Tab. 1: Markerpositionen der linken Schädelhälfte

Nr.	Linke Schädelseite: anatomische Beschreibung
1, 2, 3	Rostrale knöcherne Begrenzung des <i>Os incisivum</i> (1 Übergang <i>Processus palatinus</i> in <i>Processus alveolaris ossis incisivi</i> , 2 etwa die Mitte zwischen 1 und 3, 3 an <i>Incisura nasoincisiva</i>)
4	10 mm distal des rostralen Ursprungs auf der <i>Crista facialis</i>
5	Ca. 10 mm rostral des <i>Foramen mentale</i>
6	Ventrolateraler Rand der <i>Mandibula</i> , auf Höhe des Zahnes 307
7	Ventrolateraler Rand der <i>Mandibula</i> , ca. 20 mm rostral der <i>Incisura vasorum faciale</i>
8	<i>Facies buccalis</i> der <i>Mandibula</i> , ca. 5 mm distal der Grenzflächen der Zähne 310 und 311

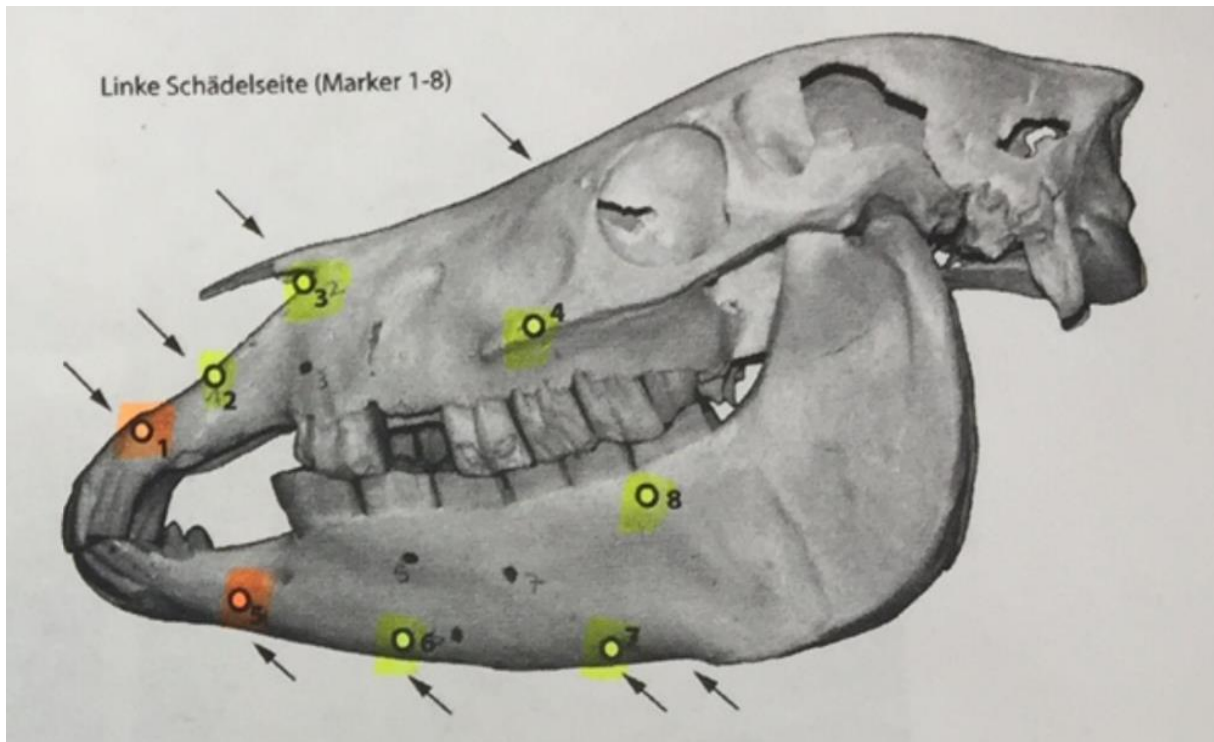


Abb. 6: Lokalisation der Tantalmarker auf der linken Schädelseite, Kaustudie 2015, Linda Schuchardt, Max-Planck-Weizmann-Center, Leipzig, Deutschland (aktuell noch unpubliziert)

Tab. 2: Markerpositionen der rechten Schädelhälfte

Nr.	Rechte Schädelseite: anatomische Beschreibung
9	Mittig des <i>Processus nasalis</i> des <i>Os incisivum</i> , Höhe des Zahnes 404
10	Ca. 15 mm dorsal auf Höhe der kaudalen Begrenzung des <i>Margo interalveolaris</i> der <i>Maxilla</i>
11	10 mm distal des rostralen Ursprunges auf der <i>Crista facialis</i>
12	Mittig des <i>Margo interalveolaris mandibulae</i>
13	Ventrolateraler Rand der <i>Mandibula</i> , Höhe des Zahnes 407
14	Ventrolateraler Rand der <i>Mandibula</i> , ca. 10 mm rostral der <i>Incisura vasorum faciale</i>
15	Wie Nummer (Nr.) 8, auf Höhe des Zahnes 411

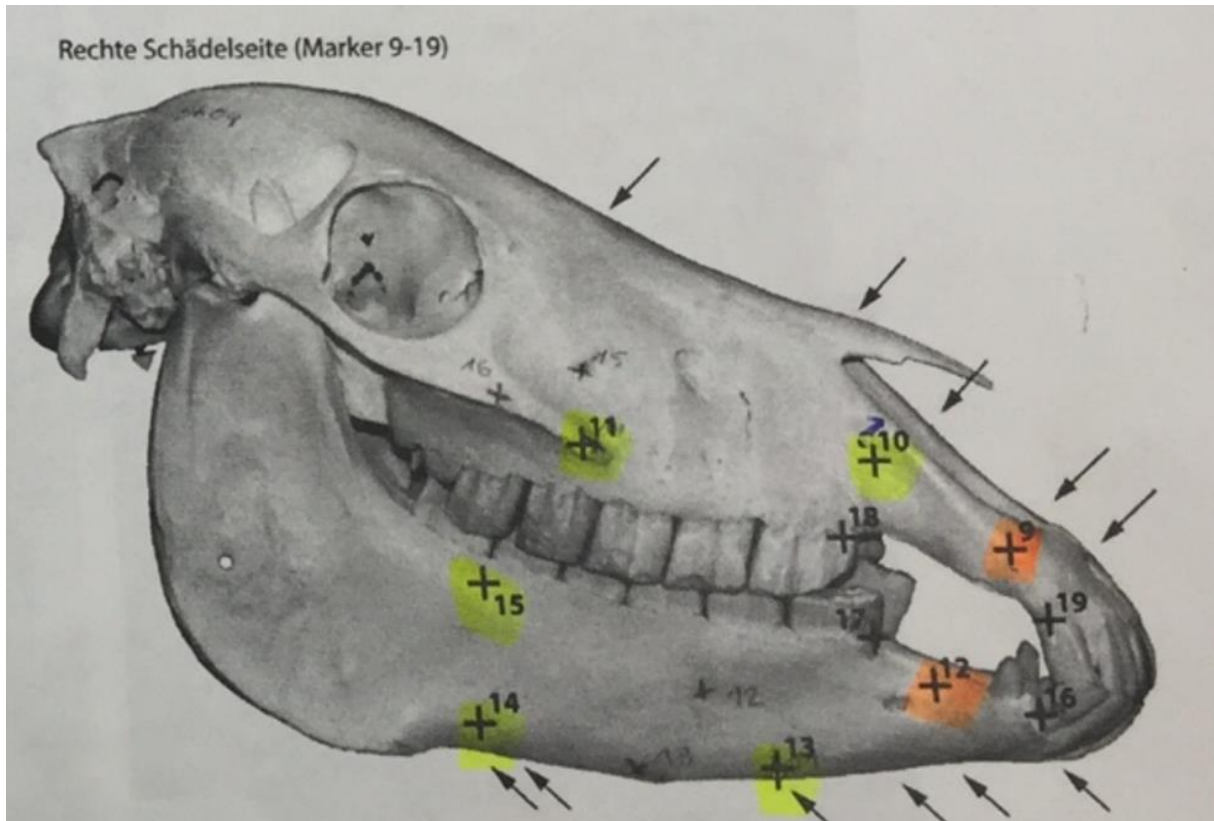


Abb. 7: Lokalisation der Tantalmarker auf der rechten Schädelseite, Kaustudie 2015, Linda Schuchardt, Max-Planck-Weizmann-Center, Leipzig, Deutschland (aktuell noch unpubliziert)

3.3 Computertomographie und Modellerstellung

Zur Verwendung kommen computertomographische Daten der Versuchstiere, welche in einer anderen Studie erhoben wurden. Diese sind notwendig zur Erstellung eines Oberflächenmodells der zu untersuchenden Knochen. Hierzu ordnet der Computertomograph (CT) simultan mit der Aufnahme der Daten jedem Punkt des Datensatzes Koordinaten zu. Dadurch wird jeder Punkt im Schädel und der *Mandibula* mit einer räumlichen Signatur versehen. Aus diesen gewonnenen CT-Daten werden Oberflächenmodelle der Knochen erstellt, die nachfolgend in der Animation der Schädelmodelle wieder übernommen werden.

3.4 Biplanare Röntgenvideoaufnahme

Die verwendete biplanare hochfrequenz-fluoreszenzkinematographische Anlage steht an der veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig (Böhme Medizintechnik GmbH, Halle/Saale, Deutschland) und besteht aus zwei Röntgenröhren (eine: CPI Indico IQ Ultra High Frequency X-Ray Generator, Ottawa, Ontario, Canada mit Dunlee DU 33100 DA 90 HS, Aurora, Illinois, USA, zweite: Philips Medio 65 CP-H X-Ray Generator, gekoppelt mit Philips SRO 2550 X-Ray Tube; Maximalleistung 125 kV) und zwei Detektoren, welche aus je einem Bildempfänger mit Bildverstärker (BV-300, Philips, Amsterdam, Niederlande; Nenndurchmesser 36 cm) und einer Hochfrequenz-Kamera (Optronis Cam Record CR600x2, Kehl, Deutschland) bestehen. Die vier Komponenten sind einzeln auf Teleskopdeckenstative montiert, welche auf Schienen gelagert und damit verschieblich sind. Auf der Vorderseite jedes Bildempfängers ist ein Raster (70 Linien/cm, Fokusabstand 140 cm, smit röntgen, DA Best, Niederlande) montiert und dient der Reduktion der Streustrahlung. Die beiden Kameras arbeiten synchron.



Abb. 9: Versuchsaufbau in der hochfrequenz-fluoreszenzkinematischen Anlage, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig in Hinteransicht

Abb. 8: Versuchsaufbau in der hochfrequenz-fluoreszenzkinematischen Anlage, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig in Seitenansicht während eines Versuchsdurchgangs

Die Winklung der kreuzenden Zentralstrahlen betrug 60° bei einem Film-Fokus-Abstand von ca. 140 cm (Abb.5). Die Anlage wurde zusätzlich mit einem Metallgestell (Abb. 8, Abb. 9)

versehen, in welchem sich der Futtertrog befand. Dieser sollte den Versuchsaufbau vor Erschütterungen oder Verschiebungen schützen. Der Kopfbereich des Gestells wurde mit Plexiglasscheiben versehen, welche für Röntgenstrahlen durchlässig sind und keine Artefakte bilden. Im Bereich des Plexiglasses befand sich der Futtertrog. Auf der Abb. 9 ist der Versuchsaufbau in Hinteransicht zu sehen und man erkennt beidseits des Metallgestells die Röntgenröhren. Die beiden Detektoren waren auf Höhe des Kopfbereiches positioniert. Die Abb. 8 zeigt den Versuchsaufbau in Seitenansicht während des laufenden Versuchs mit Pony 3. Hier ist deutlich einer der Detektoren auf Kopfhöhe des Ponys erkennbar. Die Ponys waren an die Anlage gewöhnt und haben ihr gewohntes Heu als Futterquelle bekommen.

Für die Videoaufnahmen wurden die Ponys ohne Halfter zum Futtertrog hingeführt und mit einem Führstrick vor der Brust und hinter der Kruppe fixiert. Es wurden mehrere Kauzyklen von jedem Pony aufgenommen. Alle mitwirkenden Personen trugen Strahlenschutzkleidung und waren hinter einer mobilen Bleiglaswand abgeschirmt (Recht 2019, 2020). Zudem wurden alle Arbeitsschritte immer von den gleichen Personen durchgeführt, um die qualitative Schwankung der Messergebnisse gering zu halten.

Die Röntgenspannung und -stromstärke wurden individuell angepasst und betrugen für die erste Anlage $106,5 \pm 2,5$ kV und 72 ± 8 Milliampere (mA) und für die zweite Anlage 93 ± 3 kV und 63 mA. Die Kameras arbeiteten mit einer Auflösung von 1280×1024 Pixeln bei einer Bildwiederholrate von 50 Bildern pro Sekunde.

3.5 Entzerrung und Kalibration



Abb. 10:
Kalibrationskubus aus
Lego®

Um die Röntgenvideos entzerren zu können, musste vor jeder Messung pro Kamera die Aufnahme einer Lochplatte (Grid) gemacht werden. Diese Aufnahmen dienten als Grundlage für die Entzerrung mittels XMALab (Knörlein et al. 2016). Die Löcher, welche nicht vollständig abgebildet waren, wurden manuell entfernt. Die errechnete Entzerrungsmatrix wurde vor Trackingbeginn von XMALab automatisch auf die Röntgenvideos angewandt. Die räumliche Kalibration des Versuchsaufbaus wurde nach der

Aufnahme für die Entzerrung und vor dem nächsten Schritt, dem markerbasierten Tracking, gemacht. Dafür war ein Bild des Kalibrationskubus (Abb. 10) von jeder Kamera erforderlich. XMALab glich, nach Auswahl von drei bis vier vordefinierten Kubuspunkten, die eingespeisten Koordinaten mit den ermittelten Markern auf dem Kubus ab (Knörlein et al. 2016). Das daraus entstandene Kalibrationsergebnis der Kameraausrichtung wies drei Angaben zur Translation und Rotation auf.

3.6 Markerbasiertes Tracking

Das markerbasierte Tracking wurde mittels XMALab für beide simultane Aufnahmen jedes Schädels durchgeführt. Dafür wurden die einzelnen Marker in beiden Aufnahmen aufgefunden und zugeordnet. Anschließend übernahm das Programm das Tracken der Marker über die gesamte Videosequenz. Danach wurden die Ergebnisse der Marker einzeln gesichtet und falls notwendig manuell korrigiert. Des Weiteren wurden die Markerkoordinaten basierend auf den computertomographischen Daten der einzelnen Schädel mit in XMALab eingeladen. Somit konnten die getrackten Markerdaten mit den jeweiligen Schädelmodellen verbunden werden. Der nächste Schritt war das Filtern der Koordinaten mit einem Tiefenpassfilter, bei dem die Grenzfrequenz bei 10 Hz lag. Danach wurden die Daten mit Hilfe der Transformationsmatrizen für jeden Schädelknochen in das körpereigene Koordinatensystem umgerechnet und exportiert.

3.7 Animation der Schädelmodelle und Rohdatenbearbeitung

Die dreidimensionale Animation der Schädelmodelle erfolgte in Autodesk® Maya® 2019 (Autodesk Inc., San Rafael, CA, US) anhand der Bewegungskordinaten, die mithilfe des

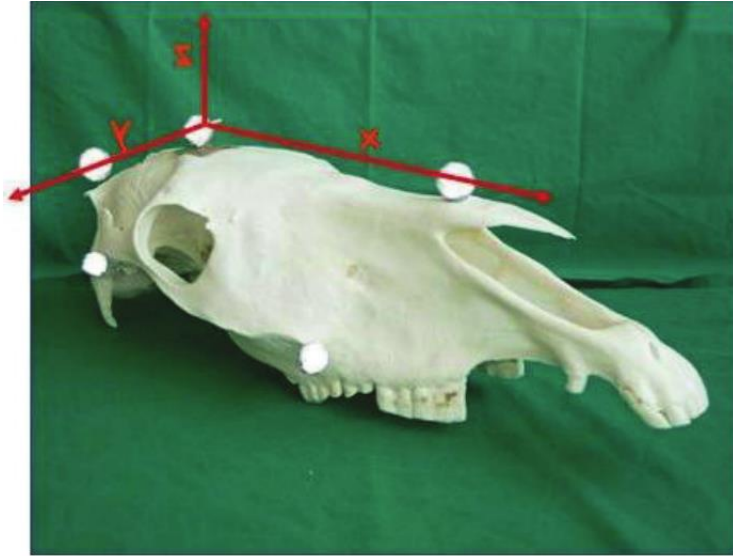


Abb. 11: Koordinatensystem nach Anen, Claudine (2007)

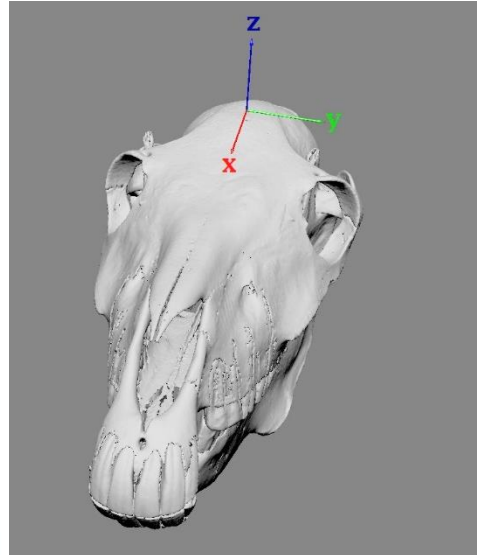


Abb. 12: Koordinatensystem in Autodesk® Maya® 2019

XMALab generiert wurden. Zur Ermittlung der relevanten Unterkieferbewegung wurde der Oberkiefer graphisch festgestellt und auf der Stirn ein Koordinatensystem platziert. Das hier verwendete Koordinatensystem (Abb.12) wurde aus den Dissertationen von Niederl (2007) und Anen (2008) übernommen (Abb.11). Die Auslenkung in Richtung der X-Achse stellt die Kieferbewegung nach rostral und kaudal dar. Die Auslenkung in Y-Richtung stellt die seitlichen Kieferbewegungen dar. Die Auslenkung in Richtung der Z-Achse stellt das Öffnen und Schließen des Kiefers dar. Anschließend wurde ein virtueller Marker im Bereich der Medianlinie am Kaudalrand der *Sutura intermandibularis* platziert, orientiert an den Arbeiten von Anen (2008) und Niederl (2007). Danach wurde dessen Bewegung relativ zum zuvor generierten Koordinatensystem dargestellt und die Bewegungskordinaten für jeden Messpunkt der Mandibula auf den jeweiligen Achsen exportiert. Die Kauzyklen in einem Video wurden voneinander getrennt. Dafür wurde die Z-Achse des virtuellen Markers am Kaudalrand der *Sutura intermandibularis* herangezogen. In dieser Studie wurde die Definition von Niederl (2007) verwendet. Diese besagt, dass der Beginn des Kauzyklus mit der maximalen Öffnung des Kiefers gekennzeichnet ist und mit der nächsten maximalen Öffnung endet. Je nach Kooperation des jeweiligen Ponys wurden pro Messung unterschiedlich viele Kauzyklen

aufgenommen. In die Auswertung wurden vollständige Kauzyklen einbezogen, bei denen mindestens 3 Tantalmarker pro Knochen ständig aufgezeichnet worden waren.

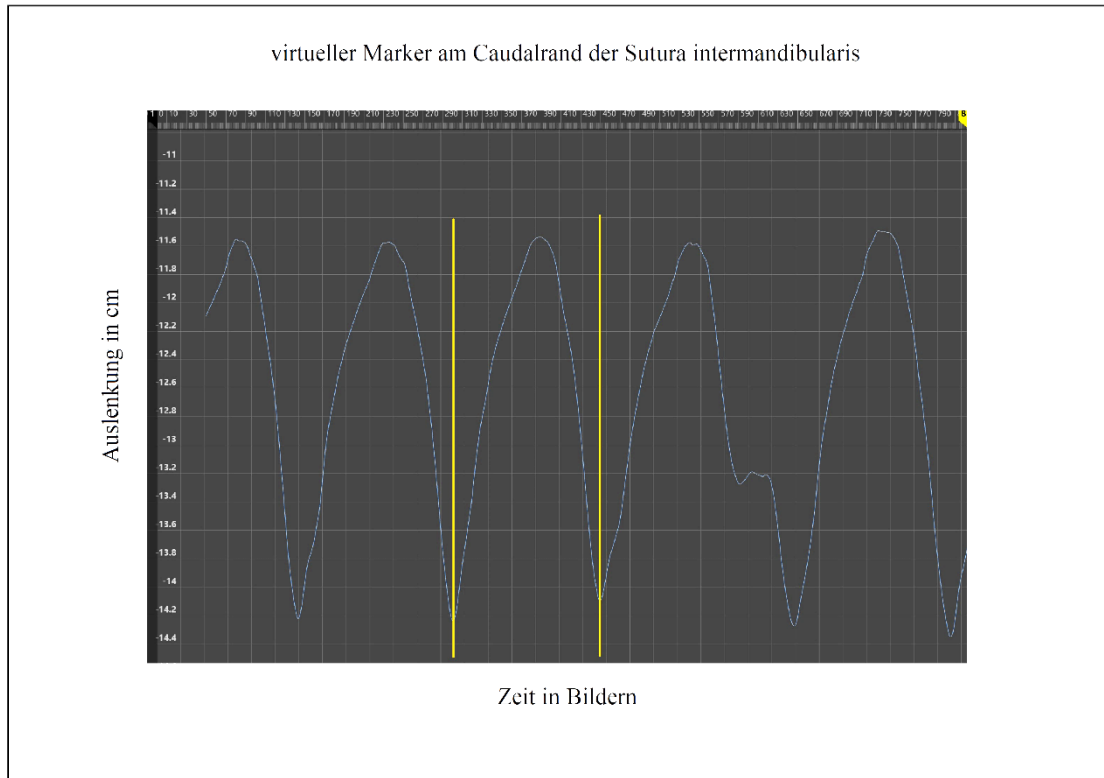


Abb. 13: Bewegung des virtuellen Markers in aufeinanderfolgenden Kauzyklen entlang der Z-Achse (Öffnen und Schließen des Kiefers); die gelbe Markierung begrenzt einen Kauschlag

3.8 Datenauswertung und Statistik

Die Datenauswertung wurde im Programm MS-Excel durchgeführt und bestand aus zwei Schritten:

1. Gruppenauswertung
2. Einzelergebnisse

Gruppenauswertung

Die maximalen Auslenkungen wurden mit einem Kolgomorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft.

Danach wurden die maximalen Auslenkungen (x,y,z) mittels t-Test für verbundene Stichproben verglichen.

Von jedem Kauzyklus wurden die Extremwerte bestimmt. Die Minima (Min) und Maxima (Max) jeder Achse und jedes Ponys wurden anschließend gemittelt.

Einzelergebnisse

Hier erfolgte die individuelle Beschreibung des repräsentativen Kauzyklus von jedem Pony anhand von Diagrammen, welche die gemittelten Werte der Kauzyklen für jedes einzelne Pony in der Y - und Z – Achse, X- und Z- Achse und Y und X-Achse darstellen, sowie eine tabellarische Auflistung der Minima und Maxima der einzelnen Kauschläge.

4 Ergebnisse

4.1 Gruppenauswertung

4.1.1 Unterkieferbewegungen

Die maximale Kieferöffnung lag durchschnittlich bei -12,2 cm (Standardabweichung (SD) 1,54) und die minimale Kieferöffnung bei -15,13 cm (SD 1,37). Diese dorsoventrale Mandibulabewegung variierte zwischen -10,01 cm und -16,83 cm.

Die maximale Seitwärtsbewegung lag im Durchschnitt bei 1,92 cm (SD 1,67) und die minimale Seitwärtsbewegung bei -2,12 cm (SD 1,87). Zudem reichte die laterale mandibuläre Exkursion von -1,37 cm bis 4,20 cm.

Die Abb. 14 zeigt außerdem, dass die durchschnittliche rostrokaudale Kieferbewegung maximal 24,14 cm (SD 1,6) und minimal 23,77 cm (SD 1,67) betrug. Diese Kieferbewegung variierte zwischen 22,01 cm und 26,59 cm.

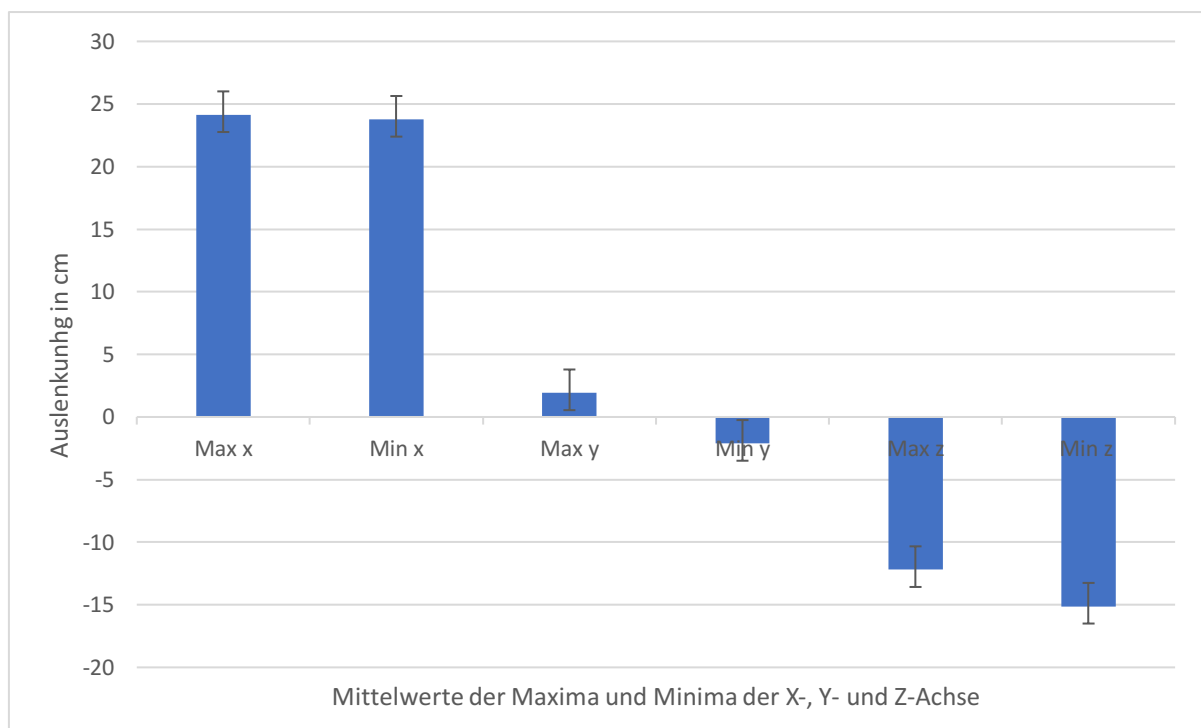


Abb. 14: Mittelwerte von Maxima und Minima der X-, Y- und Z- Achse [cm]

Tab. 3: Anzahl der ausgewählten Kauzyklen für jedes einzelne Pony

Pony	Anzahl an Kauzyklen
Pony 1	1
Pony 2	5
Pony 3	6
Pony 4	3
Pony 5	1

In Tab. 5 sind die Anzahl der ausgewerteten Kauzyklen pro Pony aufgelistet. Wie in Tab. 5. ersichtlich liegt die durchschnittliche rostraudale Unterkieferbewegung bei 0,37 cm (SD 0,10) und ist die signifikant kleinste Auslenkung (x-y, $p=0,000$ und x-z, $p=0,000$). Die durchschnittliche Seitwärtsbewegung des Unterkiefers liegt bei 4,04 cm (SD 0,32) und war signifikant höher als die durchschnittliche Kieferöffnung mit 2,92 cm (SD 0,29) (y-z, $p=0,002$).

Tab. 4: Distanzen der Unterkieferbewegung entlang der verschiedenen Achsen

	X-Achse (Max-Min)	Y- Achse (Max-Min)	Z-Achse (Max-Min)
Pony 1	0,28	4,34	3,21
Pony 2	0,47	4,23	3,23
Pony 3	0,31	3,59	2,77
Pony 4	0,48	4,24	2,57
Pony 5	0,31	3,81	2,83
Mittelwert	0,37	4,04	2,92
Standartabweichung	0,10	0,32	0,29

In Tab. 5 wird sichtbar, dass drei von fünf Ponys (Pony 3, Pony 4 und Pony 5) jeweils zwischen den verschiedenen Aufnahmen der Kauzyklen die Kauichtung änderten. Zudem zeigt Tab. 5 auf, dass in 66,67 % der Kauzyklen die Ponys im Uhrzeigersinn gekaut haben und somit als Rechtskauer bezeichnet werden können.

Tab. 5: : Einteilung der einzelnen Kausequenzen der Ponys in die Kaurichtungen (einmal aus Frontalansicht nach Baker (Baker 1999) und einmal aus Sicht des Probanden)

Probanden	Aufnahmen	Frontalansich	aus Probandensicht
Pony 1	1	clockwise	Rechtskauer
	2	clockwise	Rechtskauer
Pony 2	1	clockwise	Rechtskauer
	2	clockwise	Rechtskauer
	3	clockwise	Rechtskauer
Pony 3	1	clockwise	Rechtskauer
	2	counter-clockwise	Linkskauer
Pony 4	1	counter-clockwise	Linkskauer
	2	counter-clockwise	Linkskauer
	3	clockwise	Rechtskauer
Pony 5	1	clockwise	Rechtskauer
	2	counter-clockwise	Linkskauer

4.2 Einzelergebnisse

In den folgenden Diagrammen werden die gemittelten Werte eines repräsentativen Kauzyklus für jedes einzelne Pony in der Y- und Z- Achse, in der X- und Y-Achse und in der X- und Z-Achse dargestellt. Durch die Visualisierung der Translokation des Unterkiefers auf der Y- und Z-Achse wurde eine Frontalansicht der Kaubewegung des Pferdes erstellt. Eine Seitenansicht eines Kauzyklus wurde durch Transposition entlang der X- und Z-Achse ermittelt. Eine weitere Aufsicht entstand, wenn die Bewegungen des virtuellen Markers in Bezug auf das stationäre Schädelkoordinatensystem entlang der X- und Y-Achse angezeigt wurden.

4.2.1 Pony 1

Shetlandpony – Stute – 7 Jahre

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse

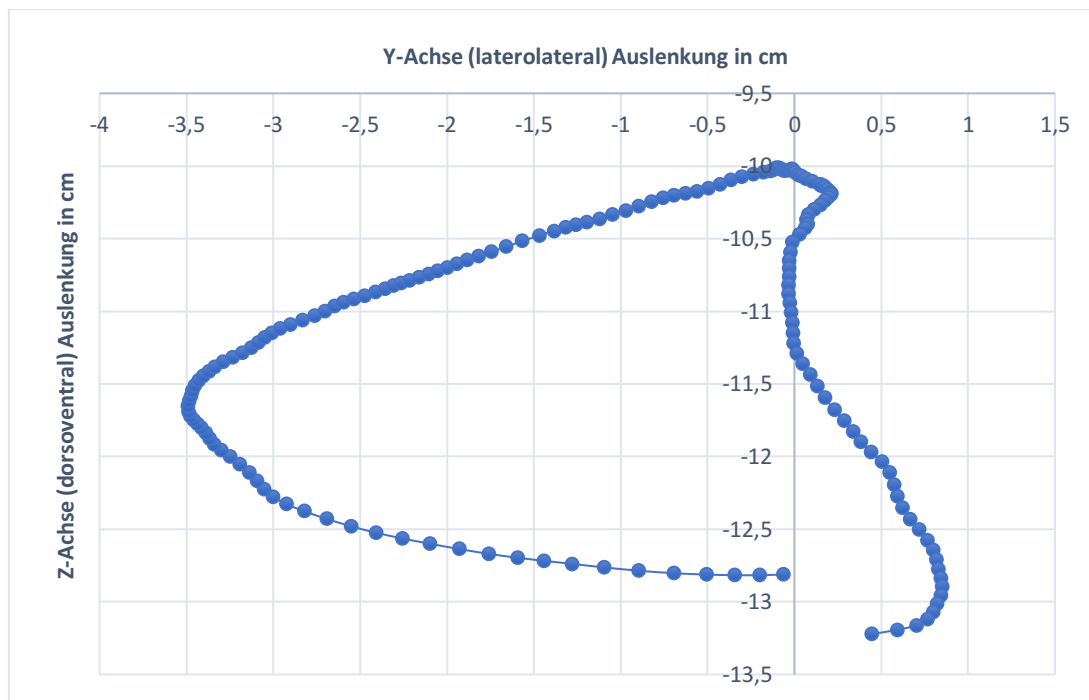


Abb. 15: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 1 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse

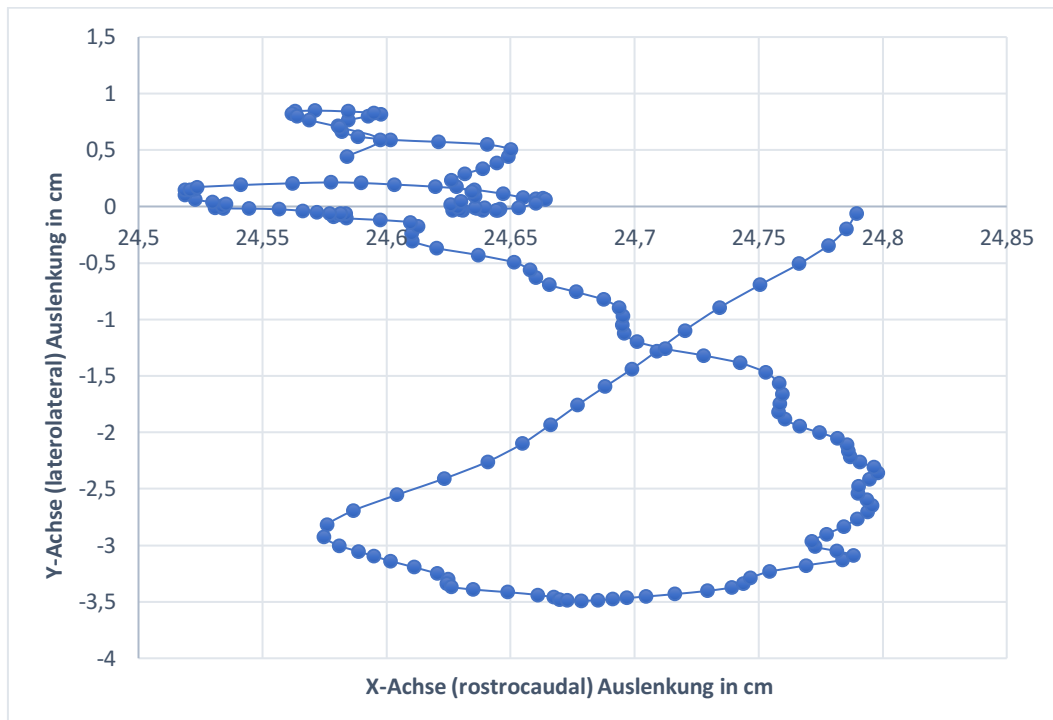


Abb. 16: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 1 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse

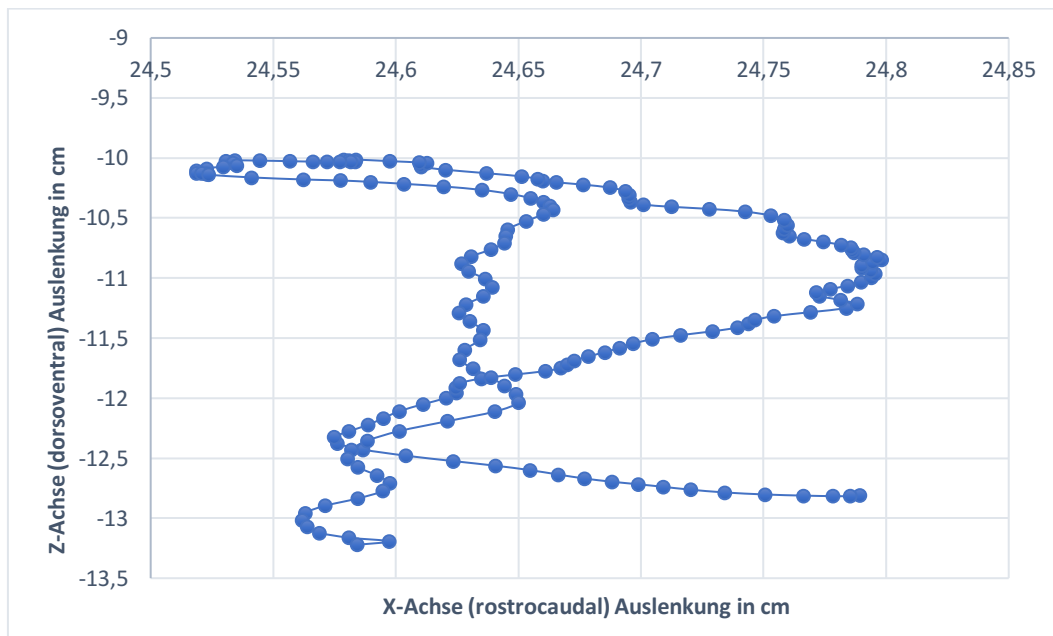


Abb. 17: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 1 [cm]

Tab. 6: Einzelwerte des Kauzyklus von Pony 1 [cm]

		X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
1. Kauzyklus	Max	24,80	0,85	-10,01
	Min	24,52	-3,49	-13,22

4.2.2 Pony 2

Shetlandpony – Wallach – 8-9 Jahre

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse

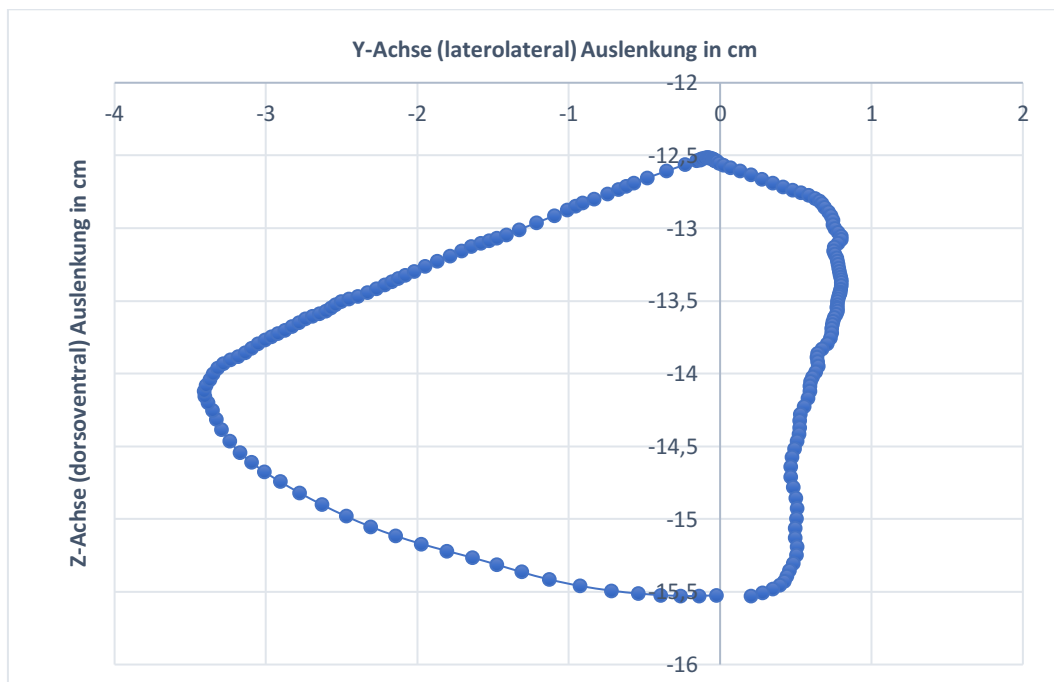


Abb. 18: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 2 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse

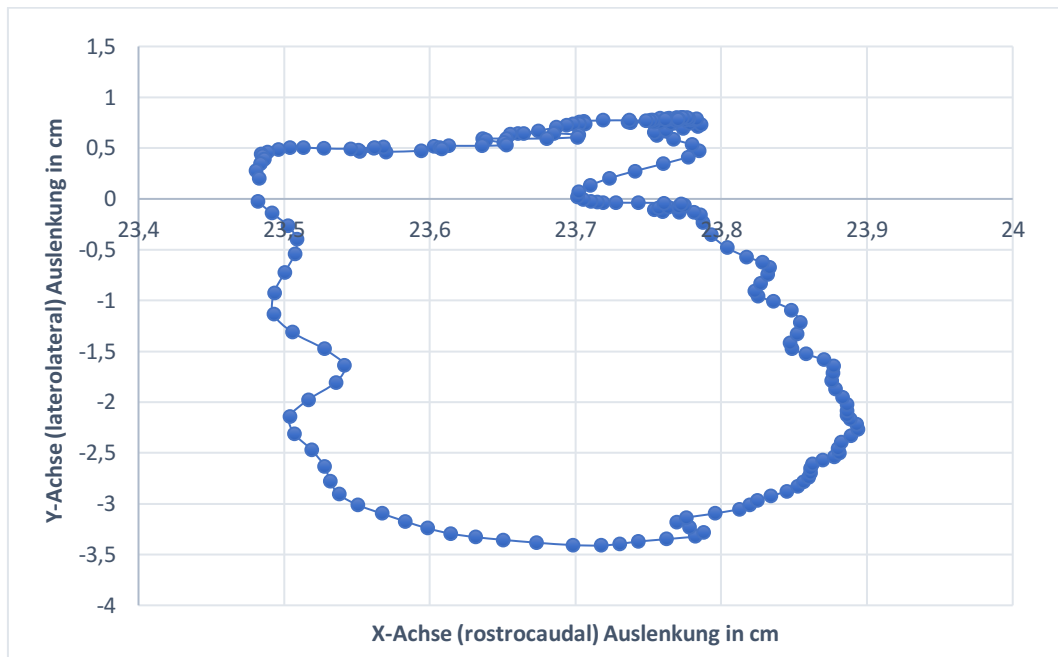


Abb. 19: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 2 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse

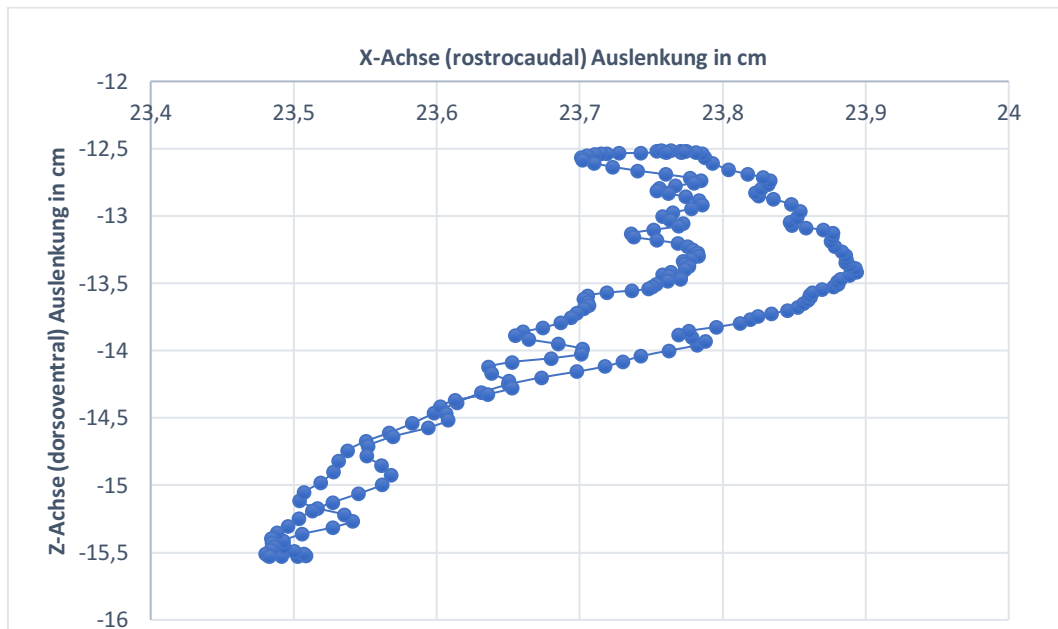


Abb. 20: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 2 [cm]

Tab. 7: Einzelwerte der Kauzyklen von Pony 2 [cm]

		X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
1. Kauzyklus	Max	23,82	1,28	-12,49
	Min	23,33	-3,29	-15,52
2. Kauzyklus	Max	23,89	0,80	-12,52
	Min	23,48	-3,41	-15,53
3. Kauzyklus	Max	22,80	0,19	-13,75
	Min	22,28	-3,86	-16,67
4. Kauzyklus	Max	23,32	-1,49	-11,85
	Min	22,85	-5,69	-16,05
5. Kauzyklus	Max	23,23	-1,57	-13,10
	Min	22,76	-5,68	-16,07

4.2.3 Pony 3

Shetlandpony – Stute – 8 Jahre

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse

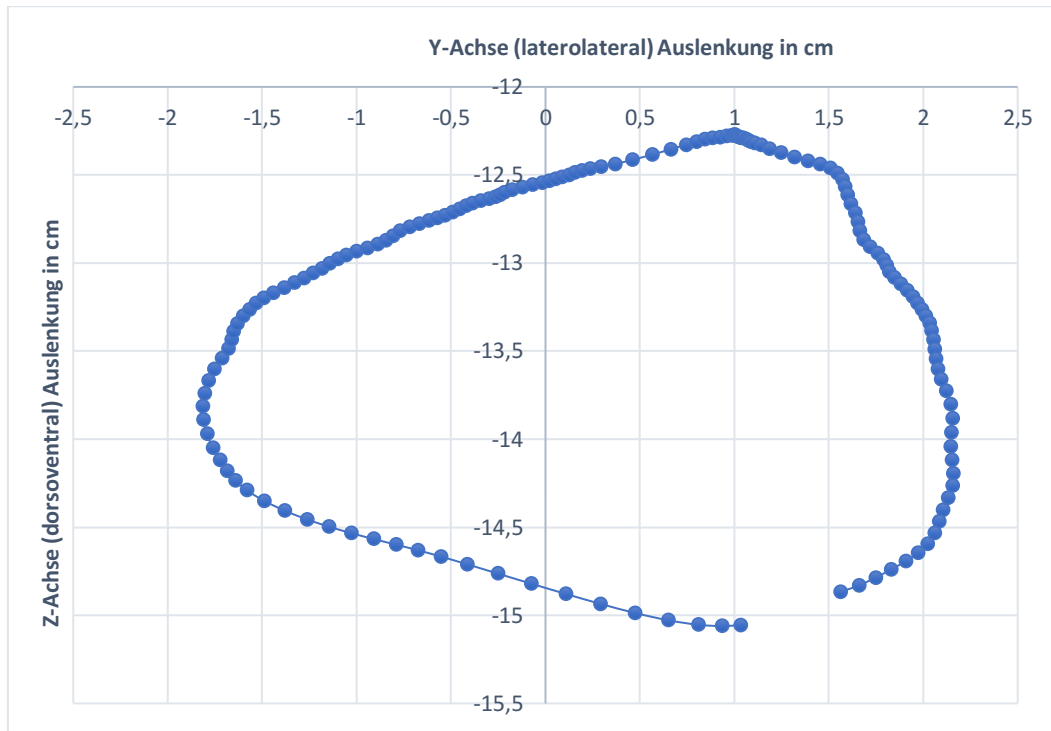


Abb. 21: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 3 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse

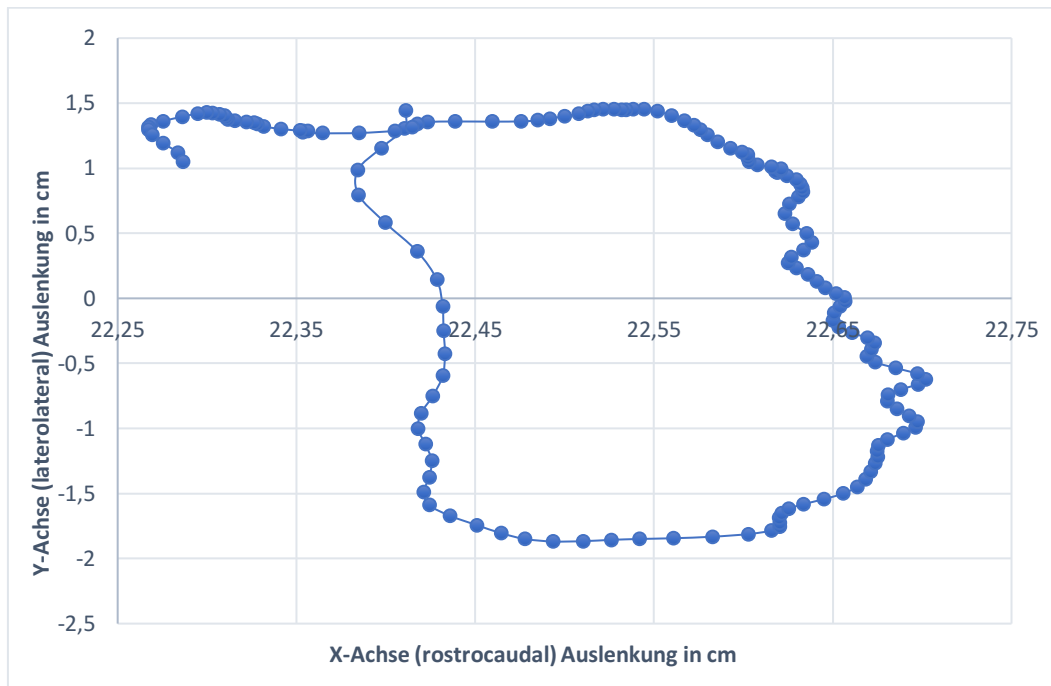


Abb. 22: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 3 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse

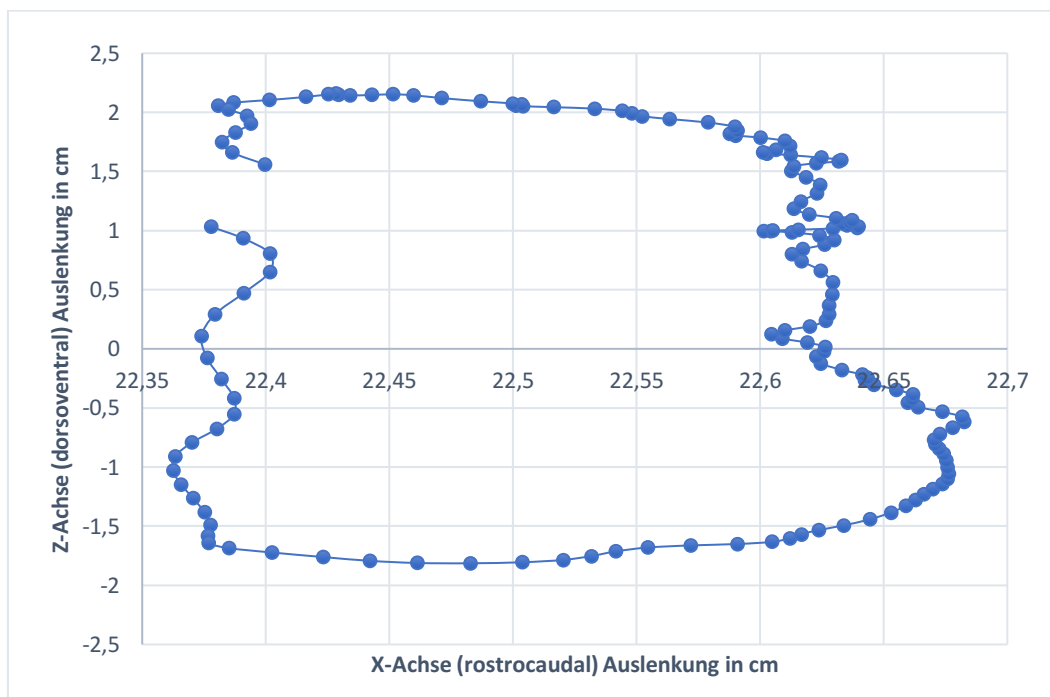


Abb. 23: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 3 [cm]

Tab. 8: Einzelwerte der Kauzyklen von Pony 3 [cm]

		X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
1. Kauzyklus	Max	23,85	2,34	-11,57
	Min	23,51	-1,21	-14,22
2. Kauzyklus	Max	23,69	2,51	-11,54
	Min	23,44	-1,60	-14,24
3. Kauzyklus	Max	23,76	2,30	-11,58
	Min	23,50	-0,90	-14,26
4. Kauzyklus	Max	23,68	2,52	-11,49
	Min	23,41	-0,85	-14,32
5. Kauzyklus	Max	22,68	2,16	-12,27
	Min	22,36	-1,81	-15,06
6. Kauzyklus	Max	22,70	1,45	-12,28
	Min	22,27	-1,87	-15,26

4.2.4 Pony 4

Shetlandpony – Stute – 10 Jahre

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse

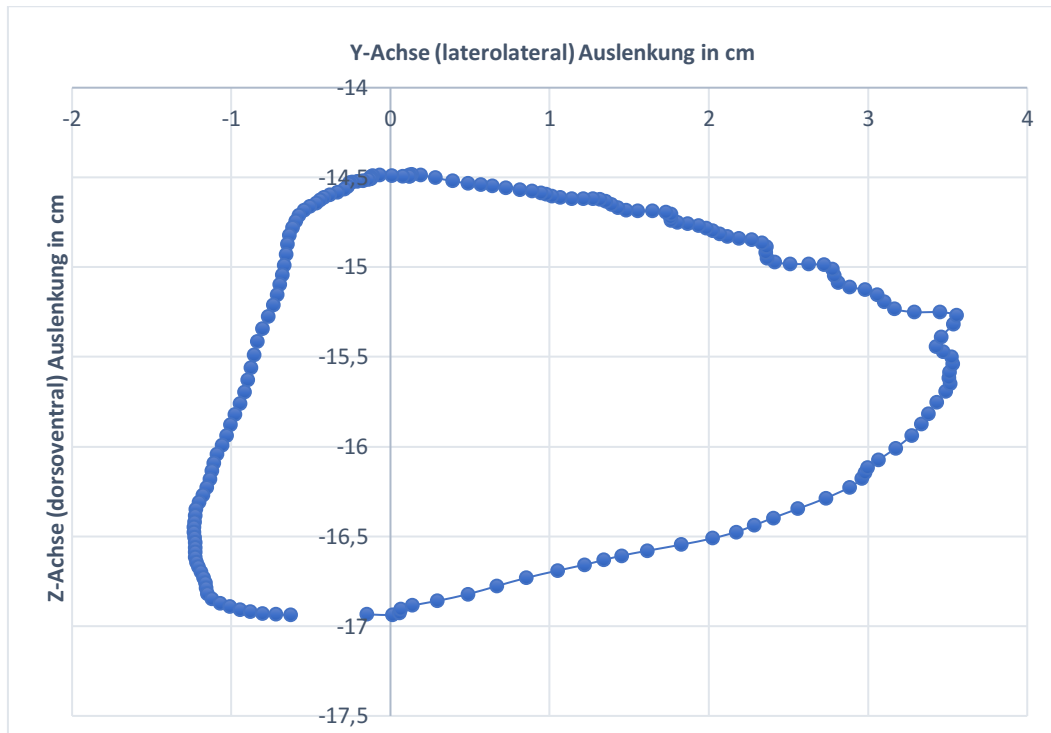


Abb. 24: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 4 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse

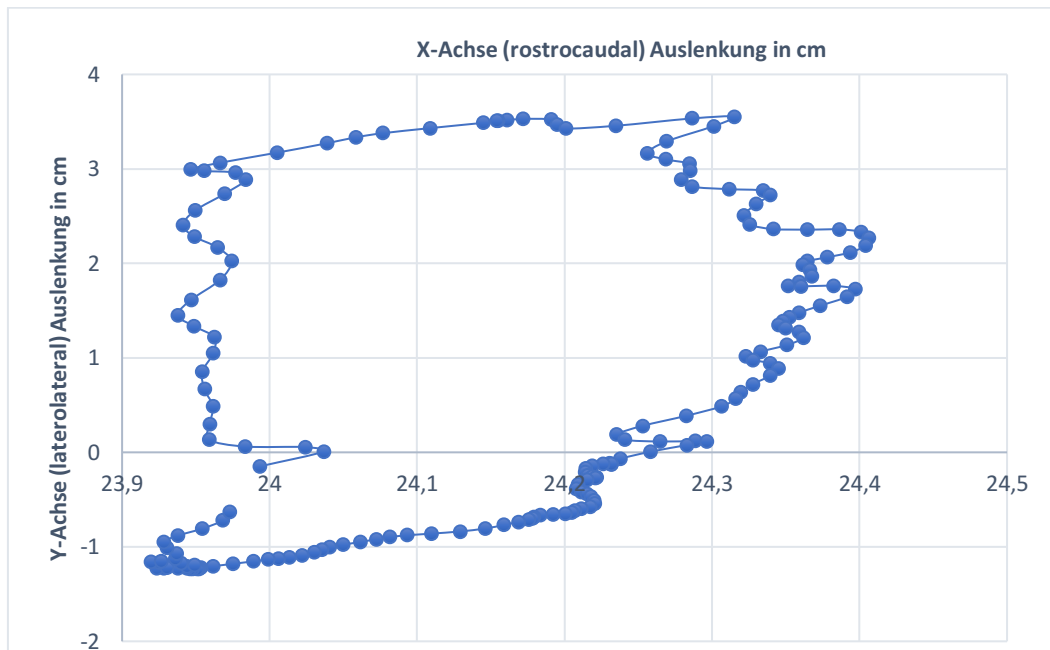


Abb. 25: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 4 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse

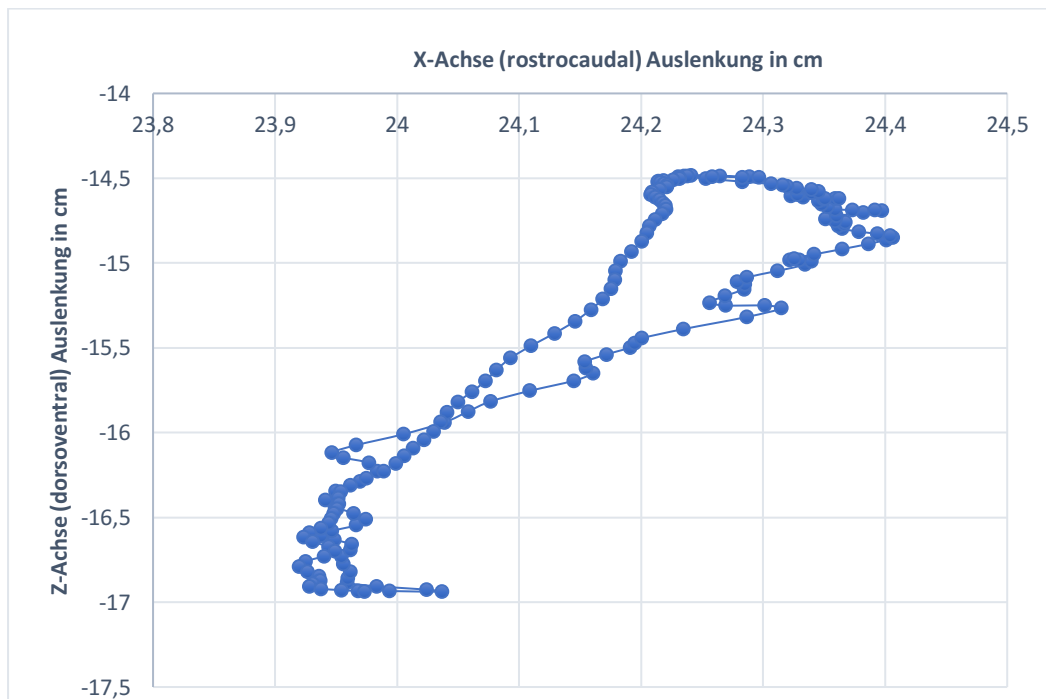


Abb. 26: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 4 [cm]

Tab. 9: Einzelwerte der Kauzyklen von Pony 4 [cm]

		X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
1. Kauzyklus	Max	24,41	3,55	-14,48
	Min	23,92	-1,24	-16,94
2. Kauzyklus	Max	20,65	3,07	-15,06
	Min	20,05	-1,18	-17,78
3. Kauzyklus	Max	22,41	0,86	-13,23
	Min	22,08	-2,82	-15,76

4.2.5 Pony 5

Shetlandpony – Stute – 5-6 Jahre

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse

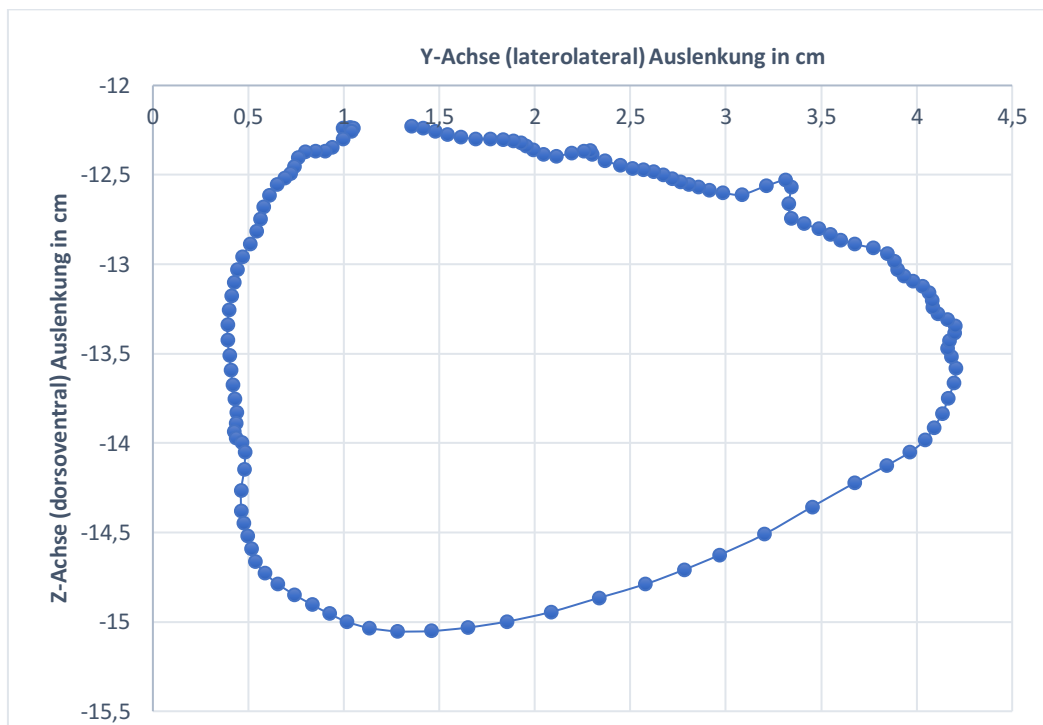


Abb. 27: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 5 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse

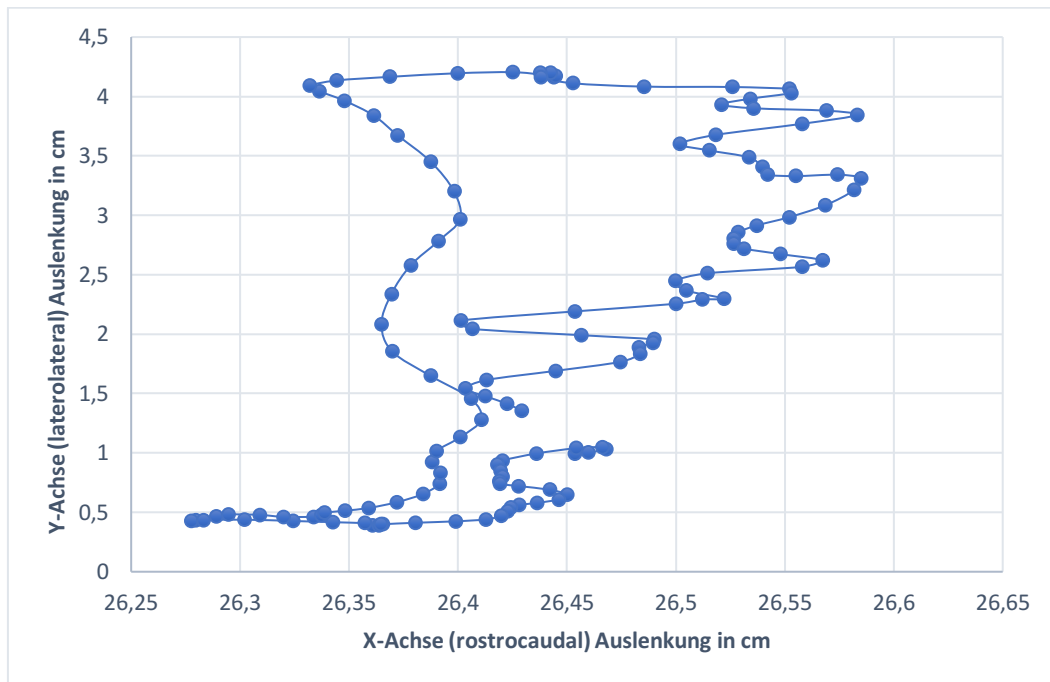


Abb. 28: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 5 [cm]

Graphische Darstellung des Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse

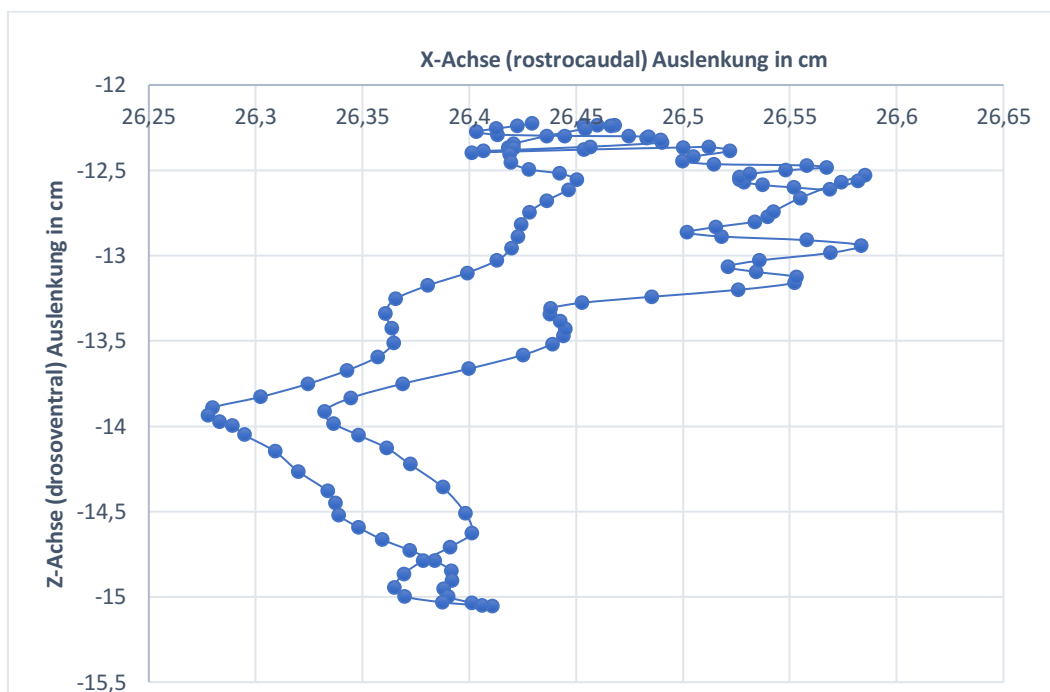


Abb. 29: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 5 [cm]

Tab. 10: Einzelwerte des Kauzyklus von Pony 5 [cm]

		X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
1. Kauzyklus	Max	26,59	4,20	-12,23
	Min	26,28	0,39	-15,05

5 Diskussion

In den vergangenen 80 Jahren wurden verschiedene Techniken beschrieben, welche sich mit der Erforschung der Kaubewegung und des Kauvorganges von Pferden widmeten. In den jüngsten dieser Studien kamen hauptsächlich nichtinvasive Hautmarker zum Einsatz. Durch die oberflächlich auf der Haut platzierten Marker können jedoch Artefakte, bedingt durch die Verschiebung der Haut und damit der Marker gegenüber der knöchernen Strukturen, verursacht werden (van Weeren et al. 1990).

Ein wichtiger Punkt in der Projektplanung war die Positionierung der Röntgenröhren und Detektoren, wie in Abb. 5 schematisch dargestellt ist. Die Schwierigkeit lag einerseits darin, die Röntgenröhren und Detektoren so nah wie möglich an den Schädel der Ponys heran zu bringen, ohne die Tiere in ihrem normalen Fressverhalten zu beeinflussen. Andererseits durfte der Bildausschnitt nicht zu klein werden, da die Probanden nicht angebunden waren und daher freie Kopfbewegungen möglich waren.

Die in dieser Arbeit verwendete Gruppengröße ist vergleichsweise klein, da die Anzahl der zur Verfügung stehenden Probanden durch die vorangegangenen unabhängigen Studie abhängig war und die individuelle Aufnahmehäufigkeit zwischen den Tieren sich deutlich unterschied. Die Schwankung der Aufnahmehäufigkeit der einzelnen Ponys hing mit deren individueller Kooperationsbereitschaft zusammen und dem Fakt, dass keine Sedierung zum Einsatz kam, um ein physiologisches Fressverhalten abbilden zu können. Die Aussagekraft der Ergebnisse wäre durch mehrere Einzelaufnahmen der Ponys positiv beeinflusst, da es die individuelle Varianz verringert und ein genaueres gemittelt repräsentatives Ergebnis in der Einzel- sowie Gruppenauswertung hervorbringen würde.

Variable Faktoren, einschließlich der Zusammensetzung des Futters, der Größe und Rasse des Pferdes, die Zahnbeschaffenheit sowie die individuellen Kaumuster, haben einen signifikanten Einfluss auf die Exkursionen des Unterkiefers (Leue 1944; Collinson 1994; Baker 2002; Bonin et al. 2006, 2007; Simhofer et al. 2011).

Es wird z.B. eine stark verlängerte Futteraufnahmezeit beobachtet, wenn der Trockenfutterration Stroh untergemischt worden ist (Ellis et al. 2005). Je fester das Futtermaterial z.B. Pellets und je geringer der Feuchtigkeitsgehalt ist, desto länger ist die

Kaufrequenz (Meyer et al. 1975). Es lässt sich außerdem ein Zusammenhang zwischen der okklusalen Kauoberfläche und der Kaurate vermuten (Janis und Ehrhardt 1988). Bei kleineren Pferderassen ist die Futteraufnahme rate geringer, bei einer deutlich höheren Frequenz. Daraus kann man schließen, dass die orale Kapazität dieser Tiere geringer ist (Meyer et al. 1975).

Diese bestehenden Einflussfaktoren wurden in diesem Versuch nicht untersucht, da lediglich eine Pferde- bzw. Ponyrasse mit guter Zahngesundheit und eine einzige Futterquelle zur Verfügung stand. Die Futtermenge wurde nicht genau bestimmt, da das Hauptaugenmerk auf der genauen Darstellung des Kauvorgangs lag. Es müssten weitere Studien durchgeführt werden, um die Unterschiede oder Gemeinsamkeiten dieser Einflussfaktoren identifizieren zu können.

Vergleicht man die Ergebnisse allerdings mit denen von Bonin et al (2006), Niederl (2007) und Anen (2008), welche hauptsächlich Warmblüter verwendeten, lässt es vermuten, dass ein deutlicher Unterschied in der Stärke der Auslenkung des Unterkiefers zwischen Pferden und Ponys besteht.

Außerdem beschrieben Bonin et al. (2006) die durchschnittliche rostrokaudale Unterkieferbewegung mit 4,49 cm (SD 0,31), Niederl (2007) mit 0,87 cm (SD 0,17) und Anen (2008) mit 1,01 cm (0,26 SD). In diesem Versuch betrug die rostrokaudale Unterkieferauslenkung 0,37 cm (SD 0,10). Die laterale Auslenkung wies ebenso Abweichungen auf. Bonin et al. (2006) beschrieben diese im Mittel mit 14,39 cm (SD 0,77), Niederl (2007) im Durchschnitt vor der Zahnbehandlung mit 5,97 cm (SD 0,6) sowie Anen (2008) mit 4,54 cm (SD 0,61) und in dieser Arbeit wurde ein Durchschnittswert von 4,04 cm (SD 0,32) berechnet. Die durchschnittliche Bewegung der Kieferöffnung beschrieben Bonin et al. (2006) mit 13,96 cm (SD 0,6), Niederl (2007) vor der Routinezahnbehandlung mit 4,46 cm (SD 0,43) und Anen (2008) mit 5,37 cm (SD 0,72). Die zuvor beobachteten Abweichungen spiegeln sich in diesem Versuch wider. Hier wurden Werte mit 2,92 cm (SD 0,29) ermittelt. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Auslenkungen der verglichenen Arbeiten ist am größten zwischen Bonin et al. (2006) und dieser Arbeit. Diese stärkeren Auslenkungen lassen sich mit dem mathematischen Prinzip des Strahlensatzes erklären. Somit haben Pferde mit längeren Unterkiefern eine stärkere Auslenkung als Ponys mit kürzeren Unterkiefern.

Die unterschiedlich gewählte Lokalisation des virtuellen Markers spielt eine zusätzliche Rolle und könnte die Varianz in den Ergebnissen zusätzlich beeinflusst haben. Bonin et al. (2006) wählten den virtuellen Marker an der *Incisura mandibulae* und berechneten diesen teilweise durch Marker, die seitlich an den *Rami mandibulae* angebracht waren. Dies könnte einerseits durch die Kontraktion des *Musculus masseter* und andererseits durch die Verschieblichkeit der Haut zu Artefakten geführt haben. Die gewählte Markerposition von Niederl (2007) und Anen (2008) entspricht derselben wie in dieser Arbeit, am kaudalen Rand der *Sutura intermandibularis*. Der große Unterschied hierbei ist, dass Niederl (2007) und Anen (2008) einen bestehenden Hautmarker (Marker 9) an dieser Lokalisation verwendet haben und in dieser Arbeit ein virtueller Marker mithilfe von intraossären Markern bestimmt wurde. Dieser Punkt wurde von ihnen gewählt, da dort die Bewegung durch die Labien vernachlässigbar sein dürfte und die Schicht aus sukutanem Weichgewebe besonders dünn ist. Somit ist dort die Hautverschieblichkeit im Vergleich zu anderen Stellen besonders gering (Simhofer et al. 2011). Nach Anen's (Anen 2008) Auffassung beeinflusst vor allem die Seitwärtsbewegung der Mandibula die Hautverschieblichkeit. Dieser virtuelle Marker musste in dieser Arbeit generiert werden, da sich keiner der intraossären Tantalmarken an dieser Lokalisation befand. Dieser ist nicht so präzise wie ein intraossärer Marker, aber deutlich genauer als ein Hautmarker, da der virtuelle Marker ortstreu direkt am Knochen lokalisiert ist.

Eine weitere beeinflussende Komponente könnte in der Generierung der unterschiedlichen Koordinatensysteme liegen. Bonin et al. (2006) verwendeten zwei Koordinatensysteme. Eines für den Schädel und eines für den Unterkiefer, indem sie den Stirnmarker und den ventralen Marker am *Ramus mandibularis* als Ausgangspunkt verwendeten. Niederl (2007) und Anen (2008) hingegen verwendeten den Hautmarker auf der Stirn, auf der Medianlinie der Nase, auf Höhe der *Incisura nasoincisiva* und einen zusätzlich generierten Marker, welcher fest verbunden mit dem Stirnmarker war. In diesem Versuch wurde in Autodesk® Maya® 2019 ein Koordinatensystem manuell an der Stirn der fest gestellten Oberkieferanimation positioniert, welches die Ausrichtung von Niederl (2007) übernahm.

Zusätzlich könnten sich die Abweichungen zu Niederl (2007), welcher die gleiche virtuelle Markerposition verwendete wie in dieser Arbeit, durch die vermutlich ausschließliche Verwendung der Kieferöffnungsmaxima als Vergleichswert erklären lassen.

Die graphischen Darstellungen der Kauzyklen zeigten große Übereinstimmung mit jenen von Bonin et al. (2006). Allerdings konnte auch in dieser Arbeit, sowie in denen von Bonin et al.

(2006), Niederl (2007) und Anen (2008), die von Baker (1999) beschriebene Schleife am Ende des Kauzyklus nicht nachgewiesen werden. Dieser filmte die Pferde mittels zweidimensionaler Videoanalyse von frontal beim Fressen. Die Darstellung der Kaubewegung war somit auf die laterolaterale und ventrodorsale Kaubewegung beschränkt. Baker (1999) beschrieb zudem eine Variabilität in der intraindividuellen Kaurichtung. Diese wurde ebenso von Niederl (2007) und Anen (2008) beschrieben. In diesem Versuch änderte sich die intraindividuelle Kaurichtung bei drei von fünf Ponys. Die Kaurichtungsänderung fand zwischen den einzelnen Videoaufnahmen, jedoch nicht während einer Aufnahme statt. Bonin et al. (2006) hingegen konnten dieses Verhalten in ihrer Studie nicht beobachten. Es lässt sich vermuten, dass durch die geringe Gruppengröße von vier Tieren und nur einer Messung pro Tier dieses Verhalten nicht beobachtet werden konnte, da in den anderen Arbeiten die Kaurichtungsänderung entweder zwischen den einzelnen Messungen oder aber zwischen den Messtagen stattgefunden hat. Abschließend ist anzumerken, dass sich die mit den verschiedenen Methoden aufgenommenen Kauzyklen unterscheiden und dass die intraindividuelle Kaurichtung variabel ist. Somit werden beide Hypothesen angenommen.

Die Ergebnisse sind allerdings nur bedingt miteinander vergleichbar, da es sich bei dieser Arbeit um eine Erstbeschreibung des Kauvorgangs mittels Hochfrequenz-Fluoroskopie handelt und es keine vergleichbare Literatur mit dieser Messmethode gibt. Die Verwendung von intraossären Markern hat den Vorteil, dass die dargestellte Bewegung direkt auf den Schädelknochen des Pferdes übertragen werden kann und dass die Ergebnisse unbeeinflusst durch Artefakte bedingt durch die Verschiebung der Haut und durch Muskeltätigkeit sind. Ein Nachteil dieser Methodenwahl ist, dass es sich um eine invasive Markierungsmethode handelt, wofür die Probanden einer Operation unter Anästhesie unterzogen werden müssen. Diese ist allerdings notwendig, um eine stabile Markerpositionierung zu erhalten.

Somit stehen sich hier Hautmarkerdaten und Knochenmarkerdaten gegenüber. Es stellt sich diesbezüglich die Frage, welche Messmethodik aussagekräftiger ist. Zur detaillierten Darstellung des Einflusses der Hautverschieblichkeit auf die Messergebnisse wäre der direkte Vergleich zwischen optoelektronischen Hautmarkern und sich an derselben Lokalisation befindlichen Knochenmarkern als nächster Schritt durchzuführen. Diese invasive Messmethode kombiniert mit einem optoelektronischen Messsystem könnte zudem verwendet werden, um aus den gewonnenen Daten einen Algorithmus zu erstellen, welcher den Faktor der Hautverschieblichkeit in einem reinen optoelektronischen Messsystem berücksichtigt.

6 Zusammenfassung

Diese Studie verfolgte das Ziel, die erhobenen hochfrequenz-fluoroskopischen Daten in einer kinematischen Erstbeschreibung der Kaubewegung des Pferdes darzustellen und eventuelle Rückschlüsse auf durch die Hautverschiebung bedingte Artefakte treffen zu können. Zudem soll aufgezeigt werden, dass die intraindividuelle Kaurichtung variabel ist.

Zu diesem Zweck wurden fünf Ponys verwendet, welche dem Institut für Tierernährung, Ernährungsschäden und Diätetik der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig gehören. Bei den hier verwendeten Ponys handelte es sich um vier Stuten und einen Wallach im Alter zwischen fünf und zehn Jahren mit abgeschlossenem Zahnwechsel. Ihnen wurden in einer vorangegangenen Studie Tantalkugeln mit einem Durchmesser von 1,6 mm an definierten Lokalisationen im Schädelknochen, dem Unterkiefer und bestimmten Zähnen implantiert.

Für die Grundlage der Messungen wurde die Futteraufnahme aller Ponys aufgezeichnet. Für die Aufnahmen wurden die Ponys ohne Halfter in den durch den Metallkäfig geschützten Versuchsaufbau geführt. Die Aufnahmen erfolgten mittels einer biplanaren hochfrequenz-fluoreszenzkinematographischen Anlage, welche an der veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig steht und aus zwei Röntgenröhren und zwei Detektoren besteht. Die räumliche Kalibration des Versuchsaufbaus wurde nach der Aufnahme für die Entzerrung und vor dem nächsten Schritt, dem markerbasierten Tracking, durchgeführt. Das markerbasierte Tracking und das Verbinden der Markerkoordinaten, mittels computertomographischer Daten der einzelnen Schädel, mit den jeweiligen Schädelmodellen erfolgte mittels der XMALab Software. Die nächsten Schritte waren das Filtern der Koordinaten und der Export von Transformationsmatrizen für jeden Schädelknochen. Die dreidimensionale Animation der Schädelmodelle erfolgte mittels Autodesk® Maya® 2019 anhand der Bewegungskordinaten. Nachfolgend wurde die Bewegungen des virtuellen Markers in Relation zum Koordinatensystem dargestellt und die Bewegungskordinaten exportiert.

Die Aufnahmen der Kauzyklen der einzelnen Ponys wurden gesichtet und die einzelnen Kauzyklen voneinander unter Heranziehen der Z-Achse des virtuellen Markers getrennt.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in zwei Schritten. Erstens in einer Gruppenauswertung, wobei die Extremwerte der einzelnen Kauzyklen bestimmt und die

Minima und Maxima jeder Achse von jedem Pony gemittelt wurden. Zweitens in einer Einzelauswertung der Ponys durch individuelle Beschreibung der Kauzyklen anhand von Diagrammen der gemittelten Werte der Y- und Z-Achse, X- und Z- Achse und Y- und X-Achse.

Die durchschnittliche rostrokale Unterkieferbewegung lag bei 0,37 cm (SD 0,10) und stellt die signifikant kleinste Auslenkung dar (x-y, $p=0,000$ und x-z, $p=0,000$). Die durchschnittliche Seitwärtsbewegung des Unterkiefers lag bei 4,04 cm (SD 0,32) und war signifikant höher als die durchschnittliche Kieferöffnung mit 2,92 cm (SD 0,29) (y-z, $p=0,002$). Zudem war bei drei von fünf Ponys die intraindividuelle Kaurichtung variabel, diese änderten die Kaurichtung zwischen den Videosequenzen.

Schlussfolgend ist anzumerken, dass die Rekonstruktion der simultanen Kaubewegung mittels biplanarer Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie möglich ist. Der Vergleich zu optoelektronisch generierten Hautmarkerdaten erscheint nur bedingt möglich zu sein.

7 Summary

The aim of this study was to reveal the first kinematic illustration of the chewing movement of the horse, using high-frequency fluoroscopic data. A conclusion about relevant artifacts due to the skin displacement relative to the skull was drawn. In addition the intraindividual variability in the direction of the chewing movement is shown.

For this purpose, five ponies belonging to the Institute for Animal Nutrition, Nutritional Damage and Dietetics of the Faculty of Veterinary Medicine at the University of Leipzig were available. Four mares and one gelding aged between five and ten years were included, tooth replacement was already completed in all of them. In a previous study tantalum balls with a diameter of 1,6 mm were implanted at defined locations in the skull, lower jaw and specific teeth.

For the measurements the feed intake of all ponies was recorded. The ponies were led without a halter into the experimental setup. The setup was protected by a metal cage. The recording was done using a biplanar high-frequency fluorescence cinematographic system located at the veterinary faculty of the University of Leipzig. The setup consists of two x-ray tubes and two detectors. The spatial calibration was performed after the recording for the rectification of the produced image and before marker-based tracking. The marker-based tracking and the connection of the marker coordinates using computer tomographic data and the corresponding skull models, was performed with XMALab software. The next steps were filtering the coordinates and exportation of transformation matrices for each skull. The three-dimensional animation of the skull models was based on the movement coordinates and created with Autodesk® Maya® 2019. The movement of the virtual marker in relation to the coordinate system was imaged and the movement coordinates were exported.

The recordings of the chewing cycles of the individual ponies were analyzed and the individual chewing cycles were separated using the Z axis of the virtual marker.

The results were analyzed in two steps. First the data of the whole group was assessed, the extreme values of the individual chewing cycles were determined and the minima and maxima of each axis of each pony were averaged. Second an individual evaluation of each pony was

performed by individual description of the chewing cycles using diagrams of the mean values of the Y and Z axes, X and Z axes and Y and X axes.

The average rostrocaudal lower jaw movement was 0.37 cm (SD 0.10) and is the significant smallest excursion (x-y, $p = 0.000$ and x-z, $p = 0.000$). The average sideways movement of the lower jaw was 4.04 cm (SD 0.32) and was significantly higher than the average jaw opening of 2.92 cm (SD 0.29) (y-z, $p = 0.002$). In addition, the intraindividual chewing direction was variable in three of five ponies. These changed the chewing direction between the video sequences.

In conclusion, it should be noted that the reconstruction of the simultaneous chewing movement is possible by use of biplanar high-frequency fluorescence cinematography. However the comparability to optoelectronically generated skin marker data is limited.

8 Abkürzungsverzeichnis

8.1 Alphabetisch

Abb. :	Abbildung
cm:	Zentimeter
cm ³ :	Kubikzentimeter
DK :	Dänemark
Hz :	Herz
kV :	Kilovolt
mA :	Milliampere
Max:	Maximum
Min:	Minimum
Mm:	Millimeter
ms:	Millisekunde
Nr.:	Nummer
OP:	Operation
SD:	Standartabweichung
s:	Sekunde
Tab.:	Tabelle
TMJ:	temporomandibular joint, Kiefergelenk
z.B.:	zum Beispiel

8.2 Andere

2D:	zweidimensional
3D:	dreidimensional

9 Literaturverzeichnis

- Anen, Claudine (2008): Evaluierung des Einflusses von Zahnbehandlungen und Zahnextraktionen auf die Kaubewegungen von Pferden mittels eines optoelektronischen Messsystem [Dissertation]. Wien: Veterinärmedizinische Universität.
- Baker, G. J. (1998): Dental Physical Examination. In: *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 14 (2), S. 247–257.
- Baker, G. J. (Hg.) (1999): Equine dentistry. In: Baker, G.J., Easley, J. (Eds.), *Equine Dentistry*. London: W.B. Saunders pp.29-34.
- Baker, G. J. (2002): Equine Temporomandibular Joints (TMJ): Morphology, Function, and Clinical Disease. In: *American Association of Equine Practitioners* (48), S. 442–447.
- Baker, G. J.; Easley, J. (2005): *Equine dentistry*. 2nd ed. Edinburgh, New York: Elsevier Saunders.
- Bonin, S. J.; Clayton, H. M.; Lanovaz, J. L.; Johnson, T. J. (2006): Kinematics of the equine temporomandibular joint. In: *American journal of veterinary research* 67 (3), S. 423–428.
- Bonin, S. J.; Clayton, H. M.; Lanovaz, J. L.; Johnson, T. J. (2007): Comparison of mandibular motion in horses chewing hay and pellets. In: *Equine veterinary journal* 39 (3), S. 258–262.
- Brainerd, E. L.; Baier, D. B.; Gatesy, S. M.; Hedrick, T. L.; Metzger, K. A.; Gilbert, S. L.; Crisco, J. J. (2010): X-ray reconstruction of moving morphology (XROMM): precision, accuracy and applications in comparative biomechanics research. In: *Journal of experimental zoology. Part A, Ecological genetics and physiology* 313 (5), S. 262–279.
- Brigham, E. J.; Duncanson, G. R. (2000): Case study of 100 horses presented to an equine dental technician in the UK. In: *Equine Veterinary Education* 12 (2), S. 63–67.
- Budras, K. D. (2009): *Atlas der Anatomie des Pferdes. Lehrbuch für Tierärzte und Studierende*. 6., überarb. Aufl. Hannover: Schlütersche, 33-35 (Vet).
- Carmalt, J. L.; Townsend, H. G. G.; Allen, A. L. (2003): Effect of dental floating on the rostrocaudal mobility of the mandible of horses. In: *Journal of the American Veterinary Medical Association* 223 (5), S. 666–669.
- Collinson, M. (1994): *Food Processing and Digestibility in Horses (Equus caballus)* [Dissertation]. Monash: Monash University.

- DeLorey, M. S. (2007): A retrospective evaluation of 204 diagonal incisor malocclusion corrections in the horse. In: *Journal of veterinary dentistry* 24 (3), S. 145–149.
- Dixon, P. M. (2000): Removal of equine dental overgrowths. In: *Equine Veterinary Education* 12 (2), S. 68–81.
- Dixon, P. M. (2002): The Gross, Histological, and Ultrastructural Anatomy of Equine Teeth and Their Relationship to Disease - Proceedings of the AAEP Convention 2002. In: *American Association of Equine Practitioners Proceedings* (48).
- Dixon, P. M.; Dacre, I. (2005): A review of equine dental disorders. In: *Veterinary journal (London, England : 1997)* 169 (2), S. 165–187.
- Easley, J. (1998a): Dental Care and Instrumentation. In: *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 14 (2), S. 309–332.
- Easley, J. (1998b): Dental Corrective Procedures. In: *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 14 (2), S. 411–432.
- Ellis, A. D.; Thomas, S.; Arkell, K.; Harris, P. (2005): Adding chopped straw to concentrate feed: The effect of inclusion rate and particle length on intake behaviour of horses. Equine Nutrition Conference Hannover 2005. In: *Pferdeheilkunde* (21), S. 35–37.
- Frewein, J.; Wille K.-H.; Wilkens, H. (Hg.) (2004): Bewegungsapparat. Unter Mitarbeit von H. Augsburg. 8., völlig Neubearb. Aufl. Stuttgart: Parey, 206-326 (Lehrbuch der Anatomie der Haustiere / R. Nickel, Bd. 1).
- Geiger, Sandra (2017): Bestimmung der Genauigkeit zweier modellbasierter, dreidimensionaler Animationstechniken zur Bewegungsanalyse der Phalangen des Pferdes mittels nichtinvasiver biplanarer Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie [Dissertation]. Leipzig: Veterinärmedizinische Fakultät der Universität Leipzig.
- Graham, B. P. (2002): Dental care in the older horse. In: *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 18 (3), S. 509–522.
- Guerra S.; Pineda, M.; Negri, L. D.; Adell, A.; Correa, F.; Lee, S.; Lohse, J. (2016): Frequency of Dental Disorders in Chilean Rodeo Horses Evaluated between 2010 and 2013. In: *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research* (4(3)), S. 37–43.

- Hagebeuker, Kristin (2017): Anatomisch korrekte dreidimensionale Ausdrucke von Schädeln und Unterkiefern der Gattung *Equus* als Grundlage für den anatomischen Unterricht [Dissertation]. München: Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität.
- Janis, C. M.; Ehrhardt, D. (1988): Correlation of relative muzzle width and relative incisor width with dietary preference in ungulates. In: *Zoological Journal of the Linnean Society* 92 (3), S. 267–284.
- Knörlein, B. J.; Baier, D. B.; Gatesy, S. M.; Laurence-Chasen, J. D.; Brainerd, E. L. (2016): Validation of XMA Lab software for marker-based XROMM. In: *The Journal of experimental biology* 219 (Pt 23), S. 3701–3711.
- König, H. E.; Liebich, H. G. (Hg.) (2005): Anatomie der Haussäugetiere. 3., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schattauer, 47-324.
- König, H. E.; Liebich, H. G. (Hg.) (2015): Anatomie der Haussäugetiere. Unter Mitarbeit von Christine Aurich, Hermann Bragulla und Klaus-Dieter Budras. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Schattauer.
- Leue, G. (1941): Beziehungen zwischen Zahnanomalien und Verdauungsstörungen beim Pferd unter Heranziehung von Kaubildern [Dissertation]. Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Leue, P. (1944): Längs- und Querlüfter der Mahlflächen beim Zubeißen unter Pferden. In: *Berliner und Münchner Tierärztliche Wochenschrift und Wiener Tierärztliche Monatsschrift* 4, S. 123–125.
- Meyer, H.; Ahlswede, L.; Reinhardt, H. J. (1975): Untersuchung über Fressdauer, Kaufrequenz und Futterzerkleinerung beim Pferd. In: *Deutsche tierärztliche Wochenschrift* (82), S. 54–58.
- Niederl, Melanie (2007): Kinematische Analyse der Kaubewegungen von Pferden vor und nach Routinezahnbehandlungen [Dissertation]. Wien: Veterinärmedizinische Universität.
- Plesh, O.; Bishop, B.; McCall, W. D. (1993): Kinematics of jaw movements during chewing at different frequencies. In: *Journal of Biomechanics* 26 (3), S. 243–250.
- Recht, G. (Hg.) (2019): StrlSchV Strahlenschutzverordnung. 2. Aufl.: Independently published.
- Recht, G. (Hg.) (2020): StrlSchG Strahlenschutzgesetz. 2. Aufl.: Independently published.

- Rucker, B. A. (2004): Incisor and molar occlusion: normal ranges and indications for incisor reduction. Proceedings of the 50th Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners, Denver, Colorado, USA. In: *American Association of Equine Practitioners*, S. 7–12.
- Salomon, F.-V.; Achilles, W.; Gille, U. (Hg.) (2008): Anatomie für die Tiermedizin. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Enke, 22-264.
- Salomon, F.-V.; Geyer, H. (Hg.) (2011): Atlas der angewandten Anatomie der Haustiere. 4., aktualisierte Aufl. Stuttgart: Enke.
- Salomon, J. A.; Waysenson, B. D. (1979): Computer-monitored radionucleotide tracking of three-dimensional mandibular movements. Part I: Theoretical approach. In: *The Journal of Prosthetic Dentistry* 41 (3), S. 340–344.
- Scrutchfield, W. L.; Schumacher, J. (1993): Examination of the Oral Cavity and Routine Dental Care. In: *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 9 (1), S. 123–131.
- Simhofer, H.; Niederl, M.; Anen, C.; Rijkenhuizen, A.; Peham, C. (2011): Kinematic analysis of equine masticatory movements: comparison before and after routine dental treatment. In: *Veterinary journal (London, England : 1997)* 190 (1), S. 49–54.
- van Lysel, M. S. (2000): The AAPM/RSNA physics tutorial for residents: fluoroscopy: optical coupling and the video system. In: *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 20 (6), S. 1769–1786.
- van Weeren, P. R.; van den Bogert, A. J.; Barneveld, A. (1990): A quantitative analysis of skin displacement in the trotting horse. In: *Equine veterinary journal. Supplement* (9), S. 101–109.
- Wang, J.; Blackburn, T. J. (2000): The AAPM/RSNA physics tutorial for residents: X-ray image intensifiers for fluoroscopy. In: *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 20 (5), S. 1471–1477.
- Wissdorf, H. (Hg.) (2011): Praxisorientierte Anatomie und Propädeutik des Pferdes. Unter Mitarbeit von H. Gerhards, B. Huskamp und E. Deegen. Hannover: M. & H. Schaper.
- You, B. M.; Siy, P.; Anderst, W.; Tashman, S. (2001): In vivo measurement of 3-D skeletal kinematics from sequences of biplane radiographs: application to knee kinematics. In: *IEEE transactions on medical imaging* 20 (6), S. 514–525.

10 Abbildungs-/Tabellenverzeichnis

Abb. 1: Kauzeichner und Kaubild von P. Leue aus (Leue 1941).....	9
Abb. 2: Molograph nach Leue (Joest 1969)	9
Abb. 3: Kauzyklus wie dieser von Baker dargestellt wurde (Baker 1998)	10
Abb. 4: Abbildung eines Kauzyklus (Niederl, 2007) - Frontalansicht, der im Uhrzeigersinn („clockwise“) verläuft (Y- und Z-Achse)	12
Abb. 5: Schematische Darstellung der hochfrequenz-fuoreszenzkinematischen Anlage, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig	14
Abb. 6: Lokalisation der Tantalmarker auf der linken Schädelseite,, Kaustudie 2015, Linda Schuchardt, Max-Planck-Weizmann-Center, Leipzig, Deutschland.....	18
Abb. 7: Lokalisation der Tantalmarker auf der rechten Schädelseite, Kaustudie 2015, Linda Schuchardt, Max-Planck-Weizmann-Center, Leipzig, Deutschland.....	19
Abb. 8: Versuchsaufbau in der hochfrequenz-fuoreszenzkinematischen Anlage, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig in Seitenansicht während eines Versuchsdurchgangs.....	20
Abb. 9: Versuchsaufbau in der hochfrequenz-fuoreszenzkinematischen Anlage, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig in Hinteransicht	20
Abb. 10: Kalibrationskubus aus Lego®	21
Abb. 12: Koordinatensystem in Autodesk® Maya® 2019	23
Abb. 11: Koordinatensystem nach Anen, Claudine (2007)	23
Abb. 13: Bewegung des virtuellen Markers in aufeinanderfolgenden Kauzyklen entlang der Z-Achse (Öffnen und Schließen des Kiefers); die gelbe Markierung begrenzt einen Kauschlag	24
Abb. 14: Mittelwerte von Maxima und Minima der X-, Y- und Z- Achse [cm]	26
Abb. 15: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 1 [cm]	29
Abb. 16: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 1 [cm]	30
Abb. 17: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 1 [cm]	30
Abb. 18: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 2 [cm]	31
Abb. 19: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 2 [cm]	32
Abb. 20: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 2 [cm]	32
Abb. 21: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 3 [cm]	34
Abb. 22: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 3 [cm]	35

Abb. 23: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 3 [cm]	35
Abb. 24: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 4 [cm]	37
Abb. 25: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 4 [cm]	38
Abb. 26: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 4 [cm]	38
Abb. 27: repräsentativer Kauzyklus entlang der Y- und Z-Achse von Pony 5 [cm]	39
Abb. 28: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Y-Achse von Pony 5 [cm]	40
Abb. 29: repräsentativer Kauzyklus entlang der X- und Z-Achse von Pony 5 [cm]	40
Tab. 1: Markerpositionen der linken Schädelhälfte	17
Tab. 2: Markerpositionen der rechten Schädelhälfte	18
Tab. 3: Anzahl der ausgewählten Kauzyklen für jedes einzelne Pony	27
Tab. 4: Distanzen der Unterkieferbewegung entlang der verschiedenen Achsen	27
Tab. 5: : Einteilung der einzelnen Kausequenzen der Ponys in die Kaurichtungen (einmal aus Frontalansicht nach Baker (Baker 1999) und einmal aus Sicht des Probanden)	28
Tab. 6: Einzelwerte des Kauzyklus von Pony 1 [cm]	31
Tab. 7: Einzelwerte der Kauzyklen von Pony 2 [cm]	33
Tab. 8: Einzelwerte der Kauzyklen von Pony 3 [cm]	36
Tab. 9: Einzelwerte der Kauzyklen von Pony 4 [cm]	39
Tab. 10: Einzelwerte des Kauzyklus von Pony 5 [cm]	41

11 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei meiner Betreuerin Dr.med.vet. Sandra Geiger und meinem Betreuer Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Peham bedanken. Es war ein sehr interessantes und abwechslungsreiches Thema. Vielen lieben Dank für die Unterstützung während der Durchführung des Versuchs sowie während des Auswertens und Schreibens! Danke für die liebe Betreuung, die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich auch bei dem Team des veterinäranatomischen Instituts der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig, hier ganz besonders Prof. Dr. Christoph Mülling, welcher mir die fluoreszenzkinematische Anlage zur Verfügung stellte.

Vielen Dank an Frau Prof.Dr. Ingrid Vervuert, die mir freundlicherweise die Ponys des Instituts für Tierernährung, Ernährungsschäden und Diätetik der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig zur Verfügung gestellt hat.

Sehr dankbar bin ich für die großartige Unterstützung von Franziska Wagner und Dr.rer.nat. Ellen Schulz-Kornas, die mir während des praktischen Versuchs und auch danach zur Seite gestanden und dafür gesorgt haben, dass der Versuch reibungslos abgelaufen ist.

Zudem möchte ich mich bei Mag.med.vet. Silvio Kau bedanken, welcher den Grundstein zum Entstehen dieses Versuchs gelegt und mir bei den Recherchen zum Thema sehr geholfen hat. Danke das du mir mit Rat zur Seite stand hast.

Ich bedanke mich auch bei meiner Familie, meinen Vertrauten und Freunden, die mich in der einen oder anderen Phase der Arbeit wieder aufgebaut oder beruhigt haben.

Ohne Sie/Euch alle wäre das nicht möglich gewesen!

Danke!