



Inaugural

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Dr. med. vet.

**Computertomografische cephalometrische Untersuchungen am Pferdekopf -
Grundlagen und Bestimmung eines interinzisalen Winkels**

Mag. Silvio Kau

2020

Meinem Opa Walter Kau † 2005
Meinem Onkel Wilfried Scheriau † 2017
Meiner Oma Werngard Scheriau † 2020

Aus dem Institut für Veterinär-Anatomie, -Histologie und -Embryologie

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. Carsten Staszky

**Computertomografische cephalometrische Untersuchungen am Pferdekopf –
Grundlagen und Bestimmung eines interinzisalen Winkels**

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

Eingereicht von
Mag. med. vet. Silvio Kau
Tierarzt aus Ebenthal in Kärnten

Gießen, 2020

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

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

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. Carsten Staszyc

Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr. Martin Schmidt

Prüfer: Univ.-Prof. Dr. Axel Wehrend

Tag der Disputation: 29. Oktober 2020

“A straight line is not the shortest distance between two points.”

Madeleine L'Engle

Abkürzungsverzeichnis

CBCT	Cone Beam Computertomografie
CT	Computertomografie
EIR	External Inflammatory Resorption; externe entzündliche Resorption
EMS	Equines Metabolisches Syndrom
EOTRH	Equine Odontoclastic Tooth Resorption and Hypercementosis
ERR	External Replacement Resorption; externe Ersatzresorption
FORLs	Feline Odontoclastic Resorptive Lesions
IIA	Interinzisale Angulation
LPS	Lipopolysaccharide
MIRR	Multiple Idiopathic Root Resorption
MOAs	Wackel- oder Motion Artefakte
MPR	Multiplanare Rekonstruktion
NFκB	Nuclear factor 'kappa-light-chain-enhancer' of activated B-cells
PDL	Periodontales Ligament
PPID	Pituitary Pars Intermedia Dysfunction
RANKL	Receptor Activator of NFκB Ligand
Smad2	Smad family member 2 = ein Protein ähnlich den Genprodukten von Drosophila 'mother against decapentaplegic homolog 2'
TGF-β	Transforming growth factor-beta
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Publikation I	9
3	Publikation II	28
4	Übergreifende Diskussion	61
4.1	Diskussion der angewandten Methoden.....	61
4.2	Diskussion und Interpretation der Ergebnisse.....	66
4.3	Schlussfolgerungen.....	69
4.4	Ausblick	70
5	Zusammenfassung	71
6	Summary.....	73
7	Literaturverzeichnis.....	75
8	Publikationsverzeichnis.....	82
9	Erklärung.....	84
10	Danksagung.....	85

1 Einleitung

In der Pferde Zahnheilkunde muss den physiologischen Veränderungen und den Pathologien im Gebiss alternder und geriatrischer Pferde sowie den daraus erwachsenden individuellen Bedürfnissen, hinsichtlich Fütterung, Haltung, Therapie und Zahnprophylaxe, zunehmend mehr Beachtung geschenkt werden (du Toit und Rucker, 2013; Bushell und Murray, 2016; Nicholls und Townsend, 2016; Jarvis et al., 2019). Über normale altersbedingte zahnpositionsabhängige Winkelveränderungen im Schneidezahngewiss von Pferden und deren möglichen pathoätiologischen Einfluss auf die Entstehung und das Fortschreiten inzisaler Parodontopathien sowie über die methodischen Grundlagen zur Winkeldefinition und -messung ist bisweilen sehr wenig bekannt.

Während Erkrankungen des Zahnhalteapparates (*Parodontium*), ausgelöst durch unterschiedliche pathoätiologische Faktoren, sowohl bei juvenilen wie auch alternden und geriatrischen Pferden auftreten, steigt die Prävalenz von Parodontopathien mit zunehmenden Alter deutlich an (Klugh, 2005). Es wird angenommen, dass die Prävalenz bei Pferden älter als 15 Jahre bis zu 60% betragen kann (Baker, 1970) und bei Pferden älter als 29 Jahre bis zu 75% (Ireland et al., 2012). Ireland et al. (2011a) definierten Pferde mit einem Alter > 15 Jahre als geriatrisch und zeigten, dass diese Altersgruppe in Großbritannien mit rund 29% einen erheblichen Anteil in der Pferdepopulation ausmacht.

Es wird angenommen, dass die Ätiologie und Pathogenese parodontaler Erkrankungen bei Pferden von der Physiologie des Exfoliations- und Eruptionsprozesses ihrer hypsodonten Zähne, auftretenden orthodontischen Kräften und der Biomechanik des Kauvorganges wie auch bakteriellen Erregern und immunologischen Abwehrmechanismen abhängen dürften (Klugh, 2005). In der aktuellen Literatur besteht auch die Annahme, dass beim Pferd, verglichen mit brachyodonten Spezies, primär das Vorhandensein erweiterter Interproximalräume (Diastemata), die oft assoziierte Futterstase und anschließende Invasion bakterieller Erreger maßgeblich an der Entstehung von Parodontitis beteiligt sind (Kennedy und Dixon, 2018). In Großbritannien scheint die Prävalenz von Diastemata der Backenzähne bei 50% in der Pferdepopulation zu liegen, wobei rund 91% der Diastemata impaktierte Futterbestandteile und größtenteils eine parodontale Affektion aufweisen (Walker et al., 2012). In einer homogenen Population südamerikanischer Arbeitspferde mit einem mittleren Alter von 18 Jahren lag die Prävalenz von Diastemata der Backenzähne bei rund 66% (Kunz et

al., 2020). Bei Pferden älter als 29 Jahre wurde sogar eine Prävalenz von rund 79% im Backenzahnbereich und 54% bei den Schneidezähnen gezeigt (Ireland et al., 2012). Erste Anzeichen einer der am häufigsten bei Schneidezähnen auftretenden progressiven und schmerzhaften parodontalen Erkrankung, der Equine Odontoclastic Tooth Resorption and Hypercementosis (EOTRH), treten zumeist ab einem Alter von 10 - 15 Jahren auf (Smedley et al., 2015; Henry et al., 2017; Rehrl et al., 2018). Der Beginn dieser parodontalen Schneidezahnerkrankung und assoziierte Symptome wie auch das klinische Erscheinungsbild werden jedoch nicht von Diastemata geprägt (Lorello et al., 2016; Rahmani et al., 2019). Vielmehr dürften altersabhängige morphometrische und anguläre Veränderungen der Schneidezähne und daraus resultierende biomechanische Belastungsänderungen des Parodontiums eine weitaus größere Rolle spielen (Schrock et al., 2013a; Schrock et al., 2013b).

EOTRH betrifft hauptsächlich die Schneidezähne (*Dentes incisivi*) und Hengstzähne (*Dentes canini*), kann jedoch in seltenen Fällen auch die Backenzähne (*Dentes premolares et molares*) betreffen (Staszuk et al., 2008; Arnbjerg, 2014; Moore et al., 2016; Hole und Staszuk, 2018). Als primäre Incisivopathie liegt die EOTRH im Fokus zahlreicher Studien und dennoch bleibt ihre multifaktorielle Pathoätiologie bis dato nicht restlos geklärt. Es wird angenommen, dass das Alter kein alleiniger Prädiktor für eine Erkrankung mit EOTRH ist (Pearson et al., 2013). Zu den Risikofaktoren zählen vermutlich Traumata durch übermäßige Zahnbehandlungen, fütterungsbedingte Reduktion der täglichen Kautätigkeit, Endokrinopathien wie Equines Metabolisches Syndrom (EMS) und Pituitary Pars Intermedia Dysfunction (PPID), Hypervitaminose A, Hypocalciämie, Hyperparathyroidismus und ischämische Nekrosen (Caldwell, 2007; Pearson et al., 2013). Andere Autoren vermuten, dass es sich, wie bei einem ähnlich erscheinenden Syndrom des Menschen (Multiple Idiopathic Root Resorption, MIRR) oder der Katze (Feline Odontoclastic Resorptive Lesions, FORLs), um eine immunmedierte Parodontopathie handeln könnte (Dixon und du Toit, 2011). Ausreichend Beweise für die zumeist anekdotisch in der Literatur angegeben Annahmen fehlen jedoch. Staszuk et al. (2008) postulierten bereits früh, dass ein mechanischer Insult auf das parodontale Ligament (*Ligamentum periodontale*, PDL) älterer Pferde ein Initiationsfaktor im EOTRH Syndromkomplex sein dürfte. Schrock et al. (2013a) konnten dann mittels Finite Element Analyse detailliert zeigen, dass die Amplitude der Druck- und Zugkräfte im PDL und im umliegenden Alveolarknochen mit der Alterung des Schneidezahngebisses und bei gleichbleibenden okklusalen Kräften bereits beim zahngesunden Pferd deutlich ansteigt. Die

Lokalisationen höchster parodontaler Energiedichten gleichen jenen der initial und in weiterer Folge am stärksten auftretenden resorptiven und reparativen Läsionen im Zuge der EOTRH (Staszyk et al., 2008; Schrock et al., 2013a). Obwohl es keine evidenzbasierten Studien zur altersbedingten Veränderung der Winkelung der Schneidezähne gibt, wird ihr eine wichtige pathoätiologische Rolle zugeschrieben (Schrock et al., 2013a). Bei der EOTRH dürfte auch die nachweislich sekundäre Besiedelung des Parodonts mit bakteriellen Mikroorganismen, wie *Treponema* spp. und *Tannerella* spp. (Sykora et al., 2014), zur Progressivität beitragen.

In der Humanorthodontie sind die am Zahn angelegten Druck- und Zugkräfte, deren Wirkungsrichtung und Akkumulation auch von der Stellung des Zahnes abhängt, bekannte Faktoren, durch die PDL- und Alveolarknochenzellen ihre molekularen Eigenschaften und ihr Verhalten ändern. Angewendete orthodontische Kräfte führen zu einer erzwungenen Zahnbewegung und oft übermäßigen parodontalen Beanspruchung, was abhängig von mikro- und makroanatomischen oder genomischen Variationen zu individuellen iatrogenen Komplikationen, wie Alveolarknochenverlust oder -apposition und Wurzelresorption führen kann (Masella und Meister, 2006; Ahn et al., 2013). Zudem scheinen natürliche auf die Okklusionsflächen wirkende Kräfte bei rund 7 - 13% der Menschen, ohne gleichzeitige orthodontische Therapie, zur Entstehung von Wurzelresorptionen beizutragen (Rudolph, 1936; Harris et al., 1993). Im Gegensatz zu brachyodonten Spezies sind es insbesondere die hypsodonten Schneidezähne des Pferdes, die vermutlich einer größeren altersabhängigen Winkelveränderung unterliegen (u.a. Habermehl, 1981; Richardson et al., 1995; Muylle et al., 1996; Muylle et al., 1999). Dies könnte das Pferd weitaus anfälliger für mechanisch bedingte parodontale Traumata machen. Metrische Daten, methodische Standards und eine zahnpositionsabhängige Differenzierung fehlen jedoch.

Sehr ähnlich den mechanisch bedingten resorptiven und reparativen parodontalen Läsionen des Menschen (Fuss et al., 2003), treten auch bei der EOTRH resorptive Läsionen des Alveolarknochens und der intraalveolären Zahnhartsubstanzen und/oder zementogene Zubildungen auf (Gregory et al., 2006; Barratt, 2007; Staszyk et al., 2008; Lorello et al., 2016; Henry et al., 2017; Rehrl et al., 2018). Henry et al. (2017) zeigten, dass bei Pferden ohne eine Vorgeschichte inzisaler Pathologien ($n = 169$; Alter: 5 - 34 Jahre) 88.2% radiologische Anzeichen resorptiver Läsionen und lediglich 20.1% eine Hyperzementose aufweisen. In derselben Studie wurde gezeigt, dass External Replacement Resorption (ERR; externe

Ersatzresorption) mit 76.9% der Pferde dicht gefolgt von der External Inflammatory Resorption (EIR; externe entzündliche Resorption) mit 49.1% die häufigsten beiden Resorptionstypen sind. Rund 49% betroffener Pferde zeigen einen Resorptionstyp und 47% zwei Resorptionstypen wobei nur 23.4% der Pferde mit resorptiven Läsionen auch eine Hyperzementose aufweisen, jedoch alle Pferde mit Hyperzementose auch Resorptionen (Henry et al., 2017). Rehr et al. (2018) konnten in einer im Mittel älteren Population darstellen ($n = 142$; Alter: 10-37 Jahre), dass jedes Pferd älter als 14 Jahre zumindest geringgradige radiologische Veränderungen aufweist und Pferde über 28 Jahre zumindest mittelgradige Veränderungen.

Das Progressivitätsmuster der beiden häufigsten inzisalen Resorptionstypen beim Pferd scheint sich gegenläufig zu verhalten. Radiologische Veränderungen der ERR schreiten von den Triadan 03er zu den 01er und die der EIR von den 01er zu den 03er fort (Henry et al., 2017). Studien zur Replacement und Inflammatory Resorption beim Menschen geben einen Hinweis darauf, dass beide Typen ursächlich einer mechanisch bedingten Verletzung parodontaler Weichgewebe unterliegen (Fuss et al., 2003). Der Resorptionstyp und die Progressivität scheinen sich hingegen aus den weiterwirkenden Stimuli, wie zum Beispiel einer mechanischen Überbeanspruchung oder einer sekundären Infektion zu ergeben (Fuss et al., 2003). Wie beim Menschen ist die exakte pathoätiologische Ursache der Hyperzementose auch beim Pferd nicht restlos geklärt. Bei beiden Spezies dürfte es sich eher um einen Reparaturprozess als eine eigenständige Erkrankung handeln (Fuss et al., 2003; Staszuk et al., 2008; Earley und Rawlinson, 2013; Henry et al., 2017). Beim Menschen wird ein Zusammenhang mit entzündlichen parodontalen Prozessen angenommen (Zhou et al., 2012).

Humane primäre Zementoblasten zeigen *in vitro* unter aseptisch entzündlicher Kostimulation und Druckkraftstimulation einen deutlichen Anstieg der Receptor Activator of NF κ B Ligand (RANKL) Expression (Diercke et al., 2012). Die Mechanosensitivität von Zementoblasten hängt stark von der Prostaglandin-E₂ Expression ab und die Differenzierungsrichtung zudem vom Vorliegen von entweder Zug- oder Druckstress (Rego et al., 2011). Bei Ratten wurde gezeigt, dass RANKL und weitere Zytokine, die durch eine abnormale biomechanische Stimulation des PDL hochreguliert werden, Osteo- und Odontoklasten anlocken und somit zu alveolären und dentalen Resorptionserscheinungen führen (Alhashimi et al., 2001; Diercke et al., 2012). Die

lokale Expression dieser Zytokine steigt auch bei Pferden mit Parodontitis an (Kennedy et al., 2017).

Wie bei Mäusen gezeigt werden konnte, verursacht ein chronisch mechano-stressbedingter Entzündungszustand der Gingiva und des PDL entlang des palatinalen oder lingualen Alveolarkamms und weiter apikal eine Dysregulation des TGF- β /Smad2 Signalweges und bedingt damit einen Verlust der Integrität des junktionalen gingivalen Epithels (Fujita et al., 2012). Bei älteren Pferden kommt es bei gleichbleibenden und orthogonal auf die Kaufläche der Schneidezähne wirkenden natürlichen Kräften ebenso zu einer Belastungsakkumulation des Parodonts entlang des Alveolarrandes (Schrock et al., 2013a). Die mikromorphologischen Charakteristika des gingivalen Epithels beim Pferd ähneln in diesem Bereich stark jenen brachyodonter Spezies, inklusive des Menschen (Steinfort et al., 2019). Vorerst bleibt unklar, ob sich die Regenerationsfähigkeit des junktionalen gingivalen Epithels beim Pferd, aufgrund der kontinuierlichen Eruption equiner hypsodonter Zähne und der damit verbundenen kontinuierlichen parodontalen Remodellierung (Warhonowicz et al., 2006), von brachyodonten Spezies unterscheidet. Einmal initiiert scheinen jedoch bakterielle Infektionserreger den Prozess des mechanisch bedingten epithelialen Integritätsverlustes zu beschleunigen (Fujita et al., 2018). Dies wiederum kann zu einer schnelleren bakteriellen Invasion des PDL und folgender Lipopolysaccharid (LPS)-Exposition von Zementoblasten führen, was bei Mäusen *in vivo* eine Hochregulierung von RANKL und assoziierte resorptive Läsionen auslösen konnte (Nociti et al., 2004).

Wir vermuten, dass alters- und zahnpositionsabhängige Veränderungen der interinzisalen Angulation (IIA) und Zahnmorphologie sowie möglicherweise auch iatrogene Veränderungen der Kauflächeninklination und die sich dadurch ändernde parodontale Stressdistribution unter bestimmten Umständen zunächst zu einem fokalen oder multifokalen aseptischen chronischen Entzündungszustand des PDL führt, was wiederum wegbereitend für andere Faktoren des EOTRH-Syndroms sein kann.

Die Winkelung gegenüberliegender Schneidezähne und insbesondere die morphologischen Veränderungen der Kauflächen wurden in vielen Studien lediglich zur Altersbestimmung von Pferden herangezogen (Habermehl, 1981; Richardson et al., 1995; Jeffrey, 1996; Muylle et al., others 1996; Muylle et al., 1997; Richardson, 1997; Loch und Bradley, 1998; Martin et al., 1999; Muylle et al., 1999). Basierend auf lateralen Profilansichten oder -fotos klinischer

Kronen wird global für alle Zahnpositionen berichtet, dass der Winkel zwischen gegenüberliegenden Schneidezähnen junger Pferde eine vertikale Linie bildet (Muylle et al., 1997; Muylle et al., 1998; Muylle et al., 1999; Klugh, 2010; Muylle, 2011) und dieser mit zunehmenden Alter spitzwinkelig wird (Richardson et al., 1995; Richardson, 1997; Martin et al., 1999; Muylle et al., 1999; Klugh, 2010; Nicholls und Townsend, 2016), stumpfwinkelig wird und bleibt (Muylle et al., 1997; Muylle et al., 1998) oder zunimmt (Dixon und du Toit, 2011). Andere Studien geben Winkelwerte an. Bei jungen Pferden wird ein Winkel von 180° beschrieben (Habermehl, 1981; Muylle et al., 1996; Loch und Bradley, 1998; Dixon und du Toit, 2011). In der Studie von Habermehl (1981) wird angegeben, dass Pferde im Alter von 8 - 15 Jahren einen Winkel um 90° aufweisen und ältere Pferde einen Winkel $< 90^\circ$. Muylle et al. (1996) legen dar, dass Pferde > 19 Jahre Winkelwerte um die 90° aufweisen. Loch und Bradley (1998) wiederum gehen davon aus, dass alte Pferde einen Winkel $< 90^\circ$ aufweisen, eine genaue Altersangabe fehlt jedoch.

Empirische Beobachtungen zu altersbedingten Alterationen der IIA führten vor allem in der deutschsprachigen Literatur zur theoretischen Deduktion, dass das Schneidezahngebiss beim Pferd, in latero-lateraler Ansicht, mit zunehmendem Alter in ein Zangen-, Halbwinkel- und bei älteren Pferden in ein Winkelgebiss eingeteilt werden kann (Mill, 2006; Herold et al., 2008; Staszky, 2011; Staszky, 2015). Die Systematik dieser starren Einteilung beruht auf empirischen Beobachtungen. Viele Arbeiten berichten über eine altersabhängige Abnahme der IIA, ohne jedoch die zur Messung herangezogenen dentalen/ dentofazialen Orientierungspunkte sowie Messmethoden zu beschreiben und geben eine globale Winkelbeschreibung oder einen globalen Winkelwert generalisiert für alle Zahnpositionen an.

Muylle et al. (1996) spezifizieren, dass für die Beurteilung des Winkels gegenüberliegender Schneidezähne unter anderem die Lingual- und Palatalfläche der klinischen Kronen der O3er unter Verwendung von Profilfotografien herangezogen wurden. In dieser Studie wird jedoch andererseits auch angegeben, dass die vestibulären Aspekte klinischer Kronen zur Winkelbestimmung herangezogen wurden. In einer erst kürzlich veröffentlichten Studie von Domanska-Kruppa et al. (2019) wurden konventionelle zweidimensionale (2D)-Cephalogramme basierend auf standardisierten Röntgenaufnahmen und definierte dentoalveoläre Orientierungspunkte zur Beurteilung von Class II Malokklusionen und einer globalen IIA bei Warmblutfohlen verwendet. Zahnpositionsabhängige und altersbedingte

Unterschiede der IIA konnten aufgrund von allgemeinen Einschränkungen der 2D Methode und des Studiendesigns nicht ermittelt werden. Einzig in der Studie von Listmann et al. (2017), wurden dreidimensionale (3D) Rekonstruktionen von Kadaverköpfen basierend auf computertomografischen (CT) Daten und ein Verfahren zur 3D Identifikation von Orientierungspunkten verwendet, um den sagittalen und transversalen Kauflächenwinkel einzelner Schneidezahnpositionen zu beurteilen.

Technische Fortschritte der letzten Jahre ermöglichen nun auch eine CT Untersuchung des Kopfes am stehend sedierte Pferd (Dakin et al., 2014; Barakzai und Barnett, 2015; Manso-Díaz et al., 2019; Bregger et al., 2019; Davies et al., 2020). Derzeit gibt es jedoch keine Arbeiten, die basierend auf Daten helikaler Computertomografen mit mehrzeiligen Detektorsystemen, einen breitgefächerten Überblick über das radiologische Erscheinungsbild normaler anatomischer oromaxillofazialer Strukturen wie auch Pathologien und die Vorteile dieser Systeme am stehend sedierte Pferd geben (Dakin et al., 2014; Barakzai und Barnett, 2015; Manso-Díaz et al., 2019). Die methodische Standardisierung der Kopf- und Kieferpositionierung in der CT kann zum Beispiel Winkelmessungen zwischen Strukturen im Ober- und Unterkiefer erlauben, was die 3D-Cephalometrie für unterschiedlichste Fragestellungen auch beim Pferd klinisch anwendbar macht. Eine Beschreibung der möglichst exakten und standardisierten Lagerung und Ausrichtung des Kopfes fehlt bisweilen.

Die 3D-Cephalometrie ist eine häufig in der Humanmedizin verwendete Methode zur Diagnostik kieferorthopädischer Anomalien sowie zur Planung und Kontrolle orthodontischer Eingriffe (Alves et al., 2007; Karatas und Toy, 2014). In der Humanorthodontie stellt die CT-assistierte 3D-Cephalometrie eine vielversprechende und genaue Methode zur reproduzierbaren Identifikation anatomischer Orientierungspunkte und Messung interdentaler sowie dentofazialer Winkel dar (Nalçaci et al., 2010, Lisboa et al., 2015). Die 3D-Cephalometrie birgt Vorteile gegenüber der konventionellen 2D-Cephalometrie, wie diese bereits beim Fohlen Anwendung fand (Domanska-Kruppa et al., 2019). Bei der 2D-Cephalometrie stellt nicht nur die Standardisierung der Kopfposition einen limitierenden Faktor dar, sondern auch die lokale Vergrößerung detektorferner Strukturen und die Distorsion des abzubildenden Objektes sowie die 2D Projektion von 3D Objekten und eine damit verbundene Superposition aller Strukturen im Röntgenstrahlengang (Bergersen, 1980; Carlos Quintero et al., 1999; Lou et al., 2007).

Um in weiterführenden Studien die altersabhängige Dynamik biomechanischer Veränderungen im Schneidezahngewiss des Pferdes weiter untersuchen zu können, bedarf es initial einer methodischen Standardisierung und einer Messung physiologischer Winkelveränderungen. Dementsprechend war das Ziel der zwei konsekutiv aufbauenden Studien einen Überblick über die Grundlagen und die Standardisierung der Kopf-CT Untersuchung mit mehrzeiligen Geräten am stehend sedierte Pferd zu geben, ihre klinische Anwendbarkeit für Messungen am Pferdekopf hervorzuheben, sowie basierend auf standardisierten CT Daten die altersabhängige physiologische und zahnpositionsabhängige Winkelveränderung klinischer Schneidezahnkronen zu bestimmen.

2 Publikation I

Computertomografie in der Pferde Zahnheilkunde – ein Überblick

S. Strauch, J. Schwarzer, S. Kau

Pferdespiegel

Für Thieme Continuing Veterinary Education (CVE)

Peer reviewed und anerkannt durch die Akademie für tierärztliche Fortbildung (ATF)

Date 2019, Volume 22, Issue 01, Pages 23-36

DOI: 10.1055/a-0671-8580

Accepted on Nov. 21th 2018

Zusammenfassung

Die computertomografische (CT) Untersuchung des Pferdekopfs ist mittlerweile auch am stehenden, sedierten Pferd möglich. In diesem Artikel wird ein Überblick über die Indikationen einer CT-Untersuchung, über die methodische Durchführung am stehenden Patienten sowie über die technischen Grundlagen und die digitale Bildverarbeitung gegeben. Anhand von Beispielbildern werden häufige computertomografische Befunde an den Zähnen, Zahnfächern und Nasennebenhöhlen aufgezeigt und daraus resultierende Diagnosen und therapierelevante Besonderheiten erläutert.

Einleitung

Die Entwicklung von speziellen Computertomografen und Standvorrichtungen ermöglicht eine computertomografische Untersuchung des Kopfes am stehenden, sedierten Pferd. Die Risiken einer Allgemeinanästhesie [1] oder lagerungsbedingter Fehlinterpretationen von Befunden können dabei vermieden werden. Am liegenden Pferd wird häufig ein Anschwellen der Nasenschleimhäute und eine veränderte Lage von Flüssigkeitsansammlungen beobachtet [2], die bei aufrechter Kopfposition nicht auftreten. Dennoch kann bei Pferden mit wehrhaftem Verhalten trotz Sedation (z.B. unerfahrene Jungtiere) und sehr kleinen Patienten (Fohlen, Esel, Mini-Shetlandponies), deren Hals zu kurz für eine optimale Lagerung des Kopfes ist, eine Untersuchung in Allgemeinanästhesie notwendig werden.

Vor jeder CT-Untersuchung ist eine ausführliche Anamnese und klinische Voruntersuchung des Pferdes unabdingbar. Danach erfolgt die eingehende Untersuchung der Maulhöhle in Sedation. Bei Bedarf werden zusätzlich Röntgenbilder angefertigt, eine Ultraschall-Untersuchung und/oder eine Endoskopie der Nasengänge und Nasennebenhöhlen durchgeführt.

Die Autoren verwenden zur Sedation für eine Computertomografie nur α 2-Agonisten, z.B.:

- Detomidinhydrochlorid, 0,01mg/kg KG i. v.

So werden unerwünschte exzitatorische Bewegungen, die bei Kombination mit Opiaten (z.B. Butorphanol) auftreten können [3, 4], vermieden und Bewegungsartefakte reduziert.

Eine CT-Untersuchung ist indiziert, wenn nach ausführlicher Voruntersuchung unklar bleibt, ob und wie viele Zähne erkrankt sind oder in welchem Zustand sich der erkrankte Zahn und benachbarte Strukturen befinden. Bei Pferden mit einseitigem Nasenausfluss wird häufig eine CT-Untersuchung durchgeführt, um die Ursache und das Ausmaß der Nasen- bzw. Nasennebenhöhlenerkrankung festzustellen. Zudem lässt sich die Therapie zielgerichteter planen und die Prognose besser einschätzen. Hilfreich ist hier die Möglichkeit einer 3D-Darstellung für die Planung des Operationszugangs (Abb. 1).

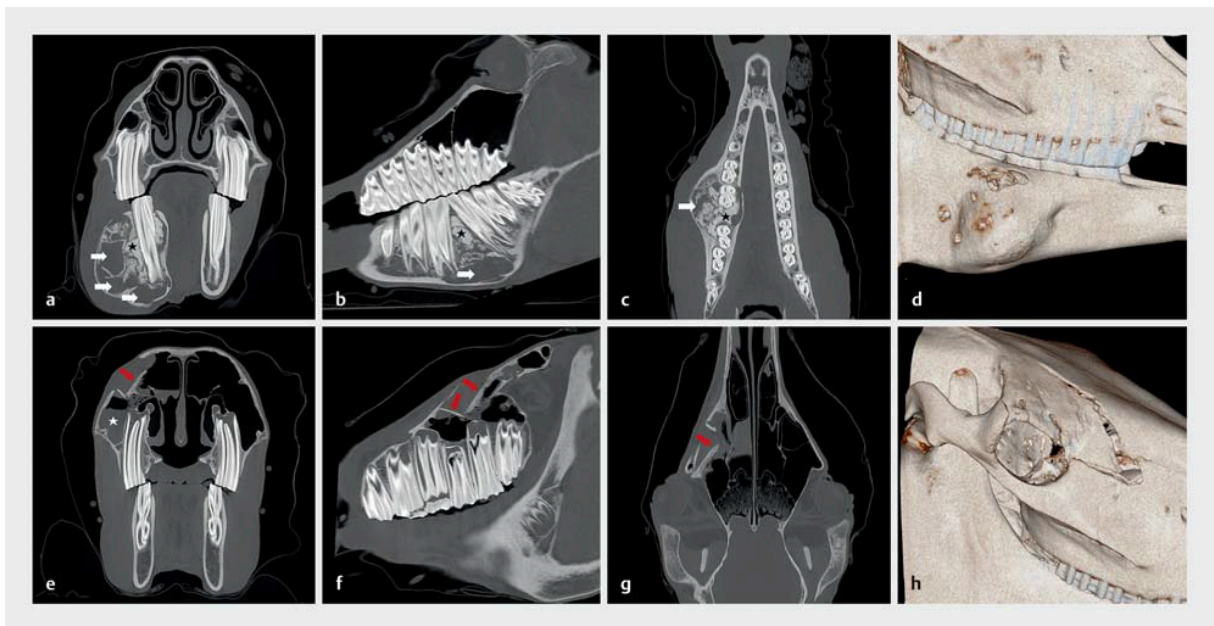


Abb. 1 Multiplanare Rekonstruktion (MPR) und 3D Volume Rendering am Beispiel einer chronisch proliferativen Entzündung (a–d) und Impressionsfraktur (e–h). a–c Heterogene

proliferative Umfangsvermehrung mit weichteildichten kavernösen (weiße Pfeile) und knochendichten (schwarze Sterne) Arealen. Der Approximalkontakt der involvierten Zähne 408 und 409 ist verändert (b). e–f Traumatisch bedingte sinuidale Verlagerung nasolakrimaler und orbitofrontaler Knochenanteile (rote Pfeile) sowie assoziierte Füllung des Sinus maxillaris caudalis dexter (weißer Stern).

Weitere Einsatzgebiete der CT stellen unklare kraniale Umfangsvermehrungen, Schädelfrakturen, Fistelwunden und retrobulbäre Prozesse dar [5,6]. Beim Headshaking-Syndrom kann eine CT-Untersuchung des Kopfes im Rahmen der Ausschlussdiagnostik indiziert sein [7]. In diesem Artikel werden die Durchführung einer CT-Untersuchung am stehenden, sedierten Pferd und die technischen Grundlagen der Bildentstehung und -bearbeitung beschrieben und häufige CT-Befunde an Zähnen und assoziierten Strukturen aufgezeigt.

Methodik

Durchführung einer computertomografischen Untersuchung

Das voruntersuchte, sedierte Pferd wird im CT-Raum in einen höhenverstellbaren Untersuchungsstand geführt, der je nach Körpergröße des Pferdes abgesenkt werden kann (Abb. 2).

Die Sedierung wird so bemessen, dass eine Lagerung und Fixierung des Kopfes toleriert und gleichzeitig ein Schwanken des Körpers und daraus resultierende Bewegungsartefakte auf ein Minimum reduziert werden. Der Pferdekopf wird auf einer Carbonfasertischplatte gelagert, die durch die Gantryöffnung des Computertomografen geschoben wird (Abb. 2).

Besondere Aufmerksamkeit gilt einer standardisierten, möglichst exakten Lagerung und Ausrichtung des Kopfes (Abb. 3). Zur seitlichen Stabilisierung des Kopfes verwenden wir ein Vakuum-Luftkissen und eine Fixierung mittels Papierklebeband. Eine Kopfmaske verhindert visuelle Reize bei Bewegung der Gantry. Sobald das Pferd ruhig steht, wird die auf Schienen geführte Gantry (Sliding-Gantry) über den Kopf in Startposition gefahren. Aus Gründen des Strahlenschutzes wird der Raum von den Mitarbeitern während der Untersuchung verlassen. Durch ein Bleiglasfenster und mithilfe von Kameras kann das Pferd vom Nebenraum aus weiterhin beobachtet werden.



Abb. 2 Technisches Setup zur CT-Untersuchung am stehenden, sedierten Pferd. **a** Pferd im höhenverstellbaren ortsständigen Untersuchungsstand. **b** Standardisierte Lagerung des Kopfes auf einem Carbonfasertisch und Fixierung mithilfe einer Vakuummatratze und Papierklebeband.

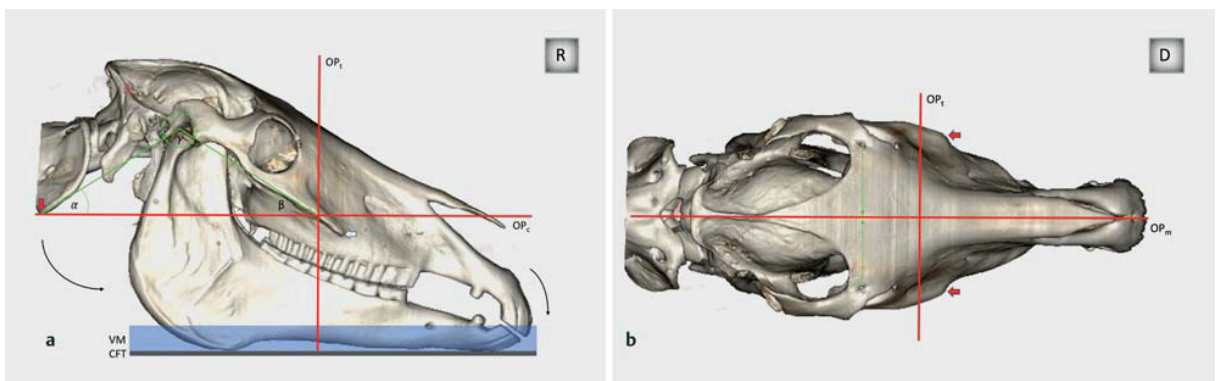


Abb. 3 Standardisierte Lagerung und orthogonale laserorientierte Ausrichtung des Kopfes. **a** Rechts laterale Ansicht. Orthogonale Orientierung des Kopfes entlang einer transversalen (OP_t) und dorsalen/coronalen (OP_c) LASER-Orientierungslinie. Positionierung des Schnittpunkts von OP_t und OP_c wenige Zentimeter kaudal des rostralen Endes der Crista facialis (weißer Pfeil). Höhenverstellung des Pferdekörpers bis zur leichten atlantooccipitalen Hyperextension und planen Auflage ventraler mandibulärer Aspekte (engl.: Mandibular plane). Eine komfortable Kopfposition ist zumeist erreicht, wenn eine gedachte Verbindungslinie des bereits positionierten Schnittpunkts $OP_c:OP_t$ und des kaudoventralsten Aspekt es des jeweiligen Atlasflügels (roter Pfeil) und jeweiligen Kiefergelenkes ein parallel zum Tisch (CFT) ausgerichtetes gleichseitiges Dreieck (= β) ergibt. **b** OP_t parallel zu gedachter

Verbindungsline des jeweiligen Foramen supraorbitale (grün). Sagittale LASER-Orientierungslinie (OP_m) entlang der Medianen.

Nach dem Anfertigen einer Übersichtsaufnahme (Topogramm) wird der Untersuchungsabschnitt festgelegt und gescannt. Je nach Länge des Scanbereichs dauert die CT-Untersuchung ca. 30–70 s. Der Untersucher im Nebenraum erhält auf dem Monitor die Bilder in Echtzeit und kann gegebenenfalls einzelne Abschnitte mit Bewegungsartefakten sofort wiederholen. Nach Abschluss der Untersuchung werden die Rohdaten am Computer rekonstruiert.

Technische Grundlagen

Die in der Tiermedizin derzeit am häufigsten verwendeten Computertomografen stellen mehrzeilige helikale CT-Geräte dar. Das Prinzip eines mehrzeiligen Computertomografen besteht in der gleichzeitigen Abbildung mehrerer Körperschichten mittels mehrzeiliger Detektorsysteme [8]. So erlaubt der von den Autoren verwendete Computertomograf (Siemens Somatom Sensation Open) eine gleichzeitige Erfassung von 40 Schichten. Der wesentliche Vorteil mehrzeiliger CT-Geräte besteht in der besseren Ausnützung der Röntgenstrahlung, da pro Rotation mehrere Schichten gleichzeitig gescannt werden. Damit vergrößert sich das erfasste Volumen pro Rotation und die Untersuchungszeit sinkt [8,9]. Da Bewegungen beim stehenden, sedierten Pferd nicht vollständig ausgeschlossen sind, ist eine kurze Untersuchungszeit zur Reduzierung von Bewegungsartefakten von Bedeutung. Mithilfe der helikalen mehrschichtigen Abtastbewegung können in kurzer Aufnahmezeit sehr dünne Schichten (0,6 mm) ohne Volumenverlust angefertigt werden. Diese sind zur Rekonstruktion von multiplanaren Bildern und zur 3D-Bilddarstellung notwendig.

In der Gantry befindet sich eine Röntgenröhre, die während der Untersuchung um den Patienten rotiert. Die Röntgenstrahlung wird vom Gewebe proportional zu seiner Massedichte absorbiert und von einem gegenüberliegenden Detektor gemessen, der sie in elektrische Signale umwandelt. Der Vergleich zwischen ausgesandter und gemessener Strahlungsintensität gibt Aufschluss über die Abschwächung der Strahlung durch das untersuchte Gewebe. Dieser Schwächungskoeffizient wird auf der nach dem englischen Elektrotechniker Godfrey Hounsfield (1919–2004) benannten Hounsfield-Skala in Form von Hounsfield-Einheiten (HU für Hounsfield-Units) angegeben.

Dabei wird Wasser auf dieser Skala definitionsgemäß der Absorptionswert von 0 HU und Luft von - 1000 HU zugewiesen. Knochengewebe weist HU-Werte zwischen 400 und 1000 auf, Metallimplantate und Zahnschmelz haben Werte um 3000 HU. Das rekonstruierte CT-Bild erscheint auf dem Bildschirm als Matrix mit verschiedenen Graustufen, von denen jede einem CT-Wert der Hounsfield-Skala – und damit einem bestimmten Schwächungskoeffizienten – entspricht. Gewebe mit geringer Strahlenabschwächung und niedrigen HU-Werten (z. B. Muskulatur) werden dabei dunkel (hypodens) und Gewebe mit hoher Strahlenabsorption und hohen HU-Werten (z.B. Zahnschmelz) hell (hyperdens) dargestellt [8].

Der Absorptionswerte-Bereich ist somit über mehrere tausend Graustufen angelegt. Diese können aber nicht mit freiem Auge erfasst werden, da das menschliche Auge nur etwa 30–90 Graustufen unterscheiden kann. Daher wird der erkennbare Graustufenbereich als sogenanntes Fenster an das zu untersuchende Gewebe angepasst [8].

Fensterung und digitale Bildverarbeitung

Bei der CT-Untersuchung des Schädels nutzt man üblicherweise 2 Fenster: ein Knochenfenster und ein Weichteilfenster (Abb. 4).



Abb. 4 Vergleich eines Transversalschnittes im Knochen- und Weichteilfenster. **a** Knochenfenster (W 3100/C500). Knöchernen Strukturen stellen sich kontrastreich und

einzelne Zahnschichten (Schmelz, Zement, Dentin und Pulpa) gut abgrenzbar dar. Das Weichteilgewebe ist einheitlich grau. **b** Weichteilfenster (W 280/C50). Knochen und Zähne stellen sich einheitlich weiß dar, Weichteilgewebe ist kontrastreich und hypodense Bereiche, wie z.B. retrobulbäres Fettgewebe und muskuläre sowie bulbäre Binnenstrukturen sind besser abgrenzbar.

Der Mittelpunkt C (Center) des Fensters wird auf den durchschnittlichen Dichtewert des zu untersuchenden Gewebes gelegt, beim Knochenfenster also ungefähr auf 600 HU und beim Weichteilfenster auf 40 HU.

Über die Fensterweite W (Width) lässt sich der Kontrast steuern. Sie wird bei Geweben mit großem Dichteunterschied wie Knochen oder Zahn weit gewählt, während bei Geweben mit geringem Dichteunterschied wie z.B. Gehirn zur Kontrastverstärkung ein enges Fenster verwendet wird. Strahlenschwächungswerte, die außerhalb des gewählten Fensters liegen, werden einheitlich schwarz (Untergrenze des Fensters) oder weiß (Obergrenze des Fensters) dargestellt. Hier lassen sich Einzelheiten in der Struktur kaum oder gar nicht mehr erkennen [8,10].

Die digitale Bildverarbeitung ermöglicht neben der Rekonstruktion von Transversalschnitten auch multiplanare Rekonstruktionen (MPR – engl.: Multiplanar Reconstruction), d. h. Schnittbilder in jeder beliebigen räumlichen Ebene. Durch eine spezielle Software können zudem Ansichten wie 3D-Darstellungen (VRT – engl.: Volume Rendering Technique), Oberflächendarstellungen (engl.: Surface Rendering) und virtuelle Endoskopien angezeigt werden. Letztere sind in erster Linie zur Veranschaulichung für überweisende Tierärzte und Patientenbesitzer sowie zur Operationsplanung hilfreich. Die Befundung durch den Radiologen erfolgt in den meisten Fällen anhand der transversalen Schnitte und mithilfe der multiplanaren Rekonstruktion. Auf dem Bildschirm können neben transversalen Schnitten simultan sagittale und dorsale Schnitte angezeigt werden (Abb. 1).

- Auf den Transversalschnitten wird der Patient definitionsgemäß von vorne betrachtet, d. h. die rechte Kopfseite ist auf dem Transversalschnitt links abgebildet.
- Beim Sagittalschnitt befindet sich der rostrale Kopfabschnitt links und der kaudale rechts im Bild

- Die Dorsalschnitte werden wie die Transversalschnitte gespiegelt betrachtet, d. h. die rechte Kopfseite ist links abgebildet. Der rostrale Kopfabschnitt befindet sich dabei in der Regel oben im Bild [8,11].

Anatomische Grundlagen

Fundierte anatomische Kenntnisse sind für das Erkennen von Pathologien [12] und die Planung chirurgischer Eingriffe von großer Bedeutung. Hierzu gehören Kenntnisse über die Zahnhartsubstanzen, Zahninnenstrukturen, umgebenden Gewebe und Hohlräume sowie altersbedingte morphologische Alterationen (Abb. 5, 6 und 7). So stellen sich die Zähne und die sie umgebenden oder benachbarten Strukturen wie Alveolarfächer und Nasennebenhöhlen je nach Alter des Pferdes unterschiedlich dar. Besonderes Augenmerk gilt beispielsweise der Wurzelarchitektur und Zahnlänge sowie den Lageverhältnissen zu angrenzenden sinunasalen Strukturen [12, 13].

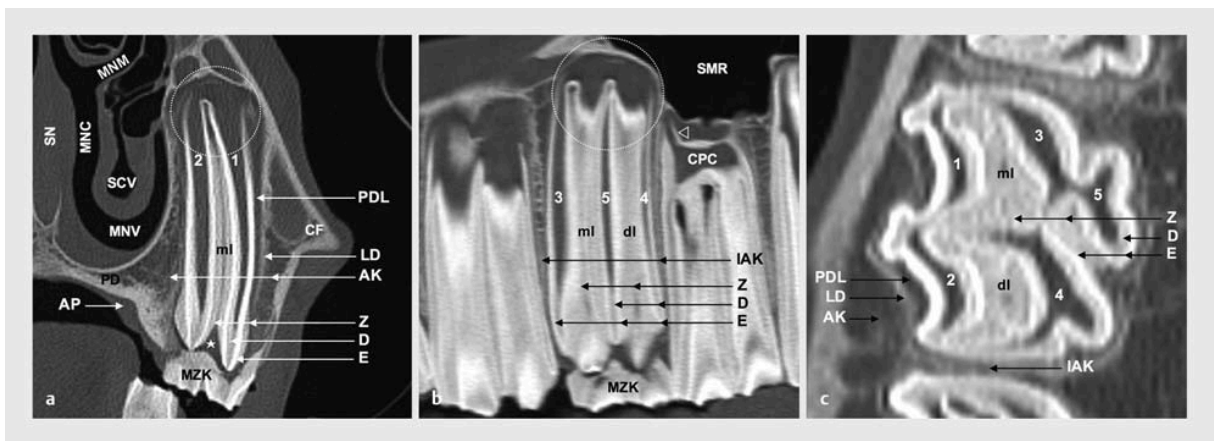


Abb. 5 Multiplanare Zahnanatomie. Transversal- (a), Sagittal- (b) und Dorsalschnitt (c) durch den Zahn 208 eines 3-jährigen Warmblutpferds. **a** Mesiales Infundibulum (ml) mit regelmäßiger Zementfüllung (Z). Zahnzement kommt auch peripher am Backenzahn vor. Dentin (D), Schmelz (E), periodontaler Spalt mit periodontalem Ligament (PDL), spongiöser Alveolarknochen (AK) und Lamina dura dentis (LD), weit offener Dentalfollikel (weißer Kreis, auch B), weiträumige Kommunikation der Pulpenhörner (hier Pulpenpositionen 1 und 2), Milchzahnkappe 608 (MZK) und darunterliegendes Weichteilgewebe (weißer Stern), A. palatina major (AP), Palatum durum (PD), Crista facialis (CF), ventraler- (MNV), gemeinsamer- (MNC) und mittlerer Nasengang (MNM), Sinus conchae ventralis (SCV), Septum nasi (SN). **b** Anteile der Pulpenhörner 3–5. Im Sagittalschnitt auch distales

Infundibulum (dl) darstellbar. Der Zahn 209 zeigt in diesem Alter bereits deutliche Anzeichen von Apexifikation (weißes Dreieck) bei noch weiträumiger gemeinsamer Pulpenkammer (CPC). Sinus maxillaris rostralis (SMR), Interalveolarknochen (IAK). c Alle Pulpenhörner 1–5 werden dargestellt.

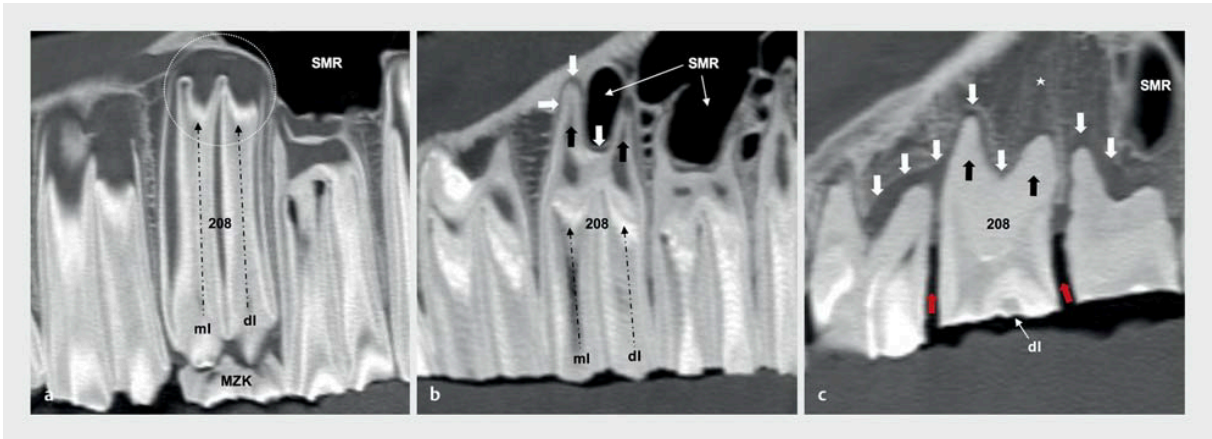


Abb. 6 Altersbedingt morphologische Unterschiede im Sagittalschnitt. Links mesial, rechts distal. Man beachte die altersabhängig deutlich unterschiedliche absolute und relative Länge der Infundibula (schwarz gestrichelte Pfeile in **a** und **b**, verbliebener Rest des distalen infundibulären Fundus in **c**). In **c** erscheint der SMR weiter kaudal und periapikaler Knochen deutlich vermehrt (weißer Stern). **a** 3-jähriges Warmblut-Pferd: Milchzahnkappe 608 (MZK), mesiales (ml) und distales (dl) Infundibulum, Sinus maxillaris rostralis (SMR). Der junge Zahn ist im Bereich des Dentalfollikels (weißer Kreis) noch nicht mit dem Zahnfachknochen verbunden [12]. **b** 13-jähriges Warmblut-Pferd: Bereits deutliche Apexifikation der hier dargestellten buccomesialen und -distalen Wurzel (schwarze Pfeile) mit enganliegendem Zahnfachknochen und feinem parodontalen Spalt (weiße Pfeile). **c** 27-jähriges Warmblut-Pferd: Deutlich reduzierte Gesamtlänge und plumpe Deformation der Wurzeln (schwarze Pfeile) sowie apikale Zementdeposition (Wurzelareal radiologisch zementdichtes Erscheinungsbild). Retraktion des interalveolären Knochens (rote Pfeile) und Verbreiterung des parodontalen Spaltes sowie abgehobene Lamina dura dentis (weiße Pfeile; insb. 207 und 209). Die Lagebeziehung von Zähnen und Nebenhöhlen verändert sich altersbedingt [17].

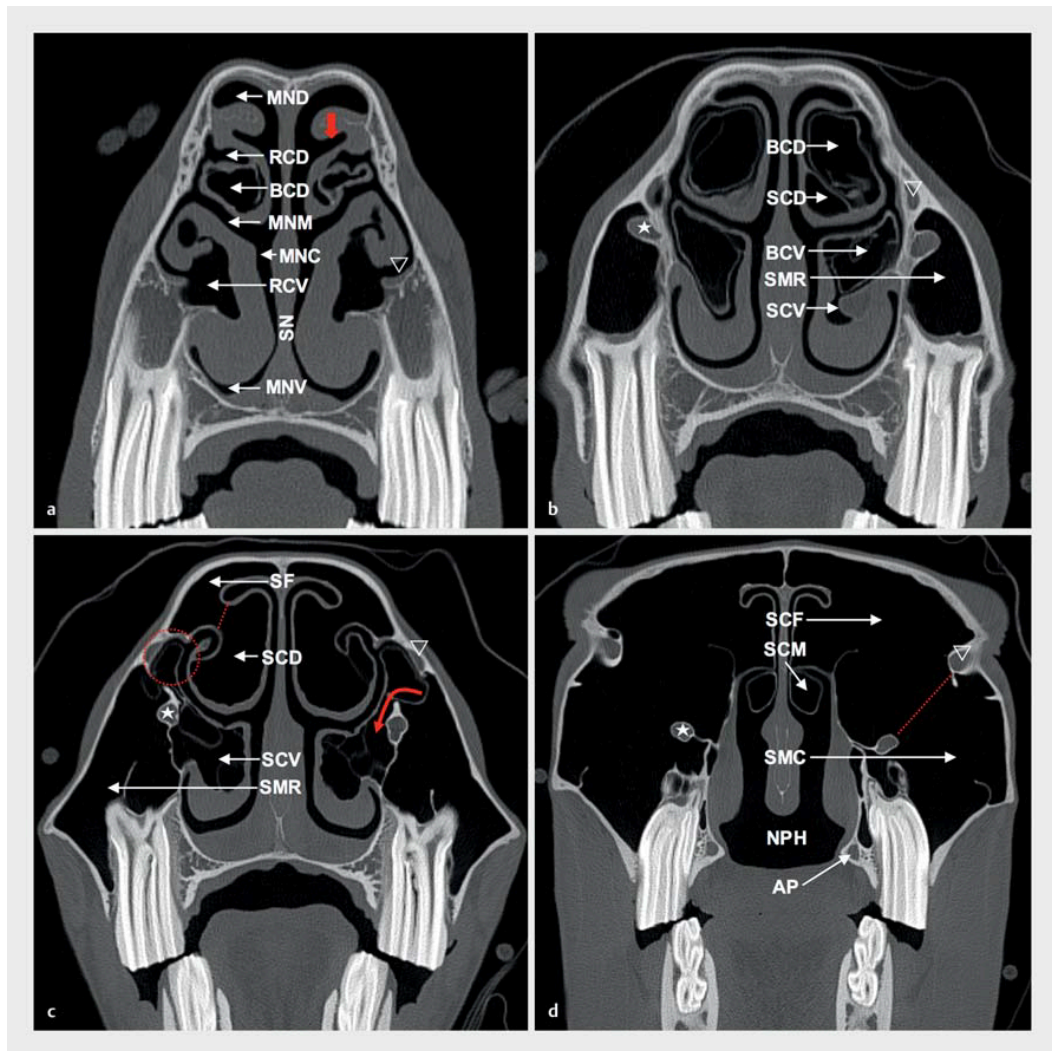


Abb. 7 Grundlagen der Anatomie sinunasaler Strukturen im Transversalschnitt. **a** Auf Höhe der Zähne 106 und 206: Ventraler- (MNV), gemeinsamer- (MNC), mittlerer- (MNM) und dorsaler Nasengang (MND). Der MNM befindet sich zwischen der dorsalen und ventralen Nasenmuschel. Typisch an dieser Stelle ist eine sulcusähnliche Einziehung der dorsalen Concha (roter Pfeil). Recessus conchae dorsalis (RCD) und -ventralis (RCV), Bulla conchalis dorsalis (BCD), Septum nasi (SN), Ductus nasolacrimalis (weißes Dreieck in **a–d**). **b** Auf Höhe der 8er: Rostrale Anteile des Sinus conchae dorsalis (SCD) und -ventralis (SCV), Bulla conchalis ventralis (BCV), Sinus maxillaris rostralis (SMR), N. infraorbitalis im knöchernen Canalis N. infraorbitalis (weißer Stern in **b–d**). **c** Auf Höhe der 9er: Sinus frontalis (SF) der mit dem SCD in einer weit offenen Verbindung (rote Linie) kommuniziert (Sinus conchofrontalis = SCF in **d**). Bereich des Canalis sinunasalis rostralis (roter Kreis) und Apertura conchomaxillaris als Verbindung von SMR und SCV (roter Pfeil). **d** Auf Höhe der Zähne 111 und 211: Sinus conchae mediae (SCM) und weit offene Verbindung des Sinus maxillaris

caudalis (SMC) und SCF (Apertura frontomaxillaris = rote Linie). Nasopharynx (NPH) und
Arteria palatina major (AP)

Häufige computertomografische Befunde

Bei der Beurteilung einer computertomografischen Studie sollte möglichst nach einem standardisierten Schema vorgegangen werden. Um sich einen ersten Überblick zu verschaffen empfiehlt es sich, den gesamten Scanbereich zunächst im Transversalschnitt zu betrachten. Dabei werden nacheinander die einzelnen Gewebe und anatomischen Strukturen, wie z.B. Zähne, Knochen, Weichteilgewebe, Nasenmuscheln und Nasennebenhöhlen beurteilt. Anschließend können auffällige Bereiche (ROI – engl.: Region of Interest) festgelegt und mithilfe der multiplanaren Rekonstruktion in verschiedenen Ebenen betrachtet werden. Zur Veranschaulichung von Frakturverläufen und zur Bestimmung eines geeigneten Operationszuganges wird zusätzlich die 3D-Darstellung herangezogen.

Zähne

Bei der Beurteilung der Zähne werden die einzelnen Zahnhartsubstanzen auf regelmäßige Anordnung, Zubildungen, Auflösungserscheinungen, Gaseinschlüsse und Frakturen untersucht.

Eine Pulpitis und Apikalinfektion stellt sich unter anderem durch Gaseinschlüsse und eine Verbreiterung der Pulpa- und Wurzelkanäle dar [6, 14, 15] (Abb. 8). Bei chronischen Apikal- und Periapikalinfektionen können Zementzubildungen an den Zahnwurzeln und kugelförmige Zementpartikel (sog. Zementikel) im Alveolardachbereich zu finden sein (Abb. 8). Hyperdense Einlagerungen von irregulärem Sekundärdentin in den Pulpakanälen können Hinweise endodontaler Reparaturmechanismen sein [12, 14].

Die Infundibula werden auf okklusale Erweiterung, Verlust der Zementfüllung, Integrität umgebender Schmelzlamellen und offene Verbindungen zu den eng benachbarten Pulpakanälen untersucht. Feine zentrale Gaseinschlüsse, sog. zentrale Zementhypoplasien, werden dagegen als physiologisch angesehen [6, 12, 14] (Abb. 8).

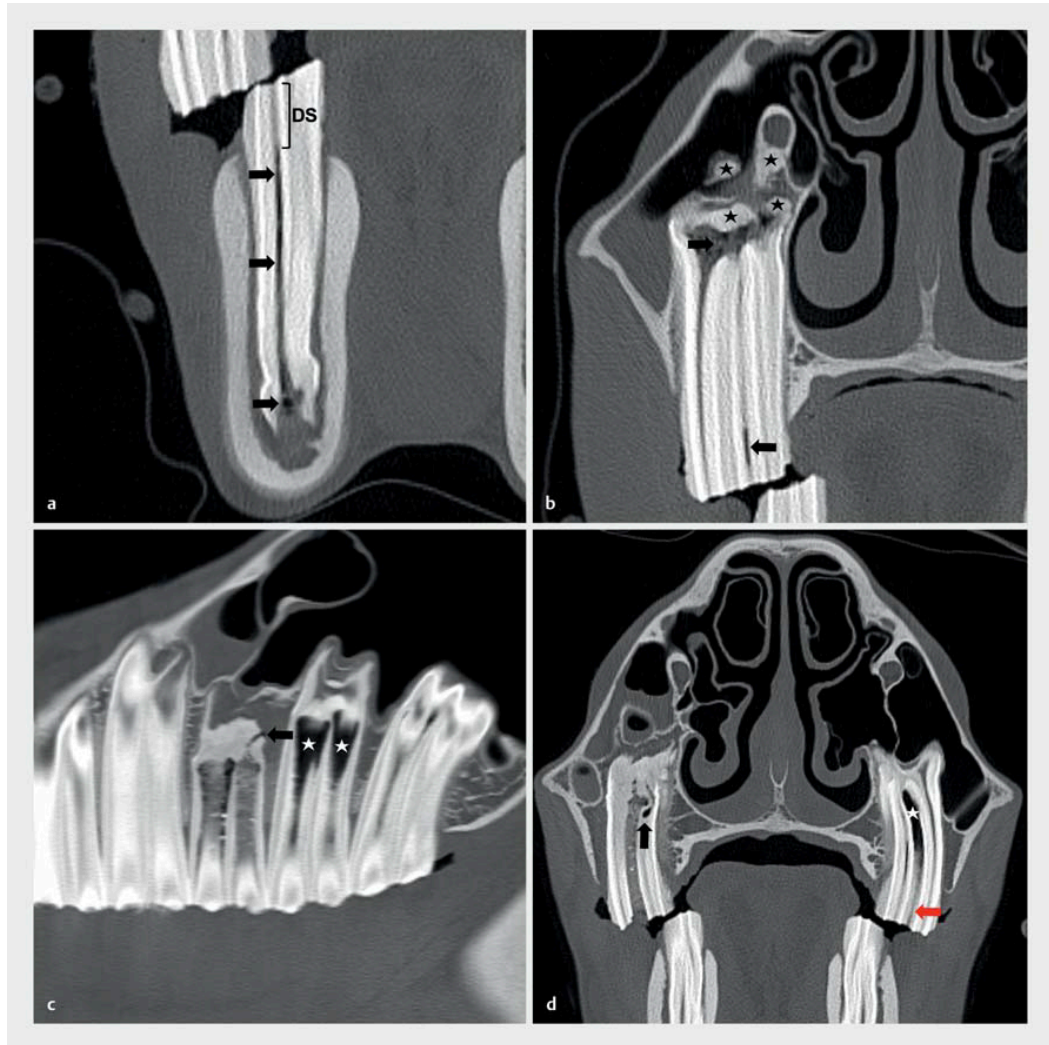


Abb. 8 Pathologien I. **a,b** Gaseinschlüsse in Pulpakanälen und -kammer (schwarze Pfeile) eines mandibulären (**a**) und maxillären (**b**) Backenzahns. Gut erkennbare okklusale Dentinsäule (DS) und apikale Zementzubildungen (schwarze Sterne). **c,d** Infundibuläre Zementhypoplasie (weiße Sterne) der Zähne 110 (**c**) und 209 (**d**). Fistelkanal (schwarze Pfeile) im Zahn 109 aufgrund Infundibularkaries fortgeschrittenen Grades des weit offenen und mit Futterpartikeln gefüllten Infundibulums. Zentral hypodense Linie im infundibulären Zement (roter Pfeil) = zentrale Zementhypoplasie (physiologisch).

Zahnfächer

Eine Verbreiterung des Parodontalspalts mit und ohne Gaseinschlüsse sowie eine Verdickung und Sklerosierung des Alveolarknochens stellen Entzündungsanzeichen dar [6] (Abb. 9). Hierbei kann ein Seitenvergleich mit der gesunden Seite als interne Referenz hilfreich sein. Bei einer Periapikalinfektion mit dentogener Sinusitis ist meistens eine osteolytische Destruktion

des Alveolardachs sichtbar, durch die die Infektion in die Nasennebenhöhlen oder Nasengänge übergetreten ist [6,14] (Abb. 9 und 10).

Neben der Beurteilung der Zähne und Zahnfächer im Transversalschnitt empfiehlt sich z. B. bei Parodontopathien mit Rückgang des Interalveolarknochens oder zur Veranschaulichung von Knochensequestern auch eine Betrachtung im Sagittal- oder Dorsalschnitt (Abb. 9).

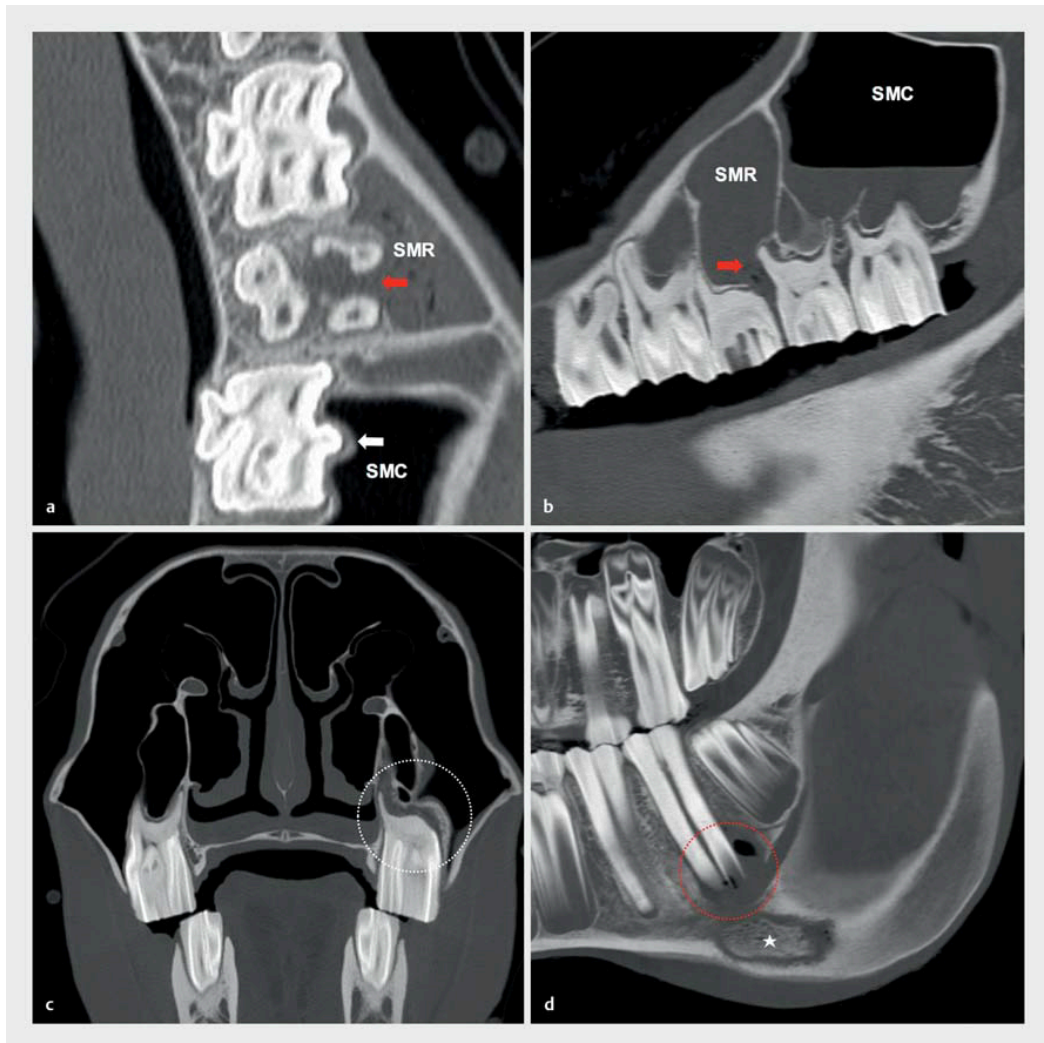


Abb. 9 Pathologien II. **a** Alveolardurchbruch des Zahnfachs 109 (roter Pfeil) in den hier bereits gefüllten Sinus maxillaris rostralis (SMR). Als interner Vergleich die intakte buccale Lamina dura dentis des Zahns 110 als Begrenzung zum Sinus maxillaris caudalis (SMC). **b** Alveolardurchbruch des Zahnfachs 209 (roter Pfeil) aufgrund Parodontitis mit Füllung im SMR und Flüssigkeitsspiegel im SMC. **c** Vergleiche den verbreiterten parodontalen Spalt sowie sklerosierte und verdickte Lamina dura dentis (weißer Kreis) mit der gesunden kontralateralen Seite. **d** Demarkierter mandibulärer Sequester (weißer Stern) und

radiologisch veränderter Zahn 310 mit apikalen und periapikalen Gaseinschlüssen (roter Kreis). Ein möglicher ätiologischer Zusammenhang kann nicht ausgeschlossen werden.

Nasennebenhöhlen

Die Nasennebenhöhlen werden auf Füllungszustände, Zubildungen und Verdickungen der Schleimhautauskleidung untersucht. Die Messung der Hounsfield-Einheiten von weichteilattenuierenden Füllungen kann diagnostisch hilfreich sein.

Erfahrungsgemäß zeigen diese Füllungen charakteristische CT-Werte:

- wässrige Flüssigkeiten: ca. 0–30 HU (z.B. Sinuszyste),
- Exsudat bzw. Weichteilgewebe: ca. 30–60 HU,
- Hämatome: ca. 80 HU (vermehrte Ansammlung von Eisenionen in Blutkoageln, z. B. progressives Siebbeinhämatom)
- Verkalkungen: > 100 HU

Waagerechte Spiegel deuten auf Flüssigkeitsansammlungen hin, während multiple Gaseinschlüsse in Weichteilattenuierungen für impaktierte Massen sprechen. Bei der Beurteilung von verdickter Sinusschleimhaut ist auch auf Knochenproliferationen der angrenzenden Schädelknochen zu achten, die für ein chronisches Geschehen und eine vorsichtiger Prognose der Sinuserkrankung sprechen.

Raumfordernde Prozesse (z. B. Sinuszysten, Neoplasien) können zu Verdrängungen und Auflösungserscheinungen der Nasen- und Siebbeinmuscheln und angrenzenden Schädelknochen, zu einer Verlagerung und Osteolyse des Canalis infraorbitalis, einer Abflachung der Alveolardächer und Zahnwurzeln sowie zu einer Verlagerung der Nasenscheidewand führen [16]. Neben den Nasennebenhöhlen sollte bei Zahnerkrankungen auch auf die rostralen Anteile der Nasenmuscheln geachtet werden. Nasenmuschelnekrosen sind an dünnen isolierten Muschelknochenfragmenten und festen Exsudatmassen im Bereich der deformierten Nasenmuschel zu erkennen (Abb. 10).



Abb. 10 Pathologien III. **a** Das linke seitliche Os maxillare ist links unterbrochen (weißer Stern). Beidseitige Füllung SMR und hochgradige Vergrößerung der ventralen Concha mit Flüssigkeitsspiegel im SCV und totaler Stenose des gemeinsamen Nasenganges. Lateraldeviation sowie partieller Destruktion des Canalis n. infraorbitalis (weißer Pfeil). **b** Füllung SCV mit impaktierten Massen (rote Pfeile) und auch Schwellung der Schleimhaut SCD und SF (weiße Pfeile). **c** Heterogenes radiologisches Erscheinungsbild eines progressiven ethmoidalen Hämatoms (schwarzer Stern) im Weichteilfenster. **d** Isolierte Sequester von Nasenmuschelbestandteilen (Nasenmuschelnekrose) im Bereich des rostralen MNM (roter Kreis).

Bedeutung der CT-Befunde für die Therapie

Im Vergleich zur Röntgendiagnostik stellt die Computertomografie ein wesentlich sensitiveres und spezifischeres Diagnostikum dar [2, 5]. Bei der Befundinterpretation der CT-Bilder wird auf therapierelevante Besonderheiten wie gebogene Zahnwurzeln, Auftreibungen im

Apikalbereich (Abb. 11), frakturierte Zähne und Polyodontien geachtet, da diese eine Extraktion erschweren können. Die Integrität des Alveolarknochens gibt Hinweise darauf, ob nach einer Zahnextraktion mit einer offenen Verbindung in die Nasengänge oder Nasennebenhöhlen zu rechnen ist. Bereits vorhandene Zementikel oder Knochensequester im Alveolarfachbereich sollten mitentfernt werden, um einer möglichen Fistel oder Heilungsstörung vorzubeugen.

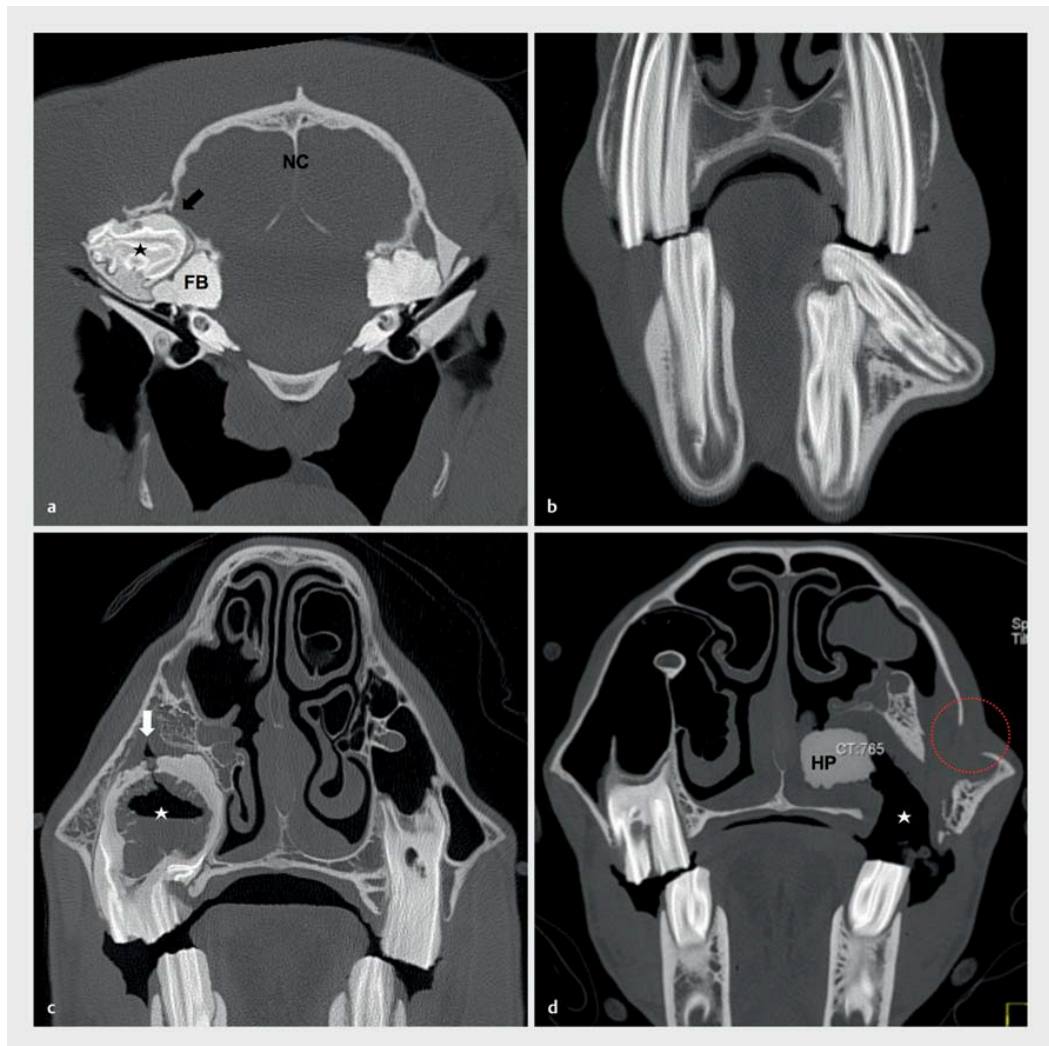


Abb. 11 Pathologien IV. **a** Heterotope Polyodontie (Temporales Odontom) mit embryonal versprengtem, hier mineralisiertem Zahngewebe (schwarzer Stern). Der radiologische Verlust der knöchernen Begrenzung (schwarzer Pfeil) zum Neurokranium (NC) und demnach zu zerebralen Weichteilstrukturen wie auch zum Felsenbein (FB) sind prognostisch vorsichtig einzustufen. **b** Atypische Polyodontie eines mandibulären Backenzahns. **c** Zystische Degeneration (weißer Stern) des Zahns 108 mit Affektion des SMR über einen Fistelkanal (weißer Pfeil). **d** Weiträumige oronasale Fistel (weißer Stern) nach Repulsion des Zahns 209

mit in den MNV verlagerten Silikon-Abformmaterial (HP), welches gelegentlich zum temporären Verschluss von Zahnfachwunden verwendet wird. Zudem besteht eine Verbindung in den SMR entlang des Repulsionskanals (roter Kreis).

Bei Erkrankungen der Nasennebenhöhlen kann beurteilt werden, ob eine konservative Therapie möglich oder ein chirurgischer Eingriff notwendig ist. Anhand der multiplanaren Rekonstruktion und 3D-Bilddarstellung kann in jedem Einzelfall der optimale Zugang zu den Nasennebenhöhlen bestimmt werden. Hierbei kommen als Kriterien die Schonung wichtiger anatomischer Strukturen, der Zustand der Schädelknochen und die Erreichbarkeit der gesamten Veränderung in den Nasennebenhöhlen zu tragen.

Fazit

Die in den letzten Jahren voranschreitende technische Entwicklung in der Pferde Zahnmedizin lässt auch eine computertomografische Untersuchung am stehenden, sedierten Pferd immer bedeutender werden. Durch eine überlagerungsfreie dreidimensionale Darstellung und detaillierte Befunderhebung wird sowohl die Planung operativer Eingriffe als auch die Beurteilung der Prognose erleichtert. Dabei sollte immer eine ausführliche Anamnese und Voruntersuchung vorangestellt werden, um die computertomografischen Befunde zusammenhängend interpretieren zu können.

Literatur

1. Dugdale AHA, Taylor PM. Equine anaesthesia-associated mortality: where are we now? *Vet Anaesth Analg* 2016; 43(3): 242–255
2. Solano M, Brawer RS. CT of the equine head: technical considerations, anatomical guide, and selected diseases. *Clin Tech in Eq Prac* 2004; 3(4): 374–388
3. England GCW, Clarke KW. Alpha2 adrenoceptor agonists in the horse – A review. *Brit Vet J* 1996; 152(6): 641–657
4. Clarke KW, Paton BS. Combined use of detomidine with opiates in the horse. *Eq Vet J* 1988; 20(5): 331–334

5. Manso-Díaz G et al. The role of head computed tomography in equine practice. *Eq Vet Educ* 2015; 27(3): 136–145
6. Pease AP. The equine head. *Textbook of Veterinary Diagnostic Radiology*. E-Book. 2017: 230
7. Pickles K et al. Idiopathic headshaking: Is it still idiopathic? *The Vet J* 2014; 201(1): 21–30
8. Schwarz T, Saunders J (Hrsg.). In: *Veterinary computed tomography*. John Wiley & Sons; 2011
9. Puchalski SM. Computed tomography in equine practice. *Eq Vet Educ* 2007; 19(4): 207–209
10. Kalender WA. *Computertomographie: Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen; [mit Mehrschicht-Spiral-CT]*. Publicis-MCD-Verlag; 2000
11. Smallwood JE et al. A standardized nomenclature for radiographic projections used in veterinary medicine. *Vet Rad* 1985; 26(1): 2–9
12. Staszuk C et al. Equine dental and periodontal anatomy: A tutorial review. *Eq vet educ* 2015; 27(9): 474–481
13. Morrow KL et al. Computed tomographic imaging of the equine head. *Vet Rad & Ultras* 2000; 41(6): 491–497
14. Liuti T et al. A Comparison of Computed Tomographic, Radiographic, Gross and Histological, Dental, and Alveolar Findings in 30 Abnormal Cheek Teeth from Equine Cadavers. *Frontiers in veterinary science* 4. 2018; 236
15. Windley Z et al. Two-and three-dimensional computed tomographic anatomy of the enamel, infundibulae and pulp of 126 equine cheek teeth. Part 2: Findings in teeth with macroscopic occlusal or computed tomographic lesions. *Eq Vet J* 2001; 41 (5): 441–447

16. Fenner MF et al. Paranasal sinus cysts in the horse: Complications related to their presence and surgical treatment in 37 cases. *Eq Vet J* 2019; 51(1), 57-63.
17. Brinkschulte M et al. Using semi-automated segmentation of computed tomography datasets for three-dimensional visualization and volume measurements of equine paranasal sinuses. *Vet Rad & Ultras* 2013; 54(6): 582–590

3 Publikation II

Computed tomography (CT)-assisted 3D cephalometry in horses: interincisal angulation of clinical crowns

S. Kau, K. Failing, C. Staszuk

Frontiers in Veterinary Science

(Journal impact factor: 2.029)

Volume 7, July 2020, Article 434

DOI: 10.3389/fvets.2020.00434

Accepted on June 16th 2020

Abstract

The angle encompassed between opposing incisors in horses is assumed to decline with age. Previous studies merely consider the overall profile view of clinical crowns presuming a generalized angle neglecting potential tooth position-dependent differences. Cephalometric measurements from 3D computed tomographic thick-slab reconstructions of single incisors within a global reference frame were used to determine clinical crown interincisal angulation (IIA) of 48 horses. Based on predefined dentoalveolar landmarks, IIA was defined as the angle enclosed by the respective labial axis of the clinical crown (LACC). A measurement repeatability analysis was conducted including a comparison of third incisor tooth IIA with data obtained by cephalometric implementation of previously described landmarks for third incisor teeth (lingual/ palatal border). The age-related angle course and differences between tooth positions were investigated considering LACCs of permanent incisors. Determining IIA by LACCs exhibited a high level of reproducibility applying for all tooth positions (mean coefficient of variation = 0.65 %; mean SD \pm 0.89°). The comparison method for third incisor teeth revealed two times higher mean dispersion of repeated measurements, $P = 0.017$. A nonlinear model slightly increased predictability of angular changes over time as against linearity assumption. The angle decline was more distinctive in younger horses and appears to approach a final value in older ones. Third incisor teeth exhibited significantly higher angle decline compared to first and second incisor teeth, $P < 0.0001$. According to the results, age determination of horses using clinical crown IIA is not recommended. Rather, 3D

cephalometry may provide a promising tool to determine interdental and dentofacial angles of distinct tooth positions in health and disease.

Keywords: dental imaging, equine cephalometry, incisor angle, incisor angulation, orthodontics, ageing, horse.

Introduction

Incisor clinical crowns have been used in many studies to investigate association of positional and morphological dental changes and the age of horses (1–6). It is widely assumed that interincisal angulation (IIA) of clinical crowns changes with increasing age of horses. Most research papers and textbooks do not report metric angle values and use distinct angle definitions. Studies reported that based on lateral profile views or photographs in young horses the angle forms a straight or vertical line (4,5,7–9) and with increasing age the angle becomes more acute (2,7,8,10–12), remains obtuse (4,5) or increases (13). Those studies giving metric data suppose that in young horses the angle is about 180° (1,3,12,14). Habermehl (1) described that horses between 8 - 15 years exhibit angles around 90° whereas older individuals have angles < 90°. Others state that only horses > 19 years show angle values of 90° (3). Loch and Bradley (14) noticed old horses to have angles < 90° but neglect to give age information. So far, IIA was specified with a single generalized angle for all incisor tooth positions. Description of methodology, however, is either subjective, subtotal or missing.

The angle between opposing incisors was determined by a multitude of varying terms and definitions, e.g. “interincisal angle” (15), “angle between upper and lower incisors” (3–5), “angle between maxillary and mandibular incisor teeth” (16), “angle of the upper and lower incisors” (11), “direction of upper and lower incisors” (7), “incisor profile angle” (2,12), “contact angle” (10,14), “angle of incidence” (9,14) or “occlusal angle” (13). Some investigators defined the angle as “the angle made by the labial borders of the upper and lower incisors” (8), “the angle formed by the labial surface of the incisive bone and lower jaw incisors” (1), “the angle between the dorsal surface of upper and lower jaw incisors” (2) or “lingual borders of corner incisors” (3). In human orthodontics, the term interincisal angle or angulation is commonly used to describe the angle enclosed by opposing upper and lower jaw incisors (17–19). One recent equine cephalometric study also used this term (15). Due to a large number and sometimes confusing synonyms of most past studies in horses, we want to

adapt to the established human terminology and therefore decided to use the term “interincisal angulation (IIA)” throughout the manuscript.

It is assumed, that age-related positional and morphometric alterations of equine incisors may affect periodontal biomechanics (20). In contrast to brachydont teeth, equine hypsodont incisors are subjected to highly dynamic age-related morphometric and periodontal changes (21,22). Hence, naturally occurring orthodontic forces during and after tooth eruption in horses are likely emerging to a greater extent. High orthodontic forces in humans cause complications such as alveolar bone loss or apposition and root resorption (23,24). Arnbjerg (16) observed a higher incidence of exuberant intraalveolar cement deposition in incisors of horses which exhibit a smaller angle between opposing incisor clinical crowns. Although severity and progression of resorptive lesions in equine incisor periodontal disease appear to differ by tooth position (25) angle differences have not been examined before.

Computed tomography (CT)-assisted 3D cephalometry may present a reliable and reproducible method for defining dental landmarks and angulations at different incisor tooth positions (26,27). Beside one cadaver head study on conventional CT based measurement of single incisor transversal and sagittal occlusal surface angles (28), no further digital 3D cephalometric studies on equine incisors are available. Domanska-Kruppa et al. (15) just recently introduced conventional two-dimensional (2D) x-ray based cephalometry to investigate class II malocclusion and IIA using distinct cephalometric landmarks in Warmblood foals. Current advances of head CT in standing sedated horses (29–31) may allow for methodical standardization as well as single tooth measurements and will make 3D cephalometry clinically applicable.

The present study aimed to establish a validated 3D cephalometric approach and to investigate age-related changes and tooth position-related differences of the IIA considering clinical crowns.

Materials and Methods

Animals and CT Scans

Volumetric CT datasets of heads of 950 horses were examined, however only scans of 48 horses (age span: 2 to 20 years; mean \pm SD: 8.8 \pm 4.6 years) were suitable for further

investigations. Exclusion criteria were: (a) horses scanned under general anesthesia, (b) ventral mandibular plane alignment not parallel to the underlying table during scanning, (c) relative horizontal jaw position not centralized, (d) image motion artifacts within the region of interest (incisors), (e) incisor or jaw fractures, (f) soft tissue interposition between incisors or (g) incisors not in contact, (h) crib-biting lesions, (i) incisor overbite, (j) overjet or underjet > half of the linguo-/palatolabial width of the occlusal table based on the previous dental examination in unsupported normal head position, (k) excessive diagonal malocclusion and (l) horses with radiological signs of pathological incisor periodontal lesions.

Included animals were 26 female (54.2 %) and 22 male horses (45.8 %), 44 large breeds (esp. Warmbloods and Quarter horses) and 4 small breeds (two Haflinger, Arab Mix and Riding pony). Head CT scans were obtained from horses referred to the Veterinary Clinic Gessertshausen, Germany, during 2009 - 2017 due to dental, maxillofacial or sinonasal disorders limited to areas caudal to upper and lower jaw bars. A multislice helical Siemens Somatom Sensation 16 or Somatom Sensation Open CT scanner (Siemens Healthcare, Forchheim, Germany) was used as a sliding gantry with the horses standing. Horses were sedated with $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ detomidine hydrochloride (Vetoquinol, Ismaning, Germany) positioned and fixed for standing head CT examination as described by (29). Laser guided orthogonal object orientation and height adjustment of both, the examination-stand and underlying carbon fiber table had been used to ensure positioning of the head as standardized as possible (Figure 1).

Setting of the CT scanner: 140 kV and 180 mAs. Based on the topogram, x-ray source current was automatically modulated suitable to individual size and anatomy of the head using Siemens CARE Dose4D real-time radiation exposure control. Scan sections with a single slice thickness of 0.6 mm and greyscale values according to tissue specific x-ray beam attenuation were generated.

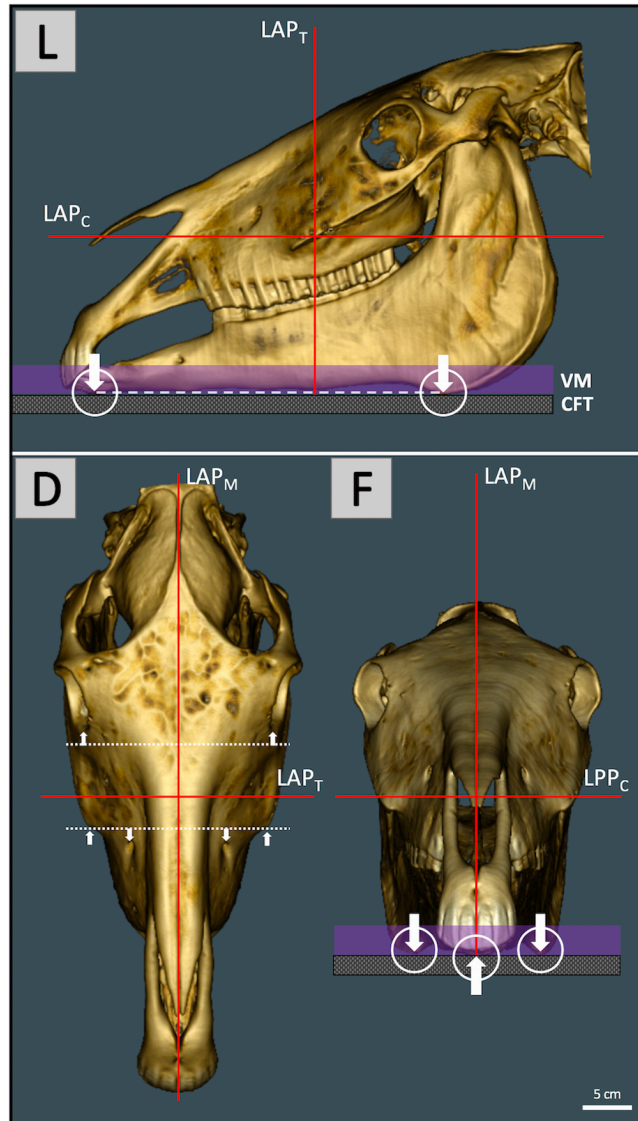


Figure 1. Pre-scanning laser guided orthogonal object orientation for maximal standardization of head and relative jaw position. Left lateral view (L) with the head placed on a vacuum mattress (VM) and non-absorbing levitating carbon fiber table (CFT). The ventral mandibular plane (dashed line) which connects the most ventral rostral and caudal mandibular aspects (arrows) was oriented as parallel as possible to the CFT. For optimal object centralization within the gantry opening the intersection of the transversal (LAP_T) and coronal (LAP_C) laser alignment plane was positioned approximately 3-4 cm caudal to the rostral end of the facial crest. Since the laser patient positioning system is static, the horse and CFT had to be moved up and down. (D) The dorsal view shows orientation of the median laser alignment plane (LAP_M) along the median plane of the head and orthogonal LAP_T preferably parallel to adjacent symmetry axes (dotted lines, arrows). In the frontal view (F) ventral mandibular aspects should not exhibit rotation along a rostrocaudal axis.

3D Reconstruction of Single Incisor Teeth

Digital imaging and communications in medicine (DICOM) files were imported to the open source medical image viewer Horos (version 2.2.0, The Horos Project¹). Greyscale values were set to a window width of 3100 and window level of 500 HU for optimal visualization of mineralized tissues. Multiplanar reconstruction (MPR) mode and orthogonal axis orientation were used to virtually align and spatially fix the object, creating a 3D virtual global reference frame (GRF) for upper and lower jaw facial subunits (Figure 2). The GRF allows sagittal reconstruction of upper and lower jaw incisors without changing their 3D positional relationship that is mandatory for assessing IIA (Figure 3). The modified Triadan system was used for numbering of different tooth positions (32,33).

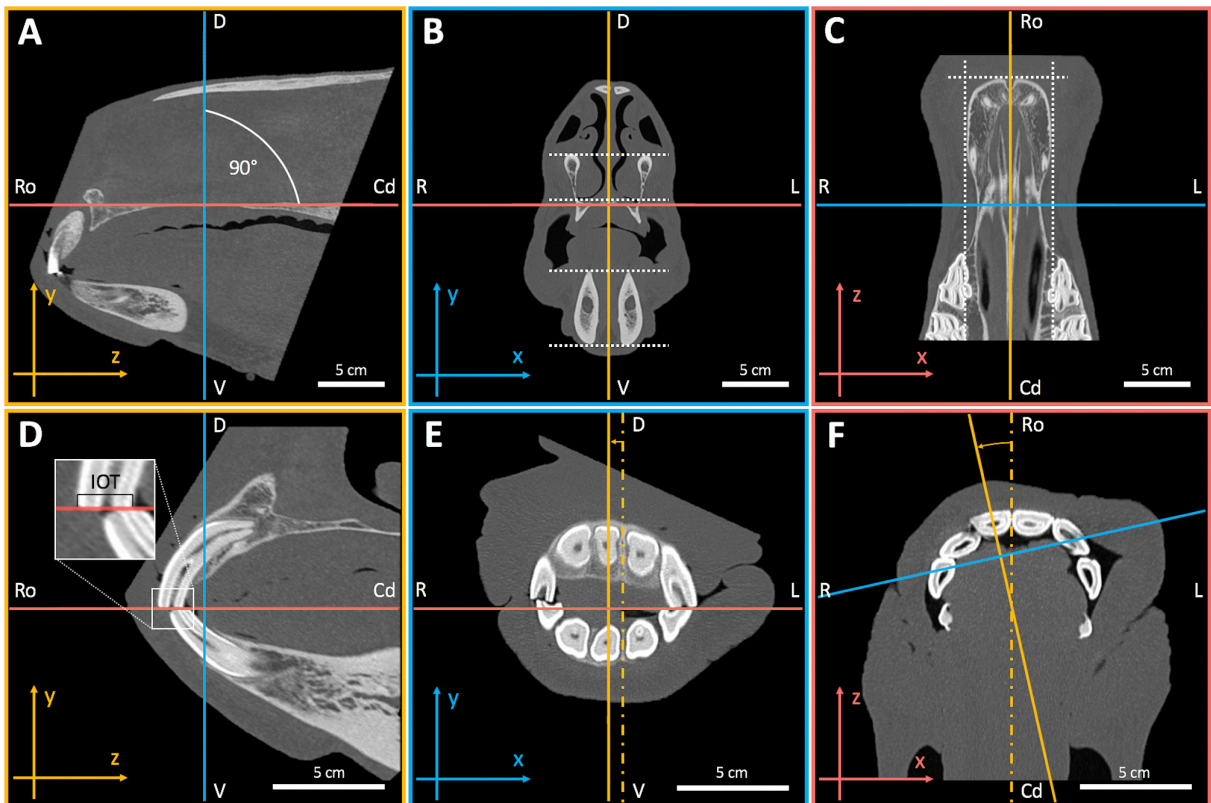


Figure 2. Definition of a 3D virtual global reference frame (GRF) using multiplanar reconstruction (MPR) and the two-dimensional (2D) on-screen Cartesian coordinate system (CCS). MPR adds a third dimension (z-axis) to the x- and y-axis of the 2D CCS (corresponds to the x- and y-axis in b). The axes were set orthogonal (90° offset) in all three dimensions, which resulted in a sagittal (**A, D**), transversal (**B, E**) and coronal (**C, F**) section plane view.

¹ See: <https://horosproject.org/download-horos/>

Initially the axes were rotated until the sagittal z-axis (**A**) and transversal (**B**) and coronal x-axes (**C**) matched the horizontal x-axis of the on-screen CCS. The sagittal axes (orange) were orthogonal to this (**B, C**). For maximal standardization of object orientation, the object was first aligned along the axes of the transversal (**B**) and coronal (**C**) section planes using some symmetry planes (dotted lines). Subsequently, the region of interest has been enlarged (**D-F**, zoom factor 1.7). The sagittal axes (orange) were translationally moved off from the median plane to the right side (**E**) and rotated (**F**) until the tooth 101 appeared in the sagittal plane view (**D**). There the object was rotated along a laterolateral axis until the incisor occlusal table (IOT; see insert) hits the coronal z-axis (red). Object alignment was rechecked. To create a GRF for single tooth reconstruction, the object was then spatially fixed within the coordinate system by avoiding rotation and translation of the object as well as rotation of orthogonal axes in the sagittal and transversal view. R, right; L, left; D, dorsal; V, ventral, Ro, rostral; Cd, caudal.

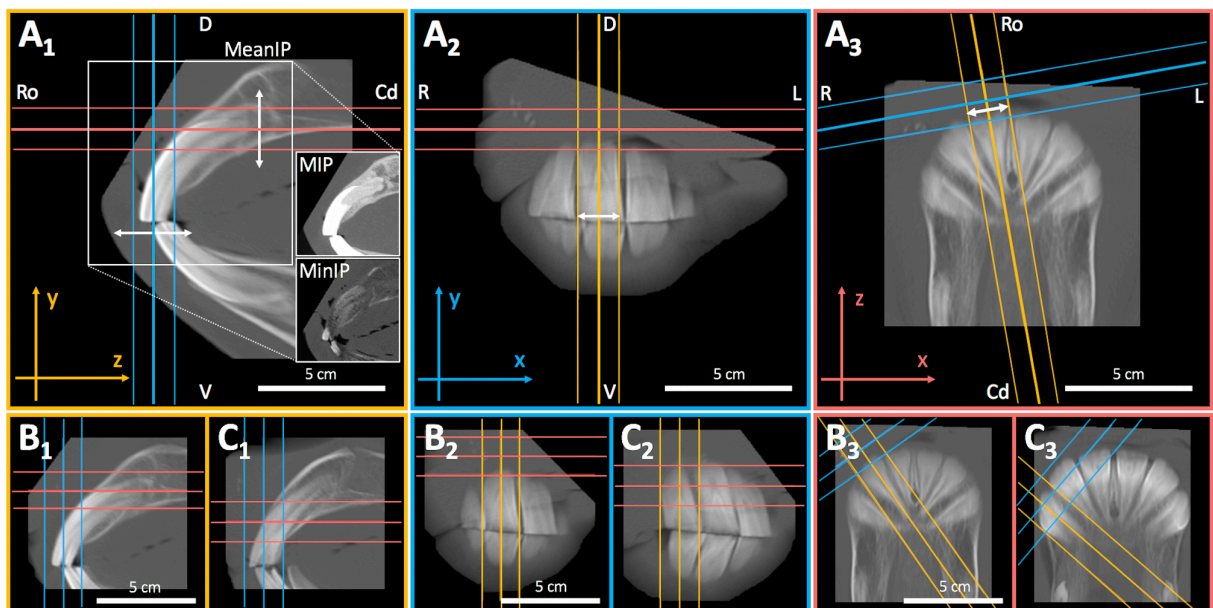


Figure 3. 3D multiplanar thick slab reconstruction (TSR) of individual incisors. TSR was used to merge contiguous slices within a certain range of the scan volume, hence creating a 2D x-ray-like sagittal image of each tooth. Superpositions with adjacent dental tissue structures could thus be reduced to a minimum. (**A₁**) For optimal quality of TSRs the digital image calculation mode was set to “mean intensity projection” (MeanIP). Compare to the modalities maximum- (MIP) and minimum intensity projection (MinIP). (**A-C₂₋₃**) Thick slab width was chosen according to the maximal mesiodistal tooth width of each single incisor (arrows) which was determined by running through the transverse and coronal plane of the

tooth (arrows in **A₁**). The GRF allowed translational axis movements in the sagittal and transversal view (**A-C₁₋₂**) as well as translational and rotatory axis movements in the coronal view (**A-C₃**). The axes have been adjusted to reconstruct the tooth in its entire sagittal apicoocclusal extend without axial distortion (**A-C₁**). Repeating this for each upper jaw incisor (**B = 102, C = 103**) and opposing lower jaw incisors resulted in 12 sagittal DICOM images per horse. R, right; L, left; D, dorsal; V, ventral, Ro, rostral; Cd, caudal.

Post-reconstruction Definition of Incisor Axes and IIA Measurement

2D DICOM images of sagittal reconstructed incisors were exported to a tagged image file format (TIFF). The common GRF ensures that reconstructed sagittal images of opposing deciduous or permanent incisors have the original *in vivo* positional relationship. Images were retrieved within the 2D on-screen CCS and edited using the image editing capabilities of the program PowerPoint (Microsoft Corporation, Redmond, WA, US). The sagittal image of each tooth was used to define dentoalveolar landmarks for cephalometric reconstruction of the respective labial axis of the clinical crown (LACC) (Figure 4, A, B). A previous photograph-based study used the lingual and palatal border (LPB) of third incisor teeth clinical crowns to assess overall IIA (3). We adopted these landmarks to cephalometrically implement them for direct comparison with LACC reconstructions of third incisor teeth (Figure 4, C). IIA of third incisor teeth using LACC and LPB reconstructions was compared in all horses randomly assigned to the measuring repeatability analysis. Landmarks, tooth axes and IIA were determined using the orthogonal axis orientation and length and angle measuring capabilities of the open source on-screen ruler PixelStick (version 1.2.1, Plum Amazing LLC., Princeville, Hawaii²). PixelStick software also uses the on-screen CCS.

Determination of Measurement Repeatability

From all horses included in the study ($n = 48$) a randomized selection of ten horses ($n = 10$) of which five ($n = 5$) were older than 12 years was made. The IIA between the LACC of opposing incisors 101:401, 102:402, 103:403 was measured. Additionally, IIA between the LPB of 103:403 was determined and compared to values obtained from LACC measures. The angle between each pair of predefined opposing incisors was measured ten times ($n = 10$). The blinded measurements took place on ten ($n = 10$) different days at two-day intervals. Block

² See: <https://plumamazing.com/product/pixelstick/>

randomization was used to determine the order in which horses were examined on respective days (Suppl. 1). The daily results were transferred to another spread sheet so that values were not accessible to the observer (SK) on following days.

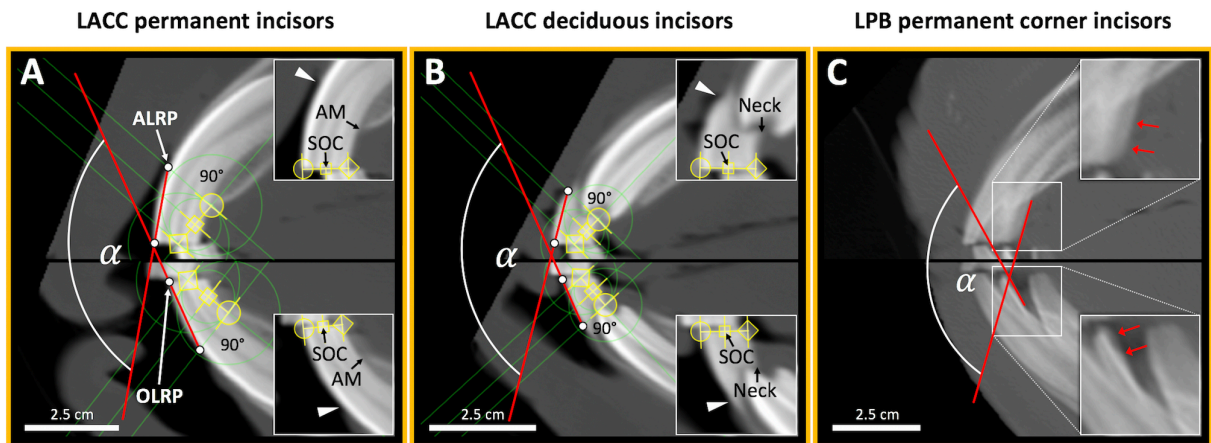


Figure 4. Determination of IIA by cephalometric definition of the labial axis of opposing permanent and deciduous incisor clinical crowns (LACC) and the lingual and palatal clinical crown border reference axes (LPB) for permanent third incisor teeth. (A, B) LACC reconstructions required definition of certain dental landmarks starting with the sagittal occlusal center (SOC). The SOC was determined by bisecting the occlusal surface of individual incisors (inserts). For that purpose, PixelStick endpoints (yellow) were positioned to the most labial (circle endpoint) and palatal or lingual (diamond endpoint) occlusal points. The SOC was thus automatically ascertained by the ruler instrument. Subsequently, endpoints were positioned to connect the SOC and palatal or lingual alveolar margin (AM) of permanent incisors and palatal or lingual crown neck of deciduous incisors (inserts). A line perpendicular to the SOC-AM line and the AM point, in turn, defined the apicolabial reference point (ALRP) at the intersection with the labial tooth surface. For scans that reveal the gingival margin (inserts; arrow heads), the ALRP always appeared close or superposed to it. The respective occlusolabial reference point (OLRP) was defined as the most labial occlusal point. Connection of ALRP and OLRP resulted in the respective LACC (red line) for each incisor. IIA was defined as the angle enclosed by the LACC of opposing incisors. (C) The angle enclosed by the adopted lingual and palatal reference axes of third incisor teeth was determined (red lines; arrows). All angles were measured using the angle measuring capabilities of PixelStick. A, 101:401; B, 501:801; C, 103:403; labial, left; lingual or palatal, right.

Statistical Analysis

Analyses were performed using the statistical software package BMDP (programs 1D, 6D, 5V, AR; Dixon, W.J., University of California, LA, USA), open source R software (version 3.6.1; used function: lmer from the R library lme4; R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria³), SPSS software (version 24.0; IBM Analytics, NY, USA) and Microsoft Excel (version 2016; Microsoft Corp., WA, USA). Univariate descriptive statistics was used to basically describe central tendency and dispersion of IIA data from both the deciduous and permanent incisors.

The measurement variability was investigated using variance decomposition separated by tooth position (01-03) and measuring method (LACC, LPB). Measurement repeatability was further characterized calculating the coefficient of variation (CV) according to horse, tooth position and measuring method. CV was defined as $SD/mean*100$ (%) respectively. A student's t-test for paired samples was used to compare LACC vs LPB with respect to the CV and mean maximum difference ($Diff_{max}$) of repeated IIA measurements on third incisor teeth. Concerning LACC, differences in the CV and $Diff_{max}$ between tooth positions were compared using one-way repeated measures ANOVA.

Due to few observations and the short period in which deciduous incisors occur, these were only considered descriptively. Strength of linear association between IIA measures of corresponding permanent incisor tooth positions of the right and left side and between the respective IIA (dependent variable) and the age of horses (independent variable) was analyzed using linear regression and correlation analysis. A Pearson's correlation coefficient (r) of $|r| < 0.30$ was suggested to indicate negligible correlation; $|r| = 0.31 - 0.50$ low positive or negative correlation; $|r| = 0.51 - 0.70$ moderate positive or negative correlation; $|r| = 0.71 - 0.90$ high positive or negative correlation and $|r| \geq 0.91$ meant very high positive or negative correlation (34). The coefficient of determination (r -squared) was calculated as r^2 .

To produce improved parameter estimates, the relationship of IIA of permanent incisors (dependent variables) and the age of horses (independent variable) was analyzed allowing

³ See: <https://www.r-project.org>

nonlinearity using derivative-free nonlinear regression analysis. The fitted model equation is described as

$$f(\text{age}) = E + A * \exp(-b * \text{age})$$

where E denotes the final value of the course for a very high age value, A the amplitude and b the exponential factor of decline. Due to the iterative character of the method the initial parameter values were: $E = 100$, $A = 60$, $b = 0.25$. The coefficient of determination (pseudo- R^2) was calculated as $1 - (\text{sum of squared residuals} / \text{corrected sum of squares})$. For examination of the discrepancies between observed and predicted values (model goodness-of-fit) observed vs predicted data plots and residual analysis metamodels including residuals vs predicted plots, residuals vs order plots, residual vs age plots and Q-Q-plots were made.

Global side-, tooth position- and age-related effects and side-by-tooth position-interaction were approximated statistically using two-factorial incomplete repeated measures analysis of covariance (ANCOVA) with an asymptotic maximum likelihood approach and Wald test of significance. The side (left, right) and tooth position (01-03) were entered the analyses as fixed effects. The age of horses was entered as a covariate and IIA as the dependent variable. To account for individual variation between investigated horses, these were entered the analyses as a random effect. The Akaike information criterion (AIC) was used to compare data fits and to select an appropriate covariance structure.

The influence of age on the angle differences between different tooth positions (age-by-tooth position-interaction) was analyzed using a generalized linear mixed-effect (GLME) model with a restricted maximum likelihood approach for estimation of covariance and Wald test of significance. The values of corresponding tooth positions on both sides were summarized. The tooth position was considered as a fixed effect, the age as a covariate, IIA as the respective dependent variable and both individual horses and the side were treated as random effects. Residuals were graphically inspected for normal distribution using Q-Q-plots.

For all statistical tests performed, a p-value ≤ 0.05 (significance level) was considered to indicate statistical significance.

Results

A total number of 950 individual CT scans was checked for exclusion criteria. 125 scans (13.2 %) displayed the region of interest but only 48 of which met the inclusion criteria (38.4 %). The main exclusion reasons were motion artifacts (24.8 %), non-standardized head position (16.8 %), missing or supernumerary incisors (7.2 %) and rostral jaw fractures (5.6 %). Thus, five hundred seventy-six ($n = 576$) incisors were individually reconstructed.

Three horses (6.3 %; 2.3 ± 0.6 years) exhibited full deciduous incisor dentition. Five horses (10.4 %; 4.2 ± 0.5 years) showed only third incisor teeth to be deciduous whereas permanent first and second incisor teeth already featured full occlusal contact. The newly described cephalometric measuring approach (LACC) could be applied to all incisors. Regardless of the tooth position, tooth generation or age, the clear majority of examined horses showed an obtuse IIA of LACCs ($> 90^\circ < 180^\circ$).

Measurement Repeatability Analysis

The randomly selected horses younger than 12 years ($n = 5$) showed a mean age (\pm SD) of 7 ± 2.9 years (span: 4 - 11) whereas older horses ($n = 5$) showed a mean age (\pm SD) of 17 ± 2.6 years (span: 14 - 20). Except for one horse, repeated IIA measures resulted in a total of 40 angular values which corresponds to ten independent measurements per tooth position and measuring method. Due to irregular and short palatal clinical crown border of the deciduous tooth 503 in horse 1, IIA using LPB reconstructions could not be determined resulting in a total of 30 angular values (Suppl. 1). Descriptive statistics are presented in Table 1. Comparing LACC and LPB reconstructions on third incisor teeth, IIA revealed a mean angle difference (\pm SD) of $9.0^\circ \pm 7.0^\circ$. In nine horses (90 %) LACC reconstructions constantly yielded higher values (Min = 2.2° , Max = 21.8°). Only one horse (10 %, Warmblood, age = 11 years) exhibited higher IIA obtained from LPB reconstructions ($6.4^\circ \pm 1.3^\circ$, Min = 4.1° , Max = 8.4°).

Variance decomposition of repeated measurements and resulting standard deviation for different tooth positions and measuring methods and throughout tooth positions (LACC) are shown in Table 2. The minimum angle standard deviation resulting from the calculated minimum variance of LACC reconstructions was $\pm 0.27^\circ$ whereas the maximum variance revealed a maximum standard deviation of $\pm 1.68^\circ$. The minimum SD resulting from the calculated minimum variance of LPB reconstructions was $\pm 0.82^\circ$ whereas the maximum variance revealed a maximum SD of $\pm 3.12^\circ$ which is 1.9 times higher than that using LACC

reconstructions. Independent of the scaling level all measured data showed < 2.4 % dispersion around the respective mean of repeated measurements (CV range = 2.16 %). However, using LACC for IIA measurements resulted in significantly higher precision and lower maximum angle differences compared to LPB reconstructions (Figure 5). Measurement precision and Diff_{max} did not significantly differ between tooth positions concerning LACC reconstructions (Figure 5).

Table 1. Descriptive statistics and relative variability for repeated cephalometric interincisal angulation measurements by horse, tooth position and measuring method.

Horse	Method		Mean (α)	Variance	SD (α)	Min (α)	Max (α)	Diff _{max} (α)	CV (%) ^a
	LACC Tooth position	LPB							
1	01	-	153.9	0.72	0.85	152.8	155.3	2.6	0.55
	02	-	149.3	0.38	0.62	148.4	150.5	2.0	0.42
	03	-	122.5	2.74	1.66	118.1	123.6	5.5	1.35
	-	03 ^b	-	-	-	-	-	-	-
2	01	-	147.8	0.36	0.60	146.4	148.6	2.2	0.41
	02	-	145.2	0.68	0.82	144.0	146.9	3.0	0.57
	03	-	148.9	0.65	0.81	148.0	150.2	2.2	0.54
	-	03	131.3	9.74	3.12	126.2	134.1	7.8	2.38
3	01	-	139.5	0.61	0.78	138.3	140.9	2.6	0.56
	02	-	135.8	0.76	0.87	134.3	137.7	3.4	0.64
	03	-	120.0	0.26	0.51	119.0	120.7	1.8	0.43
	-	03	112.0	2.86	1.69	109.7	115.0	5.3	1.51
4	01	-	131.6	0.27	0.52	130.5	132.5	2.0	0.40
	02	-	130.6	0.40	0.63	129.6	131.6	2.1	0.48
	03	-	124.0	0.33	0.58	123.1	124.8	1.7	0.47
	-	03	118.1	1.83	1.35	116.4	120.5	4.1	1.14
5	01	-	137.3	0.98	0.99	135.9	139.3	3.4	0.72
	02	-	131.5	0.54	0.73	130.3	132.9	2.6	0.56
	03	-	122.3	0.07	0.27	122.0	122.9	0.9	0.22
	-	03	128.7	1.78	1.33	126.6	131.3	4.7	1.04
6	01	-	147.2	1.01	1.00	145.4	149.0	3.6	0.68
	02	-	140.1	0.29	0.54	139.2	141.2	2.0	0.39
	03	-	116.1	0.97	0.98	115.1	118.0	2.9	0.85
	-	03	111.3	0.67	0.82	109.9	112.9	3.1	0.74
7	01	-	110.3	0.26	0.51	109.6	111.1	1.5	0.46
	02	-	109.1	0.50	0.71	108.0	110.4	2.4	0.65
	03	-	87.5	0.12	0.35	86.7	88.0	1.2	0.40
	-	03	72.1	1.40	1.18	70.4	74.7	4.3	1.64
8	01	-	121.0	0.24	0.49	120.1	121.5	1.4	0.41

9	02	-	122.7	0.30	0.55	122.0	123.5	1.5	0.45
	03	-	113.8	1.32	1.15	112.2	116.0	3.8	1.01
	-	03	100.7	1.26	1.12	98.7	102.2	3.5	1.11
	01	-	120.0	2.84	1.68	117.6	123.8	6.1	1.40
	02	-	120.9	1.45	1.20	119.6	123.9	4.3	1.00
	03	-	108.9	1.11	1.05	107.2	110.5	3.3	0.97
	-	03	98.1	2.38	1.54	95.4	100.6	5.2	1.57
10	01	-	118.9	0.96	0.98	117.0	119.6	2.6	0.83
	02	-	112.9	0.43	0.66	111.8	114.1	2.3	0.58
	03	-	101.8	1.99	1.41	98.9	103.6	4.7	1.38
	-	03	90.4	1.14	1.07	88.5	91.5	2.9	1.18

LACC, labial axis of the clinical crown; LPB, lingual and palatal border; α , alpha angle degrees; SD, standard deviation; Min, minimum; Max, maximum; Diff_{max}, maximum difference; CV, coefficient of variation; Values are based on ten ($n = 10$) repeated measurements for each tooth position or measuring method.

^a CV represents the SD in percent of the mean.

^b The short and irregular lingual and palatal surface of the deciduous upper jaw incisor clinical crown did not allow accurate definition of a clinical crown axis and hence, no determination of the IIA.

Table 2. Variance decomposition and resulting mean angle standard deviation (SD (α)) for repeated cephalometric interincisal angulation measurements by measuring method, tooth position and across tooth positions for LACC reconstruction.

Method	Tooth position	Mean variance	Min variance	Max variance	SD (α)
LACC	01	0.83	0.24	2.84	0.91
	02	0.57	0.29	1.45	0.76
	03	0.96	0.07	2.74	0.98
	all	0.79	0.07	2.84	0.89
LPB	03	2.56	0.67	9.74	1.60

LACC, labial axis of the clinical crown; LPB, lingual and palatal border; α , alpha angle degrees; Min, minimum; Max, maximum; Values are based on $n = 100$ repeated measurements per tooth position for LACC reconstructions and $n = 90$ for LPB reconstructions.

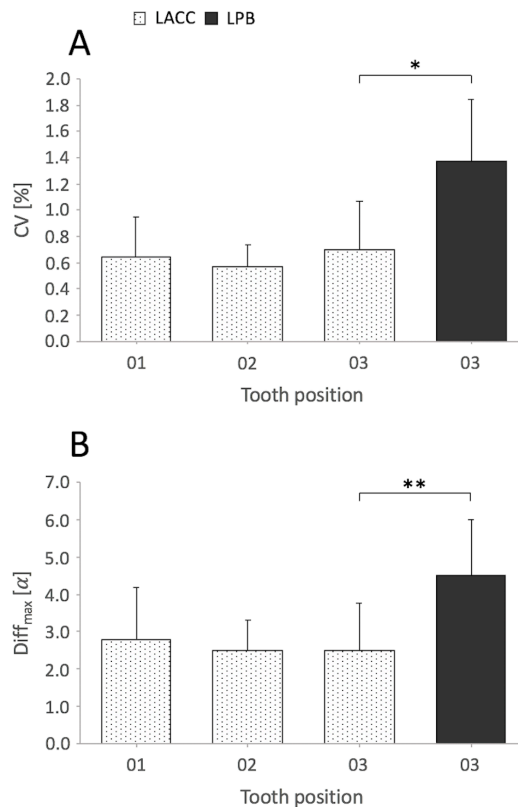


Figure 5. Mean coefficient of variation (CV) and mean maximum angular difference (Diff_{max}) of repeated interincisal angulation measurements by measuring method and tooth position.

Bar plots display mean + SD (error bars); α, alpha angle degrees. Cephalometric determination of the angle encompassed by the respective labial axis of the clinical crown (LACC) of opposing third incisor teeth exhibited a significantly lower CV (A) and Diff_{max} (B) compared to the reference method that uses reconstruction of the lingual and palatal border (LPB); * $P = 0.017$, ** $P = 0.030$, Student's t-test for paired samples, $n = 9$ horses (missing LBP observation horse 1). Comparing tooth positions 01-03 for LACC reconstructions, there was no significant difference in the CV (A) and Diff_{max} (B): CV, $P = 0.312$, Diff_{max}, $P = 0.860$, one-way repeated measures ANOVA, $n = 10$ horses (LACC observation horse 1 included), sphericity assumed.

Linear and Nonlinear Regression Analysis

Further analyzes were based on the extended data set and respective LACC reconstructions. The descriptive statistics summarizing IIA values of both the deciduous and permanent incisors and the age of investigated horses are shown in Table 3. Comparison of observed IIA values from corresponding deciduous and permanent incisors of both sides revealed a very

high positive linear correlation (Figure 6, A-C). A moderate to lower high negative linear correlation was calculated comparing observed IIA values of permanent incisors and the age of horses (Figure 6, D-I). Pearson's correlation coefficients (r), coefficients of determination (r -squared) and associated p -values are given within the graphs. Contemplating data scatter and from a biological point of view, however, IIA may not decrease infinitely even in horses older than 20 years. Though, the angle decrease was additionally checked for nonlinearity.

Table 3. Descriptive statistics of observed interincisal angulation (IIA) using LACC from deciduous (D) and permanent incisors (P) and age distribution of all examined horses by tooth position and side.

Side	Tooth position	N	IIA (α)					Age (years)			
			Mean	SD	Min	Max	Range	Mean	SD	Min	Max
R	D 01	3	165.1	13.85	152.8	180.1	27.3	2.3	0.6	2.0	3.0
R	D 02	3	154.0	13.89	141.2	168.8	27.6	2.3	0.6	2.0	3.0
R	D 03	8	126.5	14.04	110.9	148.5	37.6	3.5	1.1	2.0	5.0
L	D 01	3	160.0	14.91	145.0	174.8	29.8	2.3	0.6	2.0	3.0
L	D 02	3	150.4	11.16	141.5	162.9	21.4	2.3	0.6	2.0	3.0
L	D 03	8	125.5	7.26	113.3	138.9	25.5	3.5	1.1	2.0	5.0
R	P 01	45	132.7	12.08	108.5	153.9	45.4	9.2	4.5	4.0	20.0
R	P 02	45	129.7	11.78	104.2	155.5	51.3	9.2	4.5	4.0	20.0
R	P 03	40	117.0	13.60	87.5	148.9	61.4	9.9	4.3	5.0	20.0
L	P 01	45	132.6	12.13	107.3	153.2	45.9	9.2	4.5	4.0	20.0
L	P 02	45	129.3	10.68	106.4	153.6	47.2	9.2	4.5	4.0	20.0
L	P 03	40	115.9	13.46	87.8	148.7	60.9	9.9	4.3	5.0	20.0

R, right; L, left; α , alpha angle degrees; SD, standard deviation; Min, minimum; Max, maximum.

Time-dependent prediction of IIA using nonlinear regression analysis was shown to provide slightly more accurate estimates for the course of angular decrease compared to linear regression analysis (Figure 7). Calculated minimum residual sum of squares and model parameters (E , A , b) are displayed in Table 4. Estimated values for E in permanent dentition shared low CV indicating high precision of estimate whereas due to mathematical reasons this is not the case for estimated total amplitude (A) and exponential factor of angle decline (b). Goodness-of-fit analysis revealed an appropriate fit of the applied nonlinear regression model. The residuals appeared normally and randomly distributed and exhibited a constant variance which indicates unbiased parameter estimates (Suppl. 2). The angle decline appears more distinctive in younger compared to older horses, where the curve approaches a hypothetical

final value (E). All tooth positions from both sides showed a slightly higher coefficient of determination (pseudo- R^2) in nonlinear regression (Figure 7). An additional 7.45 ± 2.23 % of the observed variation in the response variable (IIA) was explained by the model. The third incisor teeth showed the highest pseudo- R^2 and most distinctive nonlinearity of angle decline (Figure 7, C, F).

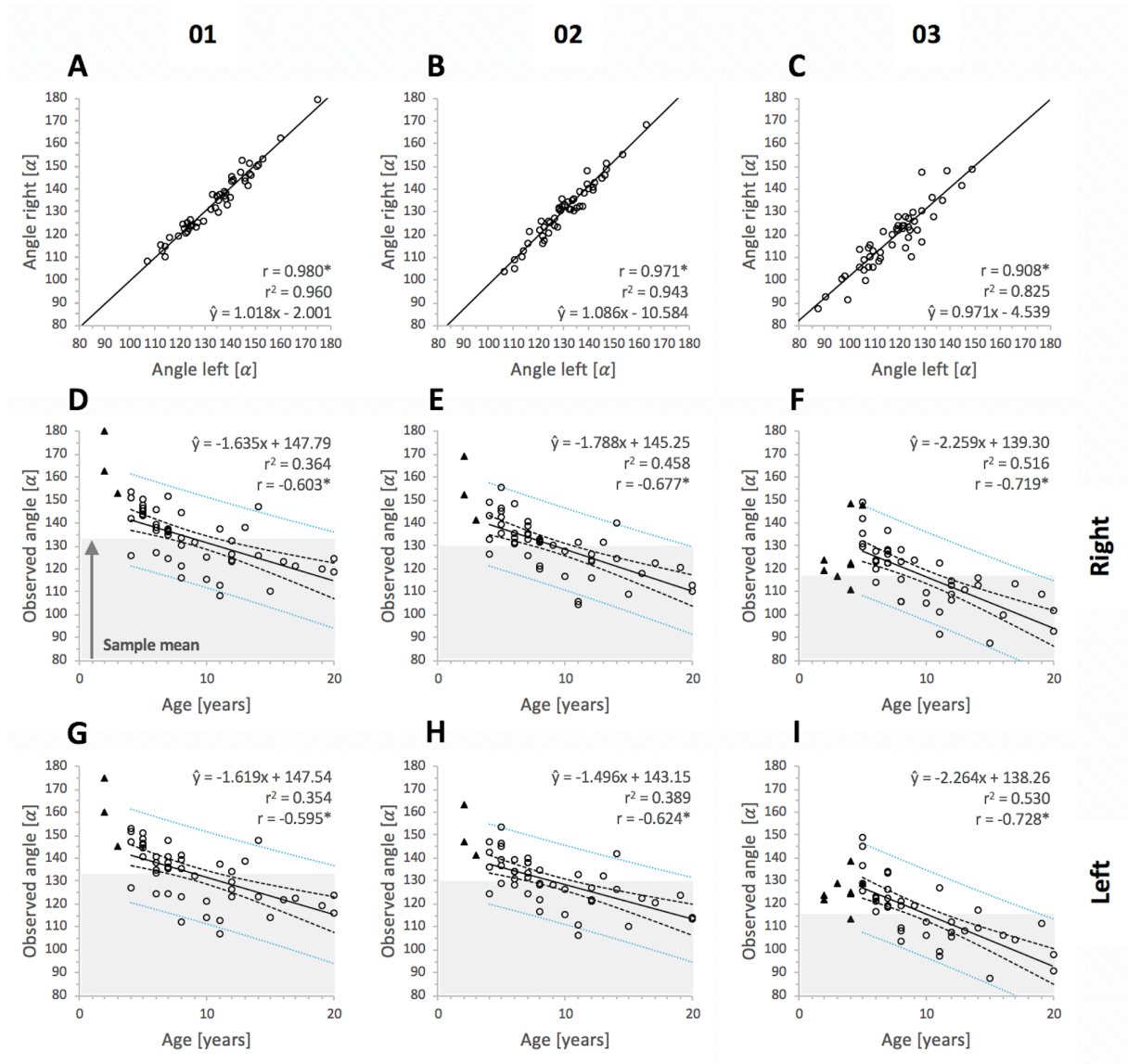


Figure 6. Linear regression and Pearson's correlation analysis show the association of observed IIA values between both sides and the age of horses. The prediction equation and regression parameters are displayed in the plots and specified as $\hat{y}_i = \pm \beta_1$ (slope) $x_i \pm \beta_0$ (intercept); α , alpha angle degrees. (A-C) Correlation diagrams show the association of IIA between corresponding permanent and deciduous incisors from the left and right side. Pearson's correlation coefficients (r) and coefficients of determination (r^2), displayed in the

plots, were calculated for each tooth position: **(A)** Triadan 01, **(B)** Triadan 02, **(C)** Triadan 03.

* Positive correlations were significant at $P < 0.001$ (two-sided), $n = 48$ horses. Line indicates trend line. **(D-I)** Correlation diagrams show the association between IIA of permanent incisors and the age of horses. The upper limit of gray areas indicates mean values for permanent incisors. IIA data from deciduous incisors (triangles) were not included in the analysis. r and r^2 were calculated for each tooth position and displayed in the plots. * Negative correlations were significant at $P < 0.001$ (two-sided), $n = 45$ horses (01 and 02), $n = 40$ horses (03). Lines indicate trend lines; inner dashed lines indicate upper and lower 95% confidence intervals for the regression line and outer dotted lines indicate upper and lower 95% prediction intervals.

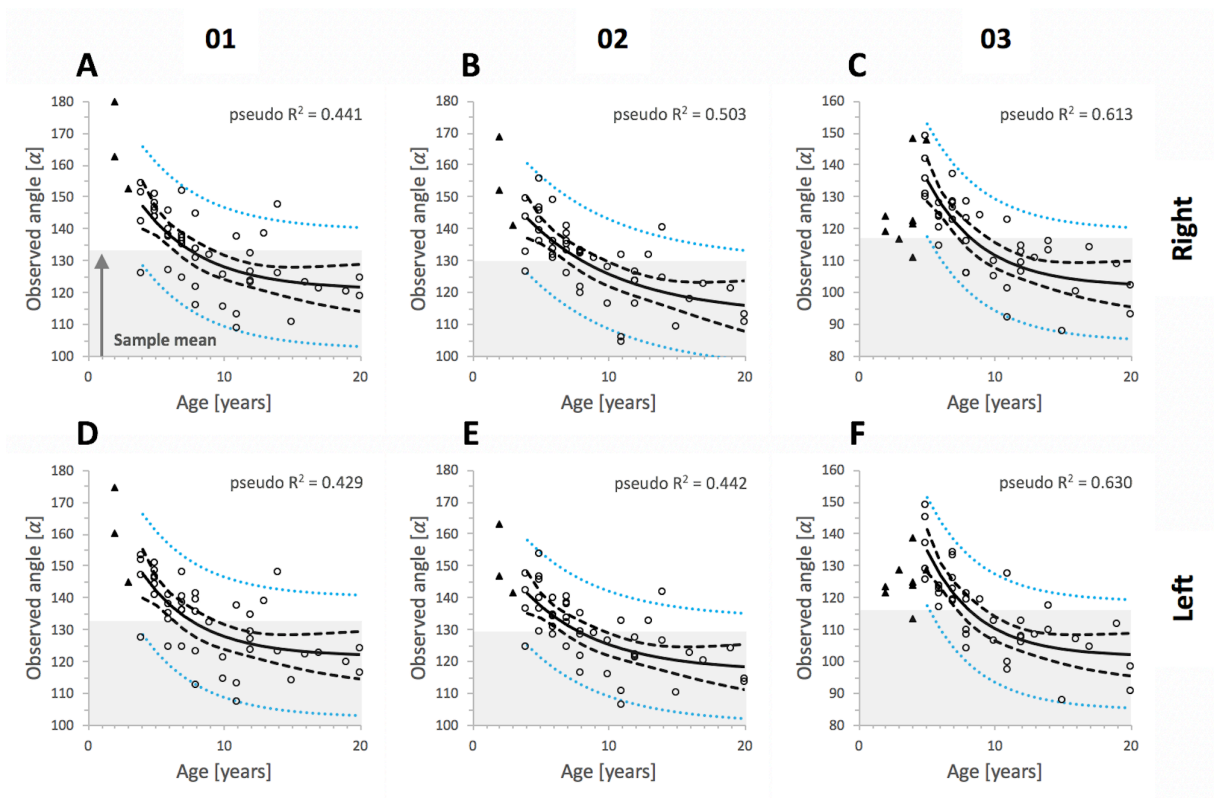


Figure 7. Nonlinear regression analysis shows the association of observed IIA values and the age of horses by tooth position and side. **(A-C)** right side, **(D-F)** left side; α , alpha angle degrees. The upper limit of gray areas indicates mean values for permanent incisors. IIA data from deciduous incisors (triangles) were not included in the analysis. Pseudo- R^2 was calculated for each tooth position and displayed in the plots, $n = 45$ horses (01 and 02), $n = 40$ horses (03). Lines indicate trend lines; inner dashed lines indicate upper and lower 95% confidence intervals for the regression line and outer dotted lines indicate upper and lower 95% prediction intervals.

confidence intervals for the nonlinear regression line and outer dotted lines indicate upper and lower 95% prediction intervals.

Table 4. Model parameter estimates that were returned by tooth position and side using an iterative nonlinear least squares procedure using the regression function $f(\text{age}) = E + A \cdot \exp(-b \cdot \text{age})$.

Side	Tooth position	Minimum Residual Sum of Squares	Parameter								
			E (α)	SE	CV (%)	A (α)	SE	CV (%)	b	SE	CV (%)
R	01	3589.5	120.7	5.1	4.2	63.4	26.3	41.5	0.22	0.11	51.8
R	02	3038.5	112.8	8.2	7.3	54.2	11.9	22.0	0.14	0.09	59.1
R	03	2787.7	102.1	4.6	4.5	112.9	49.2	43.6	0.25	0.10	38.8
L	01	3706.1	121.4	4.7	3.9	67.4	29.9	44.4	0.24	0.12	49.5
L	02	2800.5	117.1	5.8	4.9	49.9	16.5	33.1	0.18	0.10	58.2
L	03	2616.3	101.8	4.1	4.0	125.0	57.1	45.7	0.27	0.10	36.1

R, right; L, left; α , alpha angle degrees; E , final value of the course; A , amplitude; b , exponential factor of decline; SE, standard error; CV, coefficient of variation. Values are based on $n = 45$ horses for first (01) and second incisor teeth (02) and $n = 40$ horses for third incisor teeth (03).

Although it was shown a slightly more distinct angle decrease in younger horses and not infinite angle decrease in older horses, the overall linear regression model appears suitable indicating predictive power in the population. Thus, to avoid changes in the error structures and interpretation of inferential results by data transformation marginal inaccuracies between the nonlinear and linear models were accepted in the approximation of angle differences and the influence of age.

Side-, Tooth position- and Age-related Effects

The inferential statistical analyses considered $n = 40$ complete cases (full permanent incisor dentition) and $n = 5$ cases with missing dependent variables (deciduous third incisor teeth) whereas $n = 3$ cases were excluded from the analyses due to full deciduous incisor dentition.

Global comparison of IIA from corresponding tooth positions of the left and right side revealed no significant difference (Wald chi-squared = 1.0730, $P = 0.300$). It was observed, that 4.2 % of horses ($n = 2$) exhibited equal IIA of either corresponding first or third incisor teeth whereas no horse revealed angular symmetry in second incisor teeth. In most horses, however, slight

angular asymmetry was present. Compared to corresponding left incisors, 50.0 % of remaining horses exhibited higher IIA values in right first incisor teeth, 56.3 % in right second and 60.4 % in right third incisor teeth. The mean difference (\pm SD) in first incisor teeth was $5.1^\circ \pm 2.7^\circ$ for deciduous and $2.1^\circ \pm 1.6^\circ$ for permanent teeth; $3.8^\circ \pm 3.0^\circ$ and $2.7^\circ \pm 1.8^\circ$ in second incisor teeth; $8.9^\circ \pm 6.1^\circ$ and $3.6^\circ \pm 2.5^\circ$ in third incisor teeth.

The ANCOVA and associated Wald test were indicative of an overall significant angle difference between distinct permanent incisor tooth positions (Wald chi-squared = 591.05, $P < 0.0001$). The analysis of the interaction side-by-tooth position showed that the side (left vs right) has no influence on observed differences between tooth positions (Wald chi-squared = 0.617, $P = 0.735$). The age of horses, however, was shown to have a significant global impact on angle changes (Wald chi-squared = 41.19, $P < 0.0001$). The combined average angle decrease was -1.8° per year.

Further analyzes using the GLME model combine values obtained from corresponding tooth positions on both sides. The comparison of the angle declines of individual tooth positions as a function of time (age-by-tooth position) showed a significant difference on average (Wald chi-squared = 26.99, $P < 0.0001$). The respective average degree of annual angle decreases of first and second incisor teeth showed hardly any differences, whereby third incisor teeth stand out with a stronger decline (Figure 8). Over time, 72.2 % of first incisor teeth exhibited larger IIA than second incisor teeth. Over time, 95.5 % of first and second incisor teeth exhibited larger IIA than third incisor teeth.

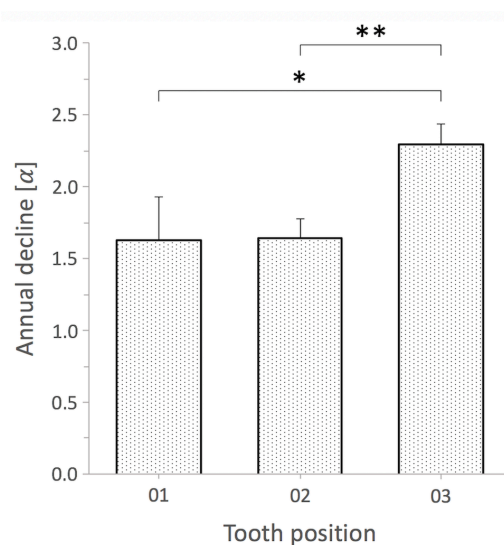


Figure 8. Comparison of annual angle decline of permanent incisors by tooth position. Bar plots display mean + SE (error bars). Tooth position 01 vs 03 and 02 vs 03 exhibit significant differences; *, ** $P < 0.0001$ whereas tooth position 01 vs 02 did not; $P = 0.915$, GLME model, $n = 45$ horses (01 and 02), $n = 40$ horses (03).

Discussion

The present study was designed to establish a validated 3D cephalometric approach to measure the angulation between opposing incisor clinical crowns identifying age and tooth position related effects. A measurement repeatability analysis was conducted to assess precision of both the newly established (LACC) and adopted (LPB) measurement methods. To evaluate IIA of clinical crowns some prior studies used lateral profile photographs of equine incisors (2–4,7) and others merely considered profile views (1,5,16). However, all of which did not describe exact measuring methodology or anatomical landmarks and considered IIA as a single generalized angle value for all opposing tooth positions. Muylle et al. (3) described that just the lingual borders of third incisor teeth clinical crowns were used to determine IIA. However, the data report suggests that the angle was also treated under generalization in this study. Domanska-Kruppa et al. (15) implemented lateral 2D cephalograms to assess IIA of upper and lower jaw first incisor teeth in foals. This study comprehensively describes used dentofacial cephalometric landmarks and resultant incisor reference lines, the superior and inferior incisal line, which intersection was considered to specify IIA in horses aged up to 12 months. Undoubtedly, this study makes a valuable contribution to orthodontic measurements of class II malocclusions in horses. This 2D method, however, does not apply to investigate all incisor tooth positions independently and reference lines do not exclusively relate to clinical crowns or functional and anatomical incisor longitudinal axes. Thus, a method was needed that avoids superimposition of anatomical structures enabling clear landmark identification and IIA measurements of all left and right incisor tooth positions separately.

CT-assisted 3D cephalometry provides a highly reliable and reproducible method for dental angular measurements (26). In humans, its applications may allow for separate reconstruction, landmark identification and angle measurements of all incisor tooth positions, particularly in complex orthodontic anomalies like crowded incisors (26,27). Comparison of 2D vs 3D cephalometry in human orthodontics showed significant differences of upper incisor dentofacial inclination and interincisal angulation (27,35). Jodeh et al. (35) recommend

selective decision of the method to maximize measuring accuracy in distinct cephalometric questions and advice caution when measuring incisor angles. In 2D, the IIA is interpreted as the pitch between opposing incisor axes whereas 3D axis reconstructions within a global coordinate system account for pitch, roll, and yaw directional parameters all codetermining the angle (36). Thus, 2D projection of 3D structures as well as superimposition of adjacent anatomical structures of the left and right side (e.g. large incisors in horses) and head position during scanning must be considered as major limiting factors in 2D cephalometry (37). Both, low contrast and resolution of obtained images may additionally influence landmark identification (26).

The primary CT reconstruction algorithm creates a volume of data that is subdivided into regularly shaped volume elements (voxels), each assigned a 3D Cartesian coordinate system. The grey value of each voxel is associated with the x-ray beam attenuation of the represented object/tissues (38). Under certain conditions, a smaller voxel size may lead to a higher spatial resolution. The multislice CT scans used here create voxels larger in size compared to those may obtained by cone beam CT. In a study in which multislice CT and cone beam CT were compared, however, Watanabe et al. (39) showed that a smaller voxel size does not always improve spatial resolution as this may also depend on both the in-plane and longitudinal directed modulation-transfer function. Nevertheless, cone beam CT has not yet become area-wide established in equine dentistry due to various limitations, such as substantial sensitivity to motion artefacts, higher scatter or a limited dimension of the field of view (FOV) (31). Additional artefacts of cone beam CT are alias artefacts by x-ray beam divergence and a higher noise level (38). In general, the stacked voxels representing the object volume can be displayed in any direction thus eliminate projection geometry error and superposition of adjacent structures. In the present study, the unique 3D alignment of different tooth positions was considered with the aid of CT-assisted multiplanar thick slab reconstruction in the acquisition of X-ray-like 2D images of individual incisors by orthogonally synthesizing associated voxel information within a global reference frame. It should be noted, that the method presented in our study, in contrast to landmark identification and angle measurements on reconstructed 3D volumes (27), uses 3D image reconstruction and 2D landmark identification and measurements. It is important to mention, that thick slab reconstructions may introduce another source of error by superimposing the mesial side of the incisor over the middle and distal sides. Thus, thick slab reconstructions are somewhat

limited identifying exact labial or lingual/palatal clinical crown surfaces. This ambiguity would increase if the direction of reconstructed 2D longitudinal sections was misaligned. However, this approach also brings about a reduction of superimpositions with large neighboring incisors to a minimum and avoids object enlargement and distortion which is a result inherent to conventional 2D x-ray projections of craniofacial structures (40).

The rotation of the head was described as one of the leading factors causing regional image magnification and distortion in human 2D cephalometry, both promoting measurement inaccuracy (40,41). Even with 3D cephalometry a precise measurement of the IIA of opposing upper and lower jaw incisors requires consideration of 3D relative jaw mobility and resulting spatial dislocation of opposing incisors during CT scanning. It should be considered, that the relative rostrocaudal mobility of the mandible to the upper jaw may depend on the head position (42). The sole rostrocaudal translational jaw movement would not alter the angular positional relationship of opposing incisors. However, we know little about rotatory degrees of freedom of the mandible along a laterolateral, rostrocaudal and dorsoventral axis, which may alter the angular positional relationship of opposing incisors at different head positions. Thus, it is recommended to ensure a head position that is as standardized as possible during the scans. Domanska-Kruppa et al. (15) used a custom made cephalostat to guarantee the best possible standardization of head position during acquisition of lateral 2D cephalograms in foals. We recently reported and show in the present study how the head position of horses can be kept as standardized as possible considering technical and safety aspects during standing head CT scans (29). In future studies it may be possible to implement a cephalostat for safe use during head CT in standing sedated horses. Hence no scans that were performed under general anesthesia or scans that do not fulfill requirements for maximal standardization of the head position were used in the current study. A metal tube in between incisors, which is commonly used to protect the tracheal tube during general anesthesia in horses and resulting occlusal forces may cause a tilting movement of incisors. Schrock et al. (20) had shown slight tilting movement of equine incisors in a finite element model when the occlusal surface is loaded with physiological occlusal forces. This could influence reliability of IIA measurements.

The lingual and palatal border (LPB) of third incisor teeth clinical crowns were suggested to be reproducible reference structures due to their rough surface straightness. Thus, we

additionally used these to determine alternative IIA measurements on third incisor teeth. Although repeated IIA measurements using LPB exhibited low dispersion around the sample mean, landmark-based LACC reconstructions from the newly implemented 3D cephalometric method educed higher precision ($SD \pm 1.60^\circ$ vs 0.98°) and two times lower dispersion. Independent of the scaling level the mean SD for all tooth positions using LACC was 0.89° which may be acceptable for clinical and scientific use. A previous study in humans had shown that there is hardly any difference between intra- and interobserver variability of repeated angle measurements ($< 0.65^\circ$) using either 2D or 3D cephalometry (27). However, reproducibility of landmark identification is a basic requirement in human cephalometric angle and linear measurements (41). Since the reference axes have merely been aligned along the LPB of third incisor teeth, observed surface curvature and irregularity could have caused the angle measurement inaccuracy. It might be also harder to repeatable align axes along with a short surface structure. Both, in humans and horses repeated linear cephalometric measurements exhibit highest errors for short distances (15,41). The computerized sagittal incisor reconstructions reported here were suitable to obtain defined dentoalveolar landmarks for labial tooth axis definition. Similar to a previous study (15) the most labial occlusal point was used as an occlusal reference point. Contrary, they used the incisive bone cusp and mandibular alveolar process cusp as a second more apical reference point whereas we used an apicolabial reference point approximating the gingival margin. Hence, the first cephalometric IIA measurements of clinical crowns under standardized conditions became possible.

In other publications, the reference structures described to determine IIA of clinical crowns, such as the labial surface of the incisive bone and lower incisors (1), labial border (8) or dorsal surface of upper and lower jaw incisors (2), however, are difficult to understand from a basic differential geometrical standpoint. Equine incisors display a convexly curved labial surface (6,22), which according to own investigations (data not shown) is more pronounced in first and second than in third incisor teeth and changes with advancing age. A note of caution is due here since on a curved surface each arbitrary point has its own tangent. This in turn will result in different values for the clinical crown IIA depending on which tangent of upper and lower jaw incisor labial surface is chosen. It is not clear from previous studies which dental landmarks were used to define the axes for measurement of permanent incisor clinical crown IIA. The methodical approach of the present study allowed clear dentoalveolar landmark

identification and IIA measurements of single incisor tooth positions with high precision. This is a basic requirement to contribute to a thorough understanding of naturally occurring orthodontic forces and periodontal disease in the highly dynamic and adaptive incisors of horses.

Equine hypsodont teeth are subjected to continuous occlusal wear, thus age-related morphometric adaptation and permanent periodontal remodeling is required (21,22,43). It was assumed that age-related dental angular changes and tooth length have a pertinent role contributing to the development of incisor periodontal disease in horses (20). Up to four years after eruption, equine permanent incisors compensate occlusal wear by apical new formation of dental hard tissues but exhibit a determinate increase in length from this time point. Interestingly, this maximum length can be maintained up to an approximated dental age of 13 to 15 years, whereat total tooth length differs by the tooth position or jaw (22). Thereafter, occlusal wear is no longer compensated by new formation of dental substances resulting in a shortening of intraalveolar tooth length and thus, reduction of the periodontal ligament attachment surface (6,21,43). Nonlinear regression analysis revealed that the period of greatest decrease in clinical crown IIA coincides with that of the reported constant tooth length ratios (< 13 - 15 years). The third incisor teeth showed an initially stronger decrease in clinical crown IIA. In contrast, during the period of subsequent tooth length decrease (> 13-15 years) the angle decline had a significantly smaller negative slope and tend to approach an end value. These findings are virtually contrary to previous studies which have suggested that a decrease of the angle encompassed between upper and lower jaw incisors is accompanied by a shortening of incisor length (1,9,44). Although our results are based on few observations in older horses a low CV in the calculation of final values (E) indicates high precision of estimate.

Symptoms and progression of EOTRH, which is a periodontal disease mainly affecting incisors of aged horses (45), tend to differ by tooth position (25). Therefore, assessing angulation of pairs of opposing incisors was intended. The side (left, right) exhibited no influence on angle differences whereas age did. The GLME model provided evidence for a higher overall annual angle decline of third incisor teeth compared to first and second incisor teeth. The latter shared no significant angle differences. It may be that third incisor teeth are probably the most susceptible teeth to naturally occurring orthodontic forces due to their exposed position in

the incisor arch. Although third incisor teeth are by tooth age the youngest of the incisors they most often show clinical and radiographic signs of EOTRH (25,46). Henry et al. (25) reported external replacement resorption as the most prevalent type of resorptive lesions in EOTRH syndrome progressing from third to first incisor teeth with an increasing manner. Contrary, external inflammatory resorption which is the second most prevalent type of resorption in EOTRH affected horses progresses from first to third incisor teeth. Both, replacement and inflammatory resorption, however, are subjected to completely different etiologies in humans. It is assumed that in most cases both types of resorption are preceded by mechanical injury (orthodontic pressure) to non-mineralized tissues initiating the resorption process (47). In addition to the formation of cementum-like repair tissue, the progression and type of resorption depend on the further stimuli –e.g. pressure or infection. Whether resorption progresses or cement is deposited may depend on the extent of damage caused by the initial intraalveolar injuries (47). Arnbjerg (16) observed a higher incidence for exuberant intraalveolar cement deposition of incisors from horses which exhibit a more acute angle between opposing incisor clinical crowns. This was suggested to be caused by altered distribution of occlusal stresses. Schrock et al. (20) demonstrated in a finite element incisor model that with increasing age of horses at constant occlusal force loading periodontal stress distribution changes with higher forces appearing in regions of first radiological signs of EOTRH lesions. This combination of findings supports the conceptual premise that mechanical stimuli, likely differing by tooth position, may be of great etiological importance in the EOTRH syndrome complex. Interestingly, Kunz et al. (48) reported that they have found no signs of EOTRH in 70 Brazilian working horses, aged 18 ± 4 years, which have never had any dental treatment. How dental treatment, tooth curvature and direction and rate of tooth eruption affect IIA changes remains unclear. However, it should be considered that our results relate to angular measurements of clinical crowns only. To draw further conclusions on incisor periodontal disease, the examination of angle changes considering incisors in their whole apicoocclusal extend is indicated for both healthy and EOTRH diseased horses.

Study Limitations

The present study is confined to a small number of horses representing a convenience sample experimental design as no longitudinal data were available, hence results should be interpreted cautiously. Due to general cost issues and the mostly poor periodontal status of

at least more than one incisor, no CT scans of fully “incisor-healthy” horses aged over 20 years were available. Due to practical constraints, this paper only provides intraobserver variability assessment of repeated cephalometric measurements. The paper does not engage with measurements of EOTRH horses.

Conclusion

The purpose of the current study was to establish a validated CT-assisted 3D cephalometric approach to measure IIA of clinical crowns from all opposing incisors at lowest level of superimposition with adjacent structures and to determine age and tooth position related effects. This study has found high repeatability of dentoalveolar landmark identification and subsequent IIA measurements using the newly implemented cephalometric method (LACC; mean $SD \pm 0.89^\circ$). Despite the few observations, a nonlinear age-related angle decline most distinctive in corner incisors was shown. The IIA tends to approach an end value in older horses. Comparison of tooth positions revealed that corner incisors show a significantly higher overall angle decrease than central and middle incisors. Tooth position-related differences of IIA suggest a role for biomechanical alterations promoting equine incisor periodontal disease. An age estimate based on the IIA of the clinical crowns is not recommended. The authors recommend that in future studies a comprehensive description of the imaging technique, anatomical landmarks, and measurement method, as well as a correct geometric definition of the angle types are indispensable. In addition, more emphasis should be placed on using correct cephalometric terminology.

Acknowledgements

We would like to thank Dr. Timo Zwick and Dr. Julia Schwarzer for providing data sets and their technical support during CT examinations. Preliminary results were presented as an Abstract at the 18th IGFP (Internationale Gesellschaft zur Funktionsverbesserung der Pferdezähne e.V.) Congress, Wiesbaden, 6-7 March 2020.

Ethics Statement

Ethical review and approval for this study was not required according to national legislation because all investigated computed tomography data were obtained for clinical reasons not related to this study. Informed consent has been granted by the owners after supplied with

sufficient information regarding care and diagnostic and treatment options for their animals. The use of achieved diagnostic material complied with the guidelines specified by the local ethics committees of the University of Veterinary Medicine Vienna and the Justus Liebig University Gießen to be based on the regulations of good scientific practice.

Author Contributions

SK and CS conceived of the presented idea and designed the study with the help of KF. CS and KF supervised the work, contributed to the interpretation of the results and worked on the manuscript. SK conducted all tooth and axis reconstructions and did the measurements. SK and KF performed the computations and verified the analytical methods. SK wrote the main manuscript with the support of CS and KF. SK prepared all figures and tables with input from CS and KF. All authors provided critical feedback and revised and reviewed the final manuscript.

Funding

This article has received financial support for open access publication fees from the Justus-Liebig-University Gießen, Germany.

Conflict of Interests

The authors declare that the submitted work was conducted in the absence of any personal, professional or financial relationships that could potentially be constructed as a conflict of interest.

References

1. Habermehl KH. Wie sicher ist die Altersbestimmung beim Pferd? *Berl Munch Tierarztl Wochenschr.* (1981) 94:167–71.
2. Richardson J, Cripps P, Record JL-V, 1995 U. An evaluation of the accuracy of ageing horses by their dentition: changes of dental morphology with age. *Vet Rec.* (1995) 137:117–21. doi: 10.1136/VR.137.5.117
3. Muylle S, Simoens P, Lauwers H. Ageing horses by an examination of their incisor teeth: an (im)possible task? *Vet Rec.* (1996) 138(13):295–301. doi:

10.1136/VR.138.13.295

4. Muylle S, Simoens P, Lauwers H, van Loon G. Ageing draft and trotter horses by their dentition. *Vet Rec.* (1997) 141:17–20. doi: 10.1136/VR.141.1.17
5. Muylle S, Simoens P, Lauwers H, van Loon G. Ageing Arab horses by their dentition. *Vet Rec.* (1998) 142:659–62. doi: 10.1136/vr.142.24.659
6. Muylle S, Simoens P, Lauwers H. Age-related Morphometry of Equine Incisors. *J Vet Med Ser A.* (1999) 46:633–43. doi: 10.1046/j.1439-0442.1999.00261.x
7. Muylle S, Simoens P, Lauwers H, van Loon G. Age Determination in Mini-Shetland Ponies and Donkeys. *J Vet Med Ser A.* (1999) 46:421–9. doi: 10.1046/j.1439-0442.1999.00229.x
8. Klugh D. Eruption and Shedding of Teeth. In: Klugh D, editor. *Principles of equine dentistry.* 1st ed. London: CRC Press (2010). p. 79–88.
9. Muylle S. Ageig. In: Easley J, Dixon P, Schumacher J, editors. *Equine Dentistry.* 3rd ed. London: Elsevier Saunders (2011). p. 85–96.
10. Nicholls VM, Townsend N. Dental Disease in Aged Horses and Its Management. *Vet Clin North Am Equine Pract.* (2016) 32:215–27. doi: 10.1016/J.CVEQ.2016.04.002
11. Richardson J. Ageing horses - an illustrated guide. *In Pract.* (1997) 19:486–9. doi: 10.1136/inpract.19.9.486
12. Martin MT, Martin MT, Scrutchfield WL, Joyce JR. A Systematic Approach to Estimating the Age of a Horse. *Am Assoc Equine Pract.* (1999) 45:273–5. Available from: <http://www.ivis.org/proceedings/AAEP/1999/273.pdf>
13. Dixon PM, du Toit N. Dental Anatomy. In: Easley J, Dixon PM, Schumacher J, editors. *Equine dentistry.* 3rd ed. Elsevier Saunders (2011). p. 51–76
14. Loch WE, Bradley M. Determining Age of Horses by Their Teeth. *MU Extension, University of Missouri-Columbia G2842.* (1998). Available from: <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/handle/10355/4028>

15. Domanska-Kruppa N, Venner M, Bienert-Zeit A. Cephalometric Study of the Overjet Development in Warmblood Foals. *Front Vet Sci.* (2019) 6:431. doi: 10.3389/fvets.2019.00431/full
16. Arnbjerg J. Generalized Hypercementosis in Geriatric Horses. *J Vet Dent.* (2014) 31:153–9. doi: 10.1177/089875641403100302
17. Ong HB, Woods MG. An Occlusal and Cephalometric Analysis of Maxillary First and Second Premolar Extraction Effects. *Angle Orthod.* (2001) 71:90–102. doi: 10.1043/0003-3219(2001)071<0090:AOACAO>2.0.CO;2
18. Ludwig M. A cephalometric analysis of the relationship between facial pattern, interincisal angulation and anterior overbite changes. *Angle Orthod.* (1967) 37:194–204. doi: 10.1043/0003-3219(1967)037<0194:ACAOTR>2.0.CO;2
19. Livas C, Delli K, Spijkervet FKL, Vissink A, Dijkstra PU. Concurrent validity and reliability of cephalometric analysis using smartphone apps and computer software. *Angle Orthod.* (2019) 89:889–96. doi: 10.2319/021919-124.1
20. Schrock P, Lüpke M, Seifert H, Staszyc C. Finite element analysis of equine incisor teeth. Part 2: Investigation of stresses and strain energy densities in the periodontal ligament and surrounding bone during tooth movement. *Vet J.* (2013) 198:590–8. doi: 10.1016/J.TVJL.2013.10.010
21. Staszyc C, Suske A, Pöschke A. Equine dental and periodontal anatomy: A tutorial review. *Equine Vet Educ.* (2015) 27:474–81. doi: 10.1111/eve.12317
22. Schrock P, Lüpke M, Seifert H, Staszyc C. Three-dimensional anatomy of equine incisors: tooth length, enamel cover and age related changes. *BMC Vet Res.* (2013) 9:249. doi: 10.1186/1746-6148-9-249
23. Masella RS, Meister M. Current concepts in the biology of orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* (2006) 129:458–68. doi: 10.1016/J.AJODO.2005.12.013
24. Ahn H-W, Moon SC, Baek S-H. Morphometric evaluation of changes in the alveolar

- bone and roots of the maxillary anterior teeth before and after en masse retraction using cone-beam computed tomography. *Angle Orthod.* (2013) 83:212–21. doi: 10.2319/041812-325.1
25. Henry TJ, Puchalski SM, Arzi B, Kass PH, Verstraete FJM. Radiographic evaluation in clinical practice of the types and stage of incisor tooth resorption and hypercementosis in horses. *Equine Vet J.* (2017) 49:486–492. doi: 10.1111/evj.12650
 26. Lisboa C de O, Masterson D, Motta AFJ, Motta AT. Reliability and reproducibility of three-dimensional cephalometric landmarks using CBCT: a systematic review. *J Appl Oral Sci.* (2015) 23:112–9. doi: 10.1590/1678-775720140336
 27. Nalçacı R, Öztürk F, Sökücü O. A comparison of two-dimensional radiography and three-dimensional computed tomography in angular cephalometric measurements. *Dentomaxillofacial Radiol.* (2010) 39:100–6. doi: 10.1259/dmfr/82724776
 28. Listmann L, Schrock P, Failing K, Staszuk C. Occlusal Angles of Equine Incisors. *J Vet Dent.* (2017) 34:259–67. doi: 10.1177/0898756417739465
 29. Strauch S, Schwarzer J, Kau S. Computertomografie in der Pferde Zahnheilkunde – ein Überblick. *Pferde Spiegel.* (2019) 22:23–36. doi: 10.1055/a-0671-8580
 30. Barakzai SZ, Barnett TP. Computed tomography and scintigraphy for evaluation of dental disease in the horse. *Equine Vet Educ.* (2015) 27:323–31. doi: 10.1111/eve.12288
 31. Bregger MDK, Koch C, Zimmermann R, Sangiorgio D, Schweizer-Gorgas D. Cone-beam computed tomography of the head in standing equids. *BMC Vet Res.* (2019) 15:289. doi: 10.1186/s12917-019-2045-z
 32. Floyd MR. The modified Triadan system: nomenclature for veterinary dentistry. *J Vet Dent.* (1991) 8:18–9. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1815632>
 33. Triadan H. Tierzahnheilkunde: Zahnerhaltung (Füllungstherapie mit “Composite materials” und Endodontie) bei Affen und Raubtieren. *Schweiz Arch Tierheilkd.* 1972;114:292–316.

34. Hinkle DE, Wiersma W, Jurs SG. *Applied statistics for the behavioral sciences*. Vol. 663. Boston; Mass.: Houghton Mifflin College Division (2003).
35. Jodeh DS, Kuykendall LV, Ford JM, Ruso S, Decker SJ, Rottgers SA. Adding Depth to Cephalometric Analysis. *J Craniofac Surg*. (2019) 30:1568–71. doi: 10.1097/SCS.0000000000000555
36. Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF. New 3-Dimensional Cephalometric Analysis for Orthognathic Surgery. *J Oral Maxillofac Surg*. (2011) 69:606–22. doi: 10.1016/J.JOMS.2010.09.010
37. Carlos Quintero J, Trosien A, Hatcher D, Kapila S. Craniofacial imaging in orthodontics: historical perspective, current status, and future developments. *Angle Orthod*. (1999) 69:491–506. doi: 10.1043/0003-3219(1999)069%3C0491:CIIOHP%3E2.3.CO;2
38. Schulze R, Heil U, Gross D, Bruellmann DD, Dranischnikow E, Schwanecke U, et al. Artefacts in CBCT: a review. *Dentomaxillofac Radiol*. (2011) 40(5):265–73. doi: 10.1259/dmfr/30642039
39. Watanabe H, Honda E, Tetsumura A, Kurabayashi T. A comparative study for spatial resolution and subjective image characteristics of a multi-slice CT and a cone-beam CT for dental use. *Eur J Radiol*. (2011) 77(3):397–402. doi: 10.1016/j.ejrad.2009.09.023
40. Bergersen EO. Enlargement and distortion in cephalometric radiography: compensation tables for linear measurements. *Angle Orthod*. (1980) 50:230–44. doi: 10.1043/0003-3219(1980)050%3C0230:EADICR%3E2.0.CO;2
41. Lou L, Lagravere MO, Compton S, Major PW, Flores-Mir C. Accuracy of measurements and reliability of landmark identification with computed tomography (CT) techniques in the maxillofacial area: a systematic review. *Oral Surgery, Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology*. (2007) 104:402–11. doi: 10.1016/J.TRIPLEO.2006.07.015
42. Carmalt J, Townsend H, Allen A. Effect of dental floating on the rostrocaudal mobility of the mandible of horses. *J Am Vet Med Assoc*. (2003) 223:666–9. doi: 10.2460/javma.2003.223.666

43. Staszuk C, Wulff W, Jacob H-G, Gasse H. Collagen Fiber Architecture of the Periodontal Ligament in Equine Cheek Teeth. *J Vet Dent.* (2006) 23:143–7. doi: 10.1177/089875640602300303
44. McMullan WC. Dental criteria for estimating age in the horse. *Equine Pract.* (1983) 5:36–43. Available from: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US19840112330>
45. Staszuk C, Bienert A, Kreutzer R, Wohlsein P, Simhofer H. Equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. *Vet J.* (2008) 178:372–9. doi: 10.1016/J.TVJL.2008.09.017
46. Lorello O, Foster DL, Levine DG, Boyle A, Engiles J, Orsini JA. Clinical treatment and prognosis of equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. *Equine Vet J.* (2016) 48:188–94. doi: 10.1111/evj.12406
47. Fuss Z, Tsesis I, Lin S. Root resorption - diagnosis, classification and treatment choices based on stimulation factors. *Dent Traumatol.* (2003) 19:175–82. doi: 0.1034/j.1600-9657.2003.00192.x
48. Kunz JR, Granella MCS, Mendes RP, Müller TR, Kau S, Fontequé JH. High prevalence of orodontal disorders in South Brazilian cart horses: Walking a tightrope between animal welfare and socio-economic inevitability. *J Vet Dent.* (2019). Accepted for publication.

4 Übergreifende Diskussion

Die vorliegende Studie zielte einerseits darauf ab, die Grundlagen und den Verwendungsbereich einer möglichst standardisierten CT-Untersuchung des Kopfes am stehend sedierten Pferd abzubilden, was gleichsam die Basis für cephalometrische/orthodontische Messungen, z.B. interdental und dentofaziale Winkelmessungen oder die Messung von Malokklusionen, darstellt. Unter Berücksichtigung einiger Kriterien wurde gezeigt, dass sich die bereits technisch etablierte CT Methode unter gewohnten Klinikbedingungen für cephalometrische/orthodontische Messungen heranziehen lässt. Dies dürfte in der Pferde Zahnheilkunde in Zukunft eine zunehmend wichtigere Rolle spielen, auch um die Ätiologie dentaler und maxillofazialer Pathologien gänzlich zu verstehen. Weiter wurde ein 3D cephalometrischer Ansatz etabliert mit dem erstmals die Angulation der klinischen Kronen gegenüberliegender Schneidezähne methodisch standardisiert und für alle Zahnpositionen getrennt ermittelt werden konnte. Es wurde eine altersabhängige Winkelabnahme gezeigt, die bei jüngeren Pferden und 03er stärker ausgeprägt ist, was im Hinblick auf das Erscheinungsbild und Progressivitätsmuster inzisaler Parodontopathien einen ätiologischen Einfluss der Schneidezahnwinkelung vermuten lässt.

4.1 Diskussion der angewandten Methoden

In dieser Studie konnten eine standardisierte CT Methode an stehend sedierten Pferden und die derzeitigen klinischen Anwendungsbereiche detailliert beschrieben und CT Daten von 48 Pferden, ohne pathologische Veränderungen im Schneidezahnbereich, für die weiterführende 3D cephalometrische Messung der IIA klinischer Kronen herangezogen werden. Es konnte ein Bild über die normale anatomische Situation vieler Strukturen am Pferdekopf vermittelt werden. Dieses Wissen ist essentiell, um beispielsweise maxillofaziale, mandibuläre oder dentoalveoläre cephalometrische Orientierungspunkte und Referenzebenen/-linien korrekten auffinden und definieren zu können. Um die IIA der Schneidezähne bei Pferden zu ermitteln, berichten einige frühere Studien laterale Profildispanografien (Richardson et al., 1995; Muylle et al., 1996; Muylle et al., 1997; Muylle et al., 1999) oder Profilansichten (Habermehl, 1981; Muylle et al., 1998; Arnbjerg, 2014) verwendet zu haben. Bis dato lagen keine Studien vor, die die methodische Vorgehensweise und Messmethode exakt beschreiben. In einer erst kürzlich erschienen Studie wurden bei Fohlen, auf Basis standardisierter laterolateraler Röntgenbilder des Kopfes, 2D Cephalogramme erzeugt, mittels derer primär die Entstehung

von Class II Malokklusionen, z.B. Brachygnathia inferior, aber auch die IIA untersucht wurden (Domanska-Kruppa et al., 2019). Als erste unter vielen früheren Studien die sich mit der IIA beschäftigen, wurden das Verfahren und die verwendeten dentoalveolären Orientierungspunkte und daraus resultierende 2D Referenzlinien, je eine für die oberen und unteren Schneidezähne, detailliert beschrieben. Wenngleich in der Studie von Domanska-Kruppa et al. (2019) die Messung der IIA zwischen den beiden Referenzlinien keinen Unterschied zwischen den Fohlen der Gruppen „gesund“ und „overjet“ ergab, beziehen sich die Referenzlinien durch die gewählten anatomischen Orientierungspunkte nicht ausschließlich auf die klinischen Kronen oder eine anatomische Längsachse. Zudem konnten in dieser Studie aufgrund der nicht-überlagerungsfreien 2D Abbildung aller Zähne der Schneidezahnarkaden und der somit ungenügenden räumlichen Auflösung die Referenzlinien ebenso nur an den 01er ermittelt werden. Bisher wurde in allen Arbeiten lediglich ein Wert oder eine deskriptive Winkelbeschreibung generalisiert für die Winkelung aller Schneidezahnpositionen verwendet. Eine getrennte Betrachtung der einzelnen Zahnpositionen fehlt. Veränderungen inzisaler Parodontopathien treten beim Pferd sehr häufig mit gerichteter Progressivität auf, wobei Veränderungen einerseits von den 03er zu den 01er oder *vice versa* fortschreiten (Earley und Rawlinson 2013; Lorello et al., 2016; Henry et al., 2017; Rahmani et al., 2019). Diese Erkenntnis unterstreicht die Dringlichkeit biomechanische Veränderungen der hypsodonten Pferdeschneidezähne auf Basis einzelner Zahnpositionen zu untersuchen, was in der vorliegenden Studie mittels standardisierter CT Scans von stehend sedierten Pferden erstmals gelang.

Zur Sedierung wurde in allen Fällen Detomidinhydrochlorid verwendet (0.01 mg/ kg Körpergewicht i.v.; Dosiserhöhung oder Bolusapplikation nach Bedarf). Wohlwissend um den synergistischen anti-nozizeptiven Effekt bei gleichzeitiger Applikation von α_2 -Agonisten (zumeist Detomidin) und Opiaten (zumeist Butorphanol) beim Pferd, sprich eine Erhöhung somato-nozizeptiver Schwellenpotenziale sowie eine verlängerte analgetische Wirkung (Clarke und Paton, 1988; England und Clarke, 1996; Schatzmann et al., 2001), wurde aus Gründen klinisch empirischer Erfahrung und den beschriebenen Nebenwirkungen während der CT Scans auf Opiate verzichtet. Butorphanol führt bei alleiniger intravenöser Gabe initial zu einer somnolenten Ataxie und weiterführend zu gesteigerter Lokomotion, myofibrillären Faszikulationen, erhöhter Schritt- und Tripelfrequenz sowie Taumeln (Sellon et al., 2001; Knych et al., 2013). Auch in Kombination mit einem α_2 -Agonisten wurden ähnliche teils

exzitatorische Bewegungen beobachtet (Clarke und Paton, 1988). Während der CT Untersuchung des Kopfes am stehenden sedierten Pferd bedingen sowohl exzitatorische wie auch taumelnde Bewegungen unerwünschte Artefakte, sogenannte Wackel-/ Motion Artefakte (MOAs), die es zu reduzieren gilt. In der vorliegenden Studie waren MOAs im zu untersuchenden Schneidezahnbereich mit 24.8% das häufigste Ausschlusskriterium. Auch eine normale Atembewegung kann leichte MOAs verursachen. In einer kürzlich erschienen Studie, die sich mit Cone-Beam Computertomografie (CBCT) des Pferdekopfes am stehend sedierten Pferd beschäftigt, zeigten sich rund 46% aller Scans von schlechter diagnostischer Qualität – vor allem wegen MOAs (Bregger et al., 2019). Aufgrund der röntgenphysikalischen Eigenschaften kommt es bei CBCTs im Vergleich zu mehrzeiligen helikalen CTs bei Bewegungen des zu untersuchenden Objektes zu MOAs in allen Bildern, auch wenn die Bewegung nur in einem kurzen Zeitraum der Bildakquisition stattfindet (Pauwels, 2018; Bregger et al., 2019). Zudem ist die Größe des Scanbereiches am Pferdekopf in der CBCT vergleichsweise eingeschränkt, ein Verbindungsalgorithmus akquirierter Bildstapel („image-stitching“) fehlt den aktuell in der Pferdemedizin gebräuchlichen Anwendungen und auch die Röntgenstreustrahlung ist größer (Schulze et al., 2011; Bregger et al., 2019). Weitere häufige Artefakte sind „alias“-Artefakte durch Divergenz der Röntgenstrahlen und ein höheres Bildrauschen (Schulze et al., 2011). Obwohl das CBCT aufgrund der geringeren Kosten, dem leichteren Handling und der deutlich niedrigeren Strahlenexposition in der 3D Cephalometrie beim Menschen fast ausschließlich zur Anwendung kommt (De Vos et al., 2009), bleibt fraglich, ob sich diese Technologie aufgrund genannter Nachteile und der geringeren Patientencompliance in der Pferdecephalometrie durchsetzen kann. Zwei wichtige Punkte sind hier bestimmt der kleine Scanbereich und die höhere MOA Anfälligkeit, was die verlässliche Definition von Referenzachsen/ -ebenen unter gleichzeitiger Einbeziehung anatomischer Orientierungspunkte rostral und caudal am Kopf unmöglich macht. Hier scheinen die technischen Möglichkeiten konventioneller mehrzeiliger CTs derzeit überlegen zu sein. Wie in unserer Studie, ist der für die Messung der interdentalen Angulation nötige MOA-freie Scanbereich relativ kurz, was solide Untersuchungen erlaubt.

Die CT-assistierte 3D Cephalometrie stellt eine verlässliche und reproduzierbare, häufig in der Humanorthodontie angewandte, Methode zur Messung dentaler Angulationen und Inklinationen sowie zur Planung orthodontischer Eingriffe dar (Alves et al., 2007; Karatas und Toy, 2014; Lisboa et al., 2015). Diese Anwendung erlaubt eine separate Rekonstruktion, und

Identifikation dentaler Orientierungspunkte, wie auch Winkelmessungen an allen Schneidezahnpositionen, was beim Menschen insbesondere bei komplexen orthodontischen Anomalien, z.B. inzisaler Zahnengstand, zur Anwendung kommt (Nalçaci et al., 2010, Lisboa et al., 2015). Trotz einer Vielzahl spezifischer Studien resümieren Pittayapat et al. (2014) in einer Übersichtsarbeit, dass das Evidenzlevel noch auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau liegt und weiterführende Bemühungen zur forcierten methodischen Standardisierung gefordert sind. In einer jüngeren Studie wird angenommen, dass die 3D Cephalometrie der konventionellen 2D Cephalometrie sowohl bei Winkel- und Längenmessungen überlegen ist (Li et al., 2017). Neben einer Kadaverstudie zu CT-assistierten 3D cephalometrischen Messungen des transversalen und sagittalen Kauflächenwinkels von Pferdeschneidezähnen (Listmann et al., 2017) liegen keine weiteren 3D cephalometrischen Studien zum Schneidezahngebiss beim Pferd vor. Beim Menschen wurde im direkten Vergleich von konventioneller 2D und 3D Cephalometrie gezeigt, dass es einen deutlichen Unterschied bei Messungen der IIA und dentofazialen Inklination von Oberkieferschneidezähnen gibt (Nalçaci et al., 2010; Jodeh et al., 2019). Jodeh et al. (2019) empfehlen demnach, insbesondere beim Vergleich von Winkelmessungen der Schneidezähne vorsichtig zu sein und zur Maximierung der Messgenauigkeit die jeweilige Methode fallabhängig selektiv zu wählen. In der 2D Cephalometrie wird die IIA lediglich mit dem Neigungswinkel („pitch“) zwischen gegenüberliegenden Referenzachsen beschrieben, wobei 3D Rekonstruktionen innerhalb eines globalen Referenzrahmens, wie in unserer Studie, alle Richtungsparameter, nämlich 1) Neigungs- („pitch“), 2) Roll- („roll“) und 3) Gierwinkel („yaw“) berücksichtigen (Gateno et al., 2011). Zudem muss in der 2D Cephalometrie die 2D Projektion und Superposition benachbarter anatomischer Strukturen der linken und rechten Kopfhälfte, z.B. die großen Schneidezähne von Pferden, und die Kopfposition während der Bildakquisition als bedeutende Limitationsfaktoren berücksichtigt werden (Carlos Quintero et al., 1999).

In der Humancephalometrie ist hinlänglich bekannt, dass eine unzureichend genaue Lagerung des Kopfes, hier insbesondere die Rotation des Kopfes, einer der bedeutendsten Faktoren ist, der eine regionale Vergrößerung und Distorsion röntgenologisch abgebildeter Strukturen bedingt (Bergersen, 1980; Lou et al., 2007). Die CT Aufnahmen in der vorliegenden Studie erfolgten alle gemäß einem standardisierten Protokoll, das eine möglichst standardisierte Kopfposition bei gleichzeitig maximaler Sicherheit für Tier, Untersucher und Gerät gewährleistet. Trotz der Möglichkeit Strukturen auf Basis von CT Daten 3D zu rekonstruieren,

ist es für die cephalometrische Messung der IIA wichtig, die relative 3D Kieferbewegung und daraus resultierende räumliche Dislokation der fazialen Untereinheiten Ober- und Unterkiefer zu berücksichtigen. Über die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der relativen Kieferbewegung beim Pferd ist bisweilen wenig bekannt. Die translationale rostrocaudale Beweglichkeit hängt jedoch von der Kopfposition des Pferdes ab (Carmalt et al., 2003). Ob diese auch mit einer rotatorischen Bewegung einhergeht ist nicht bekannt. Wie und ob sich die IIA demnach bei unterschiedlichen Kopfpositionen verändert bleibt abzuklären. Eine standardisierte möglichst natürliche Kopfposition während des Scanvorganges ist daher unerlässlich. Ebenso bedingt eine Weichteilinterposition zwischen den Schneidezähnen, dass diese auseinanderweichen und die gemessene IIA somit nicht beurteilt werden darf. In der einzigen konventionellen 2D Cephalometrie-Studie beim Pferd wurde zur bestmöglichen Standardisierung der Kopfposition ein selbstgebauter Cephalostat verwendet (Domanska-Kruppa et al., 2019). In der vorliegenden Studie wurde das Pferd im höhenverstellbaren Untersuchungsstand so positioniert (vertikal und horizontal), dass die ventrale mandibuläre Ebene (vgl. „Mandibular Plane“ beim Menschen (Tweed, 1946)) parallel zum Untersuchungstisch orientiert ist und der Kopf möglichst entspannt liegt. Zur Stabilisierung wurden ein Vakuumkissen und Papierklebeband verwendet. Möglicherweise gelingt es in zukünftigen Studien unter Berücksichtigung aller Sicherheitsaspekte ein Cephalostat für die Kopf CT beim Pferd zu implementieren.

Mittels 3D multiplanarer Rekonstruktion (MPR) der inkludierten CT Datensätze konnten in der vorliegenden Arbeit die einzelnen Schneidezähne in einem globalen Referenzrahmen im idealen Längsschnitt dargestellt und die IIA anhand definierter dentoalveolärer Orientierungspunkte vermessen werden. Durch die über- und nebeneinander angeordneten Voxel kann das Objekt ohne geometrische Projektionsfehler oder Superposition benachbarter Strukturen in allen Richtungen rekonstruiert werden. Im Vergleich zur Identifikation dentofazialer Orientierungspunkte und der direkten Winkelmessung an rekonstruierten 3D Volumina (Nalçaci et al., 2010) verwendeten wir den Modus der 3D Rekonstruktion, um von jedem Zahn, orthogonal auf seine ideale Längsachse, ein röntgenbildähnliches 2D Bild durch die Synthetisierung zugehöriger Voxel (Dickschichtrekonstruktion) zu erzeugen. Anhand der Einzelbilder konnten die dentoalveolären Orientierungspunkte bei allen Zähnen problemlos bestimmt und Winkelmessungen durchgeführt werden. Unter Nichteinhaltung einer orthogonal auf die jeweilige Zahn längsachse stehenden Dickschichtrekonstruktion können

auch Distorsionsartefakte, wie bei der konventionellen 2D Cephalometrie (Bergersen, 1980) entstehen. Zudem sei kritisch angemerkt, dass die Dickschichtrekonstruktion eine Superposition mesialer und distaler dentaler Aspekte bedingt, was zu einer geringen Unschärfe bei der Referenzachsenrekonstruktion führen kann. Die verwendeten zentralen labialen Kronenaspekte dürften hiervon jedoch weniger betroffen sein.

Die methodische Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit lässt die eindeutige Rekonstruktion der Labialachsen klinischer Kronen aller Schneidezähne unter Verwendung bestimmter Orientierungspunkte und folglich die Messung der IIA zu. Die zusätzlich cephalometrisch implementierte Referenzmethode basiert auf den Lingual- und Palatalflächen/ -achsen der O3er (Muylle et al., 1996). Diese konnten aufgrund der relativ geraden Oberfläche entsprechend rekonstruiert und die Rekonstruktions-/ Messgenauigkeit in weiterer Folge ermittelt werden. Die in anderen früheren Studien zur Messung der IIA beschriebenen Referenzstrukturen, wie z.B. die Labialfläche des *Os incisivum* und der Schneidezähne im Unterkiefer (Habermehl, 1981), die Labialflächen (Klugh, 2010) oder Dorsalflächen (Richardson et al., 1995) der Schneidezähne im Ober- und Unterkiefer, sind aus geometrischer und anatomischer Sicht nicht nachvollziehbar. Pferdeschneidezähne weisen eine gekrümmte nach labial konvexe Labialfläche auf (Muylle et al., 1999; Schrock et al., 2013b). Jeder unendliche Punkt auf einer gekrümmten Oberfläche weist eine andere Tangentensteigung auf, was je nach verwendeter Tangente unterschiedliche Werte für die IIA bedingt. Die fehlende Definition der in diesen Untersuchungen herangezogenen Referenzachsen macht die Aussagen zur IIA unzuverlässig. Gleich wie in der Studie von Domanska-Kruppa et al. (2019) verwendeten wir den labiookklusalen Punkt als okklusale Orientierungsmarke. Als apikalen Orientierungspunkt verwendeten wir im Gegensatz zur okklusalen Spitze des labialen Aspekts des *Processus alveolaris* des *Os incisivum* und der Mandibula einen apikolabialen Punkt, der im Bereich des *Margo gingivalis* liegt. Somit konnte die Labialachse der klinischen Kronen bestmöglich approximiert werden.

4.2 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

In der CT Routinediagnostik an der Tierärztlichen Klinik Gessertshausen, Deutschland, der bereitstellenden Institution aller in dieser Studie verarbeiteten CT Scans, gelingt es in rund 98% der Fälle, CT-Studien des Kopfes am stehenden, mit einem α_2 -Agonisten sedierten, Pferd anzufertigen. In < 2% werden CT-Studien des Kopfes unter total intravenöser

Anästhesie, also in Vollnarkose, durchgeführt. Dies ist zumeist ungenügender Patientencompliance oder der Körpergröße (z.B. Miniatur Pferde) geschuldet. Für die Messung der IIA mussten, trotz des standardisierten Scanvorganges und bestmöglicher Stabilisierung des Kopfes, 31 von 125 Fälle (24.8%) aufgrund von MOAs im Bereich der Schneidezähne exkludiert werden. Dieser Anteil könnte sich in Fällen elektiv orthodontischer Diagnostik reduzieren, da z.B. bei der Ermittlung der IIA der Scanbereich kleiner gewählt und der Scan aufgrund sinkender Röntgenstrahlenbelastung bedarfsweise wiederholt werden kann.

Die Ergebnisse der Wiederholbarkeitsanalyse hier angewandter cephalometrischer Methoden zeigten, dass die neu etablierte und auf definierten Orientierungspunkten basierende Rekonstruktion der Labialachsen ein höheres Präzisionslevel erreicht als die Referenzmethode, bei der die Lingual- und Palatalflächen der 03er herangezogen werden (Standardabweichung $\pm 0.98^\circ$ vs 1.60°). Der Variationskoeffizient lag unabhängig der verwendeten Methode bei $< 2.4\%$, was eine geringe Streuung der Einzelmessungen um den Mittelwert aller Wiederholungsmessungen indiziert. Dennoch zeigte sich dieser Wert für die Referenzmethode im Mittel doppelt so hoch. Die beiden Methoden konnten nur für die 03er verglichen werden, denn die Achsenrekonstruktion bei den 01er und 02er ist aufgrund der sehr kurzen lingualen und palatalen klinischen Kronen und ihrer durch das teilweise Anpressen der Zunge schlechten computertomografischen Abgrenzbarkeit in den meisten Fällen nicht möglich. Unabhängig von der Zahnposition lag die mittlere Standardabweichung der Einzelmessungen für die neu etablierte Methode bei 0.89° , was sowohl für klinische wie auch wissenschaftliche Anwendungen ausreichen dürfte. Die neu beschriebenen Labialachsenrekonstruktionen wurden demnach für alle weiteren Untersuchungen der alters- und zahnpositionsabhängigen Winkelveränderungen herangezogen. In dieser Studie wurde die Intra- jedoch nicht die Interobserver-Varianz erhoben. Eine humancephalometrische Varianzstudie konnte zeigen, dass sich die Intra- und Interobserver-Variabilität für wiederholte Winkelmessungen oft kaum unterscheiden ($< 0.65^\circ$), unabhängig davon, ob eine 3D oder konventionelle 2D Methode angewendet wird (Nalçacı et al., 2010). Die Identifizierbarkeit und Reproduzierbarkeit anatomischer Orientierungspunkte sind in der Humancephalometrie eine Grundvoraussetzung für zuverlässige Winkel- und Längenmessungen (Lou et al., 2007). Es ist bekannt, dass lineare cephalometrische Messungen jedoch eine erhöhte Fehleranfälligkeit zeigen, wenn kürzere Distanzen gemessen werden (Lou

et al., 2007; Domanska-Kruppa et al., 2019). Der beobachtete Unterschied in der Reproduzierbarkeit der Messungen zwischen den rekonstruierten Labialachsen und den anatomisch kurzen Lingual-/ Palatalflächen der klinischen Kronen von Eck Schneidezähnen könnte damit erklärt werden.

Hypsodonte Pferdeschneidezähne unterliegen einer fortwährenden okklusalen Abnützung, was eine ständige morphometrische Adaptierung und parodontale Remodelierungsprozesse erfordert (Schrock et al., 2013b; Staszuk et al., 2006; Staszuk et al., 2015). Rund vier Jahre nach der Eruption erreichen die Schneidezähne des Pferdes ihre maximale Länge. Diese unterscheidet sich je nach Zahnposition und Stellung im Ober- oder Unterkiefer, wobei die Länge bis zu einem Alter von 13 - 15 Jahren, trotz okklusaler Abrasion und Attrition von Zahnhartsubstanzen, beibehalten wird (Schrock et al., 2013b). Darauf folgend kann die okklusale Abnützung nicht mehr durch Neuf ormation von Zahnhartsubstanzen kompensiert werden, was zu einer Reduktion der intraalveolären Zahnlänge und somit der parodontalen Anheftungsfläche führt (Muylle et al., 1999; Staszuk et al., 2006; Staszuk et al., 2015). Die okklusalen Kräfte dürften jedoch gleich hoch bleiben (Staszuk et al., 2006). Frühere anekdotische Beobachtungen führten zu der Annahme, dass die Abnahme des Winkels zwischen den Schneidezähnen mit der Zahn längenabnahme einhergeht (Habermehl, 1981; McMullan, 1983; Muylle, 2011). Unsere Ergebnisse zeigen Gegenteiliges. Die nichtlineare Regressionsanalyse des altersabhängigen Winkelverlaufes ergab, dass der Zeitraum der stärksten Winkelabnahme mit jenem der konstanten Zahn längenverhältnisse zusammenfällt (< 13 - 15 Jahre) und jener Kurvenbereich mit der geringsten Steigung fällt mit dem Zeitraum der stärksten Zahn längenabnahme zusammen. Trotz der geringen Fallzahl älterer Pferde weist die Kalkulation der vermuteten Endwerte der Winkelabnahme eine sehr hohe Präzision auf. Aufgrund der Datenstreuung und zahnpositionsabhängigen Unterschiede wird von einer Altersschätzung der Pferde anhand der IIA abgeraten. Die 03er wiesen sowohl initial wie auch global die stärkste Winkelabnahme auf, wohingegen die 01er und 02er keinen signifikanten Unterschied zeigten. Wir vermuten, dass die 03er aufgrund ihrer exponierten Stellung in den Schneidezahnarkaden und des geringen umliegenden Alveolarknochens eine höhere Suszeptibilität für natürlich wirkende orthodontische Kräfte aufweisen und dadurch einer größeren rostralen Drift unterliegen. Dies dürfte ein maßgebender Grund für die beschriebene Abflachung der bei jungen Pferden eher halbmondförmigen Schneidezahnbögen sein (Habermehl, 1975).

Die O3er stellen anhand des Zahnalters die jüngsten Zähne der Schneidezahnarkaden dar. Dennoch weisen sie am häufigsten klinische und radiologische Anzeichen der EOTRH, einer inzisalen Parodontopathie, auf (Binder, 2014; Lorello et al., 2016; Henry et al., 2017; Rahmani et al., 2019). Es wird vermutet, dass beim Pferd sowohl Winkel- und Längenveränderungen wie auch biomechanischer Stress zur Entstehung der EOTRH beitragen (Staszyk et al., 2008; Schrock et al., 2013a). Bei der EOTRH sind die EER und EIR die beiden hochprävalentesten resorptiven Läsionen, wobei sich deren Progressivitätsmuster gegenläufig verhält (Henry et al., 2017). Bei Katzen geht man davon aus, dass okklusaler Stress eine Ursache für Zahnresorptionen ist (Reiter et al., 2005). Beim Menschen nimmt man an, dass der Ersatzresorption und entzündlichen Resorption ein mechanisches Trauma der parodontalen Weichgewebe vorausgeht (Fuss et al., 2003). Ob in weiterer Folge Reparaturprozesse (Hyperzementose) überwiegen oder die Resorption fortschreitet dürfte vom Ausmaß des initialen Schadens abhängen. Den Resorptionstyp bestimmt der weitere Stimulus, wie z.B. parodontaler Stress oder infektiöse Noxen (Fuss et al., 2003). Dass bei den O3er am frühesten und stärksten Anzeichen einer externen Ersatzresorption auftreten könnte damit erklärt werden, denn die deutlich stärkere Winkelabnahme vermag in manchen Fällen eine chronisch parodontale Stresssituation auszulösen.

4.3 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie konnte ein umfassender Überblick über die technische Anwendung mehrzeiliger Computertomografen sowie das radiologische Erscheinungsbild normaler oromaxillofazialer Strukturen und Pathologien gegeben werden. Die CT am stehend sedierte Pferd stellt eine vielversprechende, klinisch anwendbare, Methode zur standardisierten cephalometrischen Winkelmessung am Kopf dar. Aufgrund der Möglichkeit zur Einzelzahndarstellung ist die Cephalometrie auf Basis von CT Daten der konventionellen 2D Cephalometrie beim Pferd in vielen Bereichen überlegen. Erstmals ließ sich die Angulation der klinischen Kronen gegenüberliegender Schneidezähne, getrennt für alle Zahnpositionen und methodisch standardisiert, ermitteln. Unabhängig von der Zahnposition lag die Wiederholbarkeit der Winkelmessungen unter Verwendung einer rekonstruierten Labialachse der jeweiligen klinischen Krone auf einem sehr hohen Niveau (mittlere SD $\pm 0.89^\circ$). Es wurde gezeigt, dass die beobachtete altersabhängige Winkelabnahme einem nichtlinearen Verlauf folgt und die Steigung mit zunehmendem Alter abflacht. Die O3er wiesen global betrachtet die

stärkste Abnahme auf. Beobachtete alters- und zahnpositionsabhängige Winkelunterschiede spiegeln sich im Auftreten erster Anzeichen und im Progressivitätsmuster der EOTRH wider. Eine mögliche Beteiligung orthodontischer Kräfte und weiterer biomechanischer Faktoren sollte bei ätiopathologischen Überlegungen zur EOTRH berücksichtigt werden.

4.4 Ausblick

Mittels 3D Cephalometrie kann weiter abgeklärt werden, ob die altersabhängigen Veränderungen der IIA lediglich mit der gekrümmten Zahnmorphologie zusammenhängen, oder ob eine orthodontische Rotation der Schneidezähne mitsamt ihrer Alveole dazu beiträgt. Unter Zuhilfenahme craniofazialer Referenzebenen kann die Bestimmung der dentofazialen Inklination in zukünftigen Studien zudem Aufschluss darüber liefern, ob die Schneidezähne im Ober- und Unterkiefer gleichermaßen für die altersabhängige Veränderung der IIA verantwortlich sind. Über die Winkelmessungen an den klinischen Kronen hinweg, kann für die einzelnen Schneidezähne eine Längsachse, die die apikookklusale Gesamtausdehnung des Zahnes berücksichtigt, cephalometrisch definiert werden. Ebenso muss weiterführend abgeklärt werden, ob es Unterschiede in der IIA und dentofazialen Inklination zwischen gesunden und an EOTRH erkrankten Pferden gibt. Erste Messungen an einer geringen Fallzahl von EOTRH Pferden zeigten bereits deutliche Abweichungen. Dennoch, um die Pathophysiologie und ätiologischen Grundlagen parodontaler Inzisivopathien beim Pferd besser verstehen zu lernen und Prophylaxemaßnahmen zielgerichteter anzusetzen, sind neben cephalo- und morphometrischen Messungen noch weiterführende biomechanische, pathohistologische, mikrobiologische und molekularbiologische Untersuchungen notwendig.

5 Zusammenfassung

Natürliche oder beigebrachte orthodontische Kräfte können eine übermäßige parodontale Beanspruchung verursachen, was beim Menschen zu Alveolarknochenverlust, -apposition und Wurzelresorption führen kann. Die Equine Odontoclastic Tooth Resorption and Hypercementosis (EOTRH), eine inzisale Parodontopathie beim Pferd, zeigt ähnliche Veränderungen. Es ist bekannt, dass die hypsodonten Schneidezähne des Pferdes kontinuierlichen morphometrischen Veränderungen und parodontalen Umbauprozessen unterliegen und Änderungen der altersabhängigen parodontale Kraftverteilung einem ähnlichen räumlichen Muster folgen wie das Auftreten erster radiologischer Anzeichen bei EOTRH. Der bekannten altersbedingten Veränderlichkeit der interinzisalen Angulation (IIA) wird hierbei eine wichtige pathoätiologische Rolle zugeschrieben. Früheren Studien geben nur einen Winkel generalisiert für alle Zahnpositionen an. Methodische Standards oder metrische Daten fehlen zumeist. Das Ziel dieser Studie ist, einen Überblick über die technischen Grundlagen und den Verwendungsbereich einer standardisierten konventionellen CT-Untersuchung des Kopfes mit mehrzeiligen Detektorsystemen am stehend sedierte Pferd, sowie über das radiologische Erscheinungsbild normaler anatomischer oromaxillofazialer Strukturen wie auch Pathologien zu geben und einen validierten CT-basierten cephalometrischen Ansatz zur Bestimmung der alters- und zahnpositionsabhängige IIA klinischer Kronen zu etablieren. Die Übersichtsarbeit vereint Erfahrungswerte und retrospektive Daten ausschließlich von CT Untersuchungen an stehend sedierte Pferden. Für die cephalometrischen Messungen der IIA klinischer Kronen wurden CT-basierte multiplanare Dickschichtrekonstruktionen der einzelnen Schneidezähne von 48 zahngesunden Pferden (2 – 20 Jahre; 8.8 ± 4.6 Jahre), unter Berücksichtigung eines globalen Referenzrahmens, herangezogen. Die IIA wurde als Winkel zwischen den jeweiligen Labialachsen der klinischen Kronen gegenüberliegender Schneidezähne definiert. Die Labialachsenrekonstruktionen folgten einem standardisierten Protokoll, das auf bestimmten dentoalveolären Orientierungspunkten beruht. Neben einer Wiederholbarkeitsanalyse der Messungen wurde die neu etablierte Methode (Labialachsen) mit einer cephalometrisch implementierten Referenzmethode, die die Lingual-/ Palatalflächen der klinischen Kronen der O3er, ursprünglich anhand lateraler Profilfotografien, berücksichtigt, verglichen. Zur Bestimmung des altersabhängigen Winkelverlaufes und der zahnpositionsabhängigen Unterschiede wurden die permanenten Schneidezähne herangezogen.

Es wurde gezeigt, dass die CT des Kopfes am stehend sedierten Pferd eine gut geeignete Methode für standardisierte cephalometrische Messungen darstellt. Das technische Setup und die Möglichkeit zur standardisierten Positionierung des Kopfes implementiert die Anwendbarkeit von CT-Studien für cephalometrische Applikationen auch unter gewohnten Klinikbedingungen. In dieser Studie konnte so erstmals die Angulation der klinischen Kronen gegenüberliegender Schneidezähne methodisch standardisiert und getrennt für alle Zahnpositionen ermittelt werden. Die Wiederholbarkeit der Winkelmessungen lag unter Verwendung einer auf definierten Orientierungspunkten basierende Rekonstruktion der Labialachsen klinischer Kronen, global für alle Schneidezahnpositionen, auf einem sehr hohen Niveau (mittlerer Variationskoeffizient = 0.65%; mittlere SD \pm 0.89°). Im Vergleich zur IIA rekonstruierter Labialachsen der O3er zeigte sich die Streuung der einzelnen Wiederholungsmessungen für die Referenzmethode im Mittel doppelt so hoch, $P = 0.017$. Die beobachtete altersabhängige Winkelabnahme folgt einem nichtlinearen Verlauf, wobei jüngere Pferde die stärkste Winkelabnahme aufweisen und die Steigung der Kurve mit zunehmendem Alter abflacht. Dies weist darauf hin, dass sich die Winkelabnahme einem Endwert annähern dürfte (mittlerer Variationskoeffizient der Approximationen = 4.8%). Die O3er weisen global betrachtet die stärkste Abnahme auf, $P < 0.0001$. Die beobachteten alters- und zahnpositionsabhängige Winkelunterschiede spiegeln sich im Auftreten erster Anzeichen und im Progressivitätsmuster der EOTRH wider. Der biomechanische Einfluss der Winkelalterationen sollte demnach bei ätiopathologischen Überlegungen zur EOTRH berücksichtigt werden. Cephalometrische Anwendungen auf Basis computertomografischer Daten dürften in der Pferde Zahnheilkunde in Zukunft für Messungen interdentaler oder dentofazialer Winkel sowie für die Messung von Malokklusionen eine zunehmend wichtigere Rolle spielen und gleichsam zum besseren Verständnis der Ätiologien dentaler und maxillofazialer Pathologien beitragen.

6 Summary

In humans, naturally occurring or applied orthodontic forces can cause excessive periodontal stress, which in turn may lead to alveolar bone loss or apposition and root resorption. Equine Odontoclastic Tooth Resorption and Hypercementosis (EOTRH), an incisal periodontopathy in the horse, shows similar alterations. It is well known that the horse's hypsodont incisors are subjected to continuous morphometric changes and periodontal remodeling processes and that changes in the age-dependent periodontal force distribution follow a spatial pattern similar to the appearance of the first radiological signs in EOTRH. In this regard the age-related variability of interincisal angulation (IIA) is attributed an important pathoetiological role. However, previous studies generalize one angle for all tooth positions. Methodological standards or metric data are largely missing. The aim of this study is to provide an overview of the technical basics and the area of application of a standardized conventional CT examination of the head with multislice detector systems on the standing sedated horse and to give an overview of the radiological appearance of normal oromaxillofacial structures and pathologies, and also to establish a validated CT-based cephalometric approach to determine the age- and tooth position-dependent IIA of clinical crowns. The mini-review article combines empirical values and retrospective data from CT examinations on standing sedated horses exclusively. For the cephalometric measurements of the IIA of clinical crowns, CT-based multiplanar thick-slab reconstructions from individual incisors of 48 horses without incisor changes (2 - 20 years; 8.8 ± 4.6 years) were used, considering a global reference frame. The IIA was defined as the angle between the respective labial axes of opposing incisor clinical crowns. The reconstructions of labial axes followed a standardized protocol based on certain dentoalveolar landmarks. In addition to a measurement repeatability analysis, the newly established method (labial axes) was compared with a cephalometrically implemented reference method, that considers the lingual/ palatal surface of the O3s clinical crowns and is originally based on lateral profile photographs. The permanent incisors were used to determine the age-dependent angular course and potential tooth position-dependent differences.

It has been shown that CT of the head on standing sedated horses is an adequate method for standardized cephalometric measurements. Both the technical setup and the possibility of standardized positioning of the head implement the applicability of CT studies for

cephalometric applications even under usual clinical conditions. In this study, for the first time, the angulation of the clinical crowns of opposing incisors could be determined under methodically standardized conditions and separately for all tooth positions. Globally for all incisor positions, the repeatability of the angle measurements was very high when using reconstructions of the labial axes of clinical crowns based on defined dentoalveolar landmarks (mean coefficient of variation = 0.65%; mean SD \pm 0.89°). Compared to the IIA measurements of reconstructed labial axes of the O3s, the mean dispersion of repeat measurements for the reference method was on average twice as high, $P = 0.017$. The observed age-dependent angle decrease follows a nonlinear course, with younger horses showing the greatest decrease and the slope of the curve flattening with increasing age. This indicates that the IIA might approach an end value in older horses (mean coefficient of variation of approximations = 4.8%). Globally, the O3s show the largest decrease, $P < 0.0001$. The observed age- and tooth position-dependent angle differences are reflected in the appearance of the first signs and in the progressivity pattern of EOTRH. The biomechanical influence of angular alterations should therefore be taken into account for etiopathological considerations of EOTRH. Cephalometric applications based on computed tomographic data are likely to play an increasingly important role in future in equine dentistry and maxillofacial surgery for measurements of interdental or dentofacial angles, dental malocclusions as well as craniofacial asymmetries, and at the same time may contribute to a better understanding of the etiologies of several dental and maxillofacial pathologies.

7 Literaturverzeichnis

- Ahn, H.-W., Moon, S.C., Baek, S.-H., 2013. Morphometric evaluation of changes in the alveolar bone and roots of the maxillary anterior teeth before and after en masse retraction using cone-beam computed tomography. *The Angle Orthodontist* 83, 212–221, <https://doi.org/10.2319/041812-325.1>.
- Alhashimi, N., Frithiof, L., Brudvik, P., Bakhiet, M., 2001. Orthodontic tooth movement and de novo synthesis of proinflammatory cytokines. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 119, 307–312, <https://doi.org/10.1067/mod.2001.110809>.
- Alves, P.V.M., Bolognese, A.M., Zhao, L., 2007. Three-Dimensional Computerized Orthognathic Surgical Treatment Planning. *Clinics in Plastic Surgery* 34, 427–436 <https://doi.org/10.1016/j.cps.2007.04.006>.
- Arnbjerg, J., 2014. Generalized Hypercementosis in Geriatric Horses. *Journal of Veterinary Dentistry* 31, 153–159, <https://doi.org/10.1177/089875641403100302>.
- Baker, G.J., 1970. Some Aspects of Equine Dental Disease. *Equine Veterinary Journal* 2, 105–110, <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1970.tb04168.x>.
- Barakzai, S.Z., Barnett, T.P., 2015. Computed tomography and scintigraphy for evaluation of dental disease in the horse. *Equine Veterinary Education* 27, 323–331, <https://doi.org/10.1111/eve.12288>.
- Barratt, R.M., 2007. Equine incisor resorptive lesions. In *Proceedings, 21st Annual Veterinary Dental Forum*, Minneapolis, US, 123–130.
- Bergersen, E.O., 1980. Enlargement and distortion in cephalometric radiography: compensation tables for linear measurements. *The Angle Orthodontist* 50, 230–244, [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1980\)050%3C0230:EADICR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1980)050%3C0230:EADICR%3E2.0.CO;2).
- Binder, Y., 2014. Current insight on incidence, diagnosis and treatment of EOTRH in literature and clinical investigation. Dissertation, huveta, HU, <http://www.huveta.hu/handle/10832/1071>, Accessed March 06, 2020
- Bregger, M.D.K., Koch, C., Zimmermann, R., Sangiorgio, D., Schweizer-Gorgas, D., 2019. Cone-beam computed tomography of the head in standing equids. *BMC Veterinary Research* 15, 289, <https://doi.org/10.1186/s12917-019-2045-z>.
- Bushell, R., Murray, J., 2016. A survey of senior equine management: Owner practices and confidence. *Livestock Science* 186, 69–77, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.04.024>.
- Caldwell, L., 2007. Clinical features of chronic disease of the anterior dentition in horses. In *Proceedings, 21st Annual Veterinary Dental Forum*, Minneapolis, US, 18–21.
- Carlos Quintero, J., Trosien, A., Hatcher, D., Kapila, S., 1999. Craniofacial imaging in orthodontics: historical perspective, current status, and future developments. *The Angle Orthodontist* 69, 491–506, [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1999\)069%3C0491:CIIOHP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1999)069%3C0491:CIIOHP%3E2.3.CO;2).
- Carmalt, J., Townsend, H., Allen, A., 2003. Effect of dental floating on the rostrocaudal mobility of the mandible of horses. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 223, 666–669, <https://doi.org/10.2460/javma.2003.223.666>.
- Clarke, K.W., Paton, B.S., 1988. Combined use of detomidine with opiates in the horse.

Equine Veterinary Journal 20, 331–334, <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1988.tb01540.x>.

Dakin, S.G., Lam, R., Rees, E., Mumby, C., West, C., Weller, R., 2014. Technical set-up and radiation exposure for standing computed tomography of the equine head. *Equine Veterinary Education* 26, 208–215, <https://doi.org/10.1111/eve.12127>.

Davies, T., Skelly, C., Puggioni, A., D’Helft, C., Connolly, S., Hoey, S., 2020. Standing CT of the equine head: Reducing radiation dose maintains image quality. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 61, 137–146, <https://doi.org/10.1111/vru.12823>.

Diercke, K., Kohl, A., Lux, C.J., Erber, R., 2012. IL-1 β and compressive forces lead to a significant induction of RANKL-expression in primary human cementoblasts. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie* 73, 397–412, <https://doi.org/10.1007/s00056-012-0095-y>.

Dixon, P.M., du Toit, N., Dacre, I.T., 2011. Equine dental pathology. In Easley, J., Dixon, P.M., Schumacher, J., editor(s). *Equine Dentistry*. Saunders Elsevier, Edinburgh, 129–147.

Dixon, P.M., du Toit, N., 2011. Dental Anatomy. In Easley, J., Dixon, P.M., Schumacher, J., editor(s). *Equine dentistry*. Saunders Elsevier, Edinburgh, 51–76

Domanska-Kruppa, N., Venner, M., Bienert-Zeit, A., 2019. Cephalometric Study of the Overjet Development in Warmblood Foals. *Frontiers in Veterinary Science* 6, 431, <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00431/full>.

Earley, E., Rawlinson, J.T., 2013. A New Understanding of Oral and Dental Disorders of the Equine Incisor and Canine Teeth. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 29, 273–300, <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2013.04.011>.

England, G.C.W., Clarke, K.W., 1996. Alpha2 adrenoceptor agonists in the horse—A review. *British Veterinary Journal* 152, 641–657, [https://doi.org/10.1016/S0007-1935\(96\)80118-7](https://doi.org/10.1016/S0007-1935(96)80118-7).

Fujita, T., Alotaibi, M., Kitase, Y., Kota, Y., Ouhara, K., Kurihara, H., Shuler, C.F., 2012. Smad2 is involved in the apoptosis of murine gingival junctional epithelium associated with inhibition of Bcl-2. *Archives of Oral Biology* 57, 1567–1573, <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2012.08.011>.

Fujita, T., Yoshimoto, T., Kajiya, M., Ouhara, K., Matsuda, S., Takemura, T., Akutagawa, K., Takeda, K., Mizuno, N., Kurihara, H., 2018. Regulation of defensive function on gingival epithelial cells can prevent periodontal disease. *Japanese Dental Science Review* 54, 66–75, <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2017.11.003>.

Fuss, Z., Tsesis, I., Lin, S., 2003. Root resorption - diagnosis, classification and treatment choices based on stimulation factors. *Dental Traumatology* 19, 175–182, <https://doi.org/10.1034/j.1600-9657.2003.00192.x>.

Gateno, J., Xia, J.J., Teichgraeber, J.F., 2011. New 3-dimensional cephalometric analysis for orthognathic surgery. *Journal of oral and maxillofacial surgery* 69, 606–22, <https://doi.org/10.1016/j.joms.2010.09.010>.

Gregory, R., Fehr, J., Bryant, J., 2006. Chronic incisor periodontal disease with cemental hyperplasia and hypoplasia in horses. In *Proceedings, American Association of Equine Practitioners (AAEP) Focus on Dentistry Meeting*, Indianapolis, US, 312–316.

Habermehl, K.-H., 1975. *Die Altersbestimmung bei Haus- und Labortieren*. Paul Parey, Berlin

und Hamburg.

Habermehl, K.H., 1981. Wie sicher ist die Altersbestimmung beim Pferd? *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift* 94, 167–171.

Harris, E.F., Robinson, Q.C., Woods, M.A., 1993. An analysis of causes of apical root resorption in patients not treated orthodontically. *Quintessence International* 24, 417–428, [https://doi.org/10.1016/S0889-5406\(05\)80450-0](https://doi.org/10.1016/S0889-5406(05)80450-0).

Henry, T.J., Puchalski, S.M., Arzi, B., Kass, P.H., Verstraete, F.J.M., 2017. Radiographic evaluation in clinical practice of the types and stage of incisor tooth resorption and hypercementosis in horses. *Equine Veterinary Journal* 49, 486–492, <https://doi.org/10.1111/evj.12650>.

Herold, I., Schlemper, H., Simon, T., 2008. Praxisleitfaden der Zahn- und Kiefererkrankungen des Pferdes. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Hole, S.L., Staszuk, C., 2018. Equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. *Equine Veterinary Education* 30, 386–391, <https://doi.org/10.1111/eve.12603>.

Ireland, J.L., Clegg, P.D., McGowan, C.M., McKane, S.A., Pinchbeck, G.L., 2011. A cross-sectional study of geriatric horses in the United Kingdom. Part 1: Demographics and management practices. *Equine Veterinary Journal* 43, 30–36, <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00145.x>.

Ireland, J.L., McGowan, C.M., Clegg, P.D., Chandler, K.J., Pinchbeck, G.L., 2012. A survey of health care and disease in geriatric horses aged 30 years or older. *The Veterinary Journal* 192, 57–64, <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2011.03.021>.

Jarvis, N., Paradis, M.R., Harris, P., 2019. Nutrition considerations for the aged horse. *Equine Veterinary Education* 31, 102–110, <https://doi.org/10.1111/eve.12749>.

Jeffrey, D., 1996. Horse Dentistry: The Theory and Practice of Equine Dental Maintenance. 1st ed., World Wide Equine, US.

Jodeh, D.S., Kuykendall, L. V., Ford, J.M., Ruso, S., Decker, S.J., Rottgers, S.A., 2019. Adding Depth to Cephalometric Analysis: Comparing Two- and Three-Dimensional Angular Cephalometric Measurements. *Journal of Craniofacial Surgery* 30, 1568–1571, <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000005555>.

Karatas, O.H., Toy, E., 2014. Three-dimensional imaging techniques: A literature review. *European Journal of Dentistry* 08, 132–140, <https://doi.org/10.4103/1305-7456.126269>.

Kennedy, R., Lappin, D.F., Dixon, P.M., Bennett, D., Riggio, M.P., 2017. Gingival Toll-like receptor and cytokine messenger RNA levels in equine periodontitis and oral health. *Equine Veterinary Journal* 49, 294–299, <http://doi.org/10.1111/evj.12597>.

Kennedy, R.S., Dixon, P.M., 2018. The aetiopathogenesis of equine periodontal disease – a fresh perspective. *Equine Veterinary Education* 30, 161–168, <https://doi.org/10.1111/eve.12563>.

Klugh, D., 2010. Anatomical Characteristics of Equine Dentition. In Klugh, D., editor, Principles of equine dentistry. CRC Press, Florida, 27–48

Klugh, D.O., 2005. Equine Periodontal Disease. *Clinical Techniques in Equine Practice* 4, 135–147, <https://doi.org/10.1053/j.ctep.2005.04.005>.

Knych, H.K., Casbeer, H.C., McKemie, D.S., Arthur, R.M., 2013. Pharmacokinetics and

pharmacodynamics of butorphanol following intravenous administration to the horse. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics* 36, 21–30, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2885.2012.01385.x>.

Kunz, J.R., Granella, M.C.S., Mendes, R.P., Müller, T.R., Kau, S., Fonteque, J.H., 2020. High prevalence of orodontal disorders in South Brazilian cart horses: Walking a tightrope between animal welfare and socio-economic inevitability. *Journal of Veterinary Dentistry*, accepted for publication 2019.

Li, N., Hu, B., Mi, F., Song, J., 2017. Preliminary evaluation of cone beam computed tomography in three-dimensional cephalometry for clinical application. *Experimental and Therapeutic Medicine* 13, 2451–2455, <https://doi.org/10.3892/etm.2017.4278>.

Lisboa, C. de O., Masterson, D., Motta, A.F.J., Motta, A.T., 2015. Reliability and reproducibility of three-dimensional cephalometric landmarks using CBCT: a systematic review. *Journal of Applied Oral Science* 23, 112–119, <https://doi.org/10.1590/1678-775720140336>.

Listmann, L., Schrock, P., Failing, K., Staszuk, C., 2017. Occlusal Angles of Equine Incisors. *Journal of Veterinary Dentistry* 34, 259–267, <https://doi.org/10.1177/0898756417739465>.

Loch, W.E., Bradley, M., 1998. Determining Age of Horses by Their Teeth. Extension Publications (MU), <https://hdl.handle.net/10355/4028>, Accessed January 14, 2020.

Lorello, O., Foster, D.L., Levine, D.G., Boyle, A., Engiles, J., Orsini, J.A., 2016. Clinical treatment and prognosis of equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. *Equine Veterinary Journal* 48, 188–194, <https://doi.org/10.1111/evj.12406>.

Lou, L., Lagravere, M.O., Compton, S., Major, P.W., Flores-Mir, C., 2007. Accuracy of measurements and reliability of landmark identification with computed tomography (CT) techniques in the maxillofacial area: a systematic review. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 104, 402–411, <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2006.07.015>.

Manso-Díaz, G., Taeymans, O., García-López, J.M., Weller, R., 2019. Application and indications of magnetic resonance imaging and computed tomography of the equine head. *Equine Veterinary Education*, <https://doi.org/10.1111/eve.13075>.

Martin, Michael T, Martin, Matthew T, Scrutchfield, W.L., Joyce, J.R., 1999. A Systematic Approach to Estimating the Age of a Horse. In Proceedings, *American Association of Equine Practitioners (AAEP) Focus on Dentistry Meeting*, Lexington, 45, 273–275.

Masella, R.S., Meister, M., 2006. Current concepts in the biology of orthodontic tooth movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 129, 458–468, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2005.12.013>.

McMullan, W.C., 1983. Dental criteria for estimating age in the horse. *Equine Practice* 5, 36–43, <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US19840112330>. Accessed January 9, 2020.

Mill, J., 2006. Altersbestimmung. In Dietz, O., editor. *Handbuch Pferdepraxis*. Thieme Verlag, 10–13.

Moore, N.T., Schroeder, W., Staszuk, C., 2016. Equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis affecting all cheek teeth in two horses: Clinical and histopathological findings. *Equine Veterinary Education* 28, 123–130, <http://doi.org/10.1111/eve.12387>.

- Muyllé, S., 2011. Ageing. In Easley, J., Dixon, P.M., Schumacher, J., editor(s). *Equine Dentistry*. Saunders Elsevier, Edinburgh, 85–96.
- Muyllé, S., Simoens, P., Lauwers, H., 1996. Ageing horses by an examination of their incisor teeth: an (im)possible task? *Veterinary Record* 138, 295–301, <https://doi.org/10.1136/vr.138.13.295>.
- Muyllé, S., Simoens, P., Lauwers, H., 1999. Age-related Morphometry of Equine Incisors. *Journal of Veterinary Medicine Series A* 46, 633–643, <https://doi.org/10.1046/j.1439-0442.1999.00261.x>.
- Muyllé, S., Simoens, P., Lauwers, H., van Loon, G., 1997. Ageing draft and trotter horses by their dentition. *Veterinary Record* 141, 17–20, <https://doi.org/10.1136/vr.141.1.17>.
- Muyllé, S., Simoens, P., Lauwers, H., van Loon, G., 1998. Ageing Arab horses by their dentition. *The Veterinary record* 142, 659–62, <https://doi.org/10.1136/vr.142.24.659>.
- Muyllé, S., Simoens, P., Lauwers, H., van Loon, G., 1999. Age Determination in Mini-Shetland Ponies and Donkeys. *Journal of Veterinary Medicine Series A* 46, 421–429, <https://doi.org/10.1046/j.1439-0442.1999.00229.x>.
- Nalçacı, R., Öztürk, F., Sökücü, O., 2010. A comparison of two-dimensional radiography and three-dimensional computed tomography in angular cephalometric measurements. *Dentomaxillofacial Radiology* 39, 100–106, <https://doi.org/10.1259/dmfr/82724776>.
- Nicholls, V.M., Townsend, N., 2016. Dental Disease in Aged Horses and Its Management. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 32, 215–227, <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2016.04.002>.
- Nociti, F.H., Foster, B.L., Barros, S.P., Darveau, R.P., Somerman, M.J., 2004. Cementoblast Gene Expression is Regulated by *Porphyromonas gingivalis* Lipopolysaccharide Partially via Toll-like Receptor-4/MD-2. *Journal of Dental Research* 83, 602–607, <https://doi.org/10.1177/154405910408300804>.
- Pauwels, R., 2018. What Is CBCT and How Does It Work? In Scarfe, W.C., Angelopoulos, C., editors. *Maxillofacial Cone Beam Computed Tomography*. Springer International Publishing, Cham. 13–42.
- Pearson, A.M., Mansfield, G., Conaway, M., Koput, K., 2013. Associated Risk Factors of Equine Odontoclastic Tooth Resorption and Hypercementosis. In *Proceedings, American Association of Equine Practitioners (AAEP) Focus on Dentistry Meeting, Tennessee*, 59, 65–70.
- Pittayapat, P., Limchaichana-Bolstad, N., Willems, G., Jacobs, R., 2014. Three-dimensional cephalometric analysis in orthodontics: a systematic review. *Orthodontics & Craniofacial Research* 17, 69–91, <https://doi.org/10.1111/ocr.12034>.
- Rahmani, V., Häyrinen, L., Kareinen, I., Ruohoniemi, M., 2019. History, clinical findings and outcome of horses with radiographical signs of equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. *Veterinary Record* 185, 730–730, <https://doi.org/10.1136/vr.105253>.
- Rego, E.B., Inubushi, T., Kawazoe, A., Miyauchi, M., Tanaka, E., Takata, T., Tanne, K., 2011. Effect of PGE2 induced by compressive and tensile stresses on cementoblast differentiation in vitro. *Archives of Oral Biology* 56, 1238–1246, <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2011.05.007>.
- Rehrl, S., Schröder, W., Müller, C., Staszyc, C., Lischer, C., 2018. Radiological prevalence of

- equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. Radiological prevalence of equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. *Equine Veterinary Journal* 50, 481–487, <https://doi.org/10.1111/evj.12776>.
- Reiter, A.M., Lewis, J.R., Okuda, A., 2005. Update on the etiology of tooth resorption in domestic cats. *The Veterinary Clinics of North America. Small animal practice* 35, 913–942, <https://doi.org/10.1016/j.cvs.2005.03.006>.
- Richardson, J., 1997. Ageing horses - an illustrated guide. *In Practice* 19, 486–489, <https://doi.org/10.1136/inpract.19.9.486>.
- Richardson, J., Cripps, P., Lane, J.G., 1995. An evaluation of the accuracy of ageing horses by their dentition: changes of dental morphology with age. *Veterinary Record* 137, 117–121, <https://doi.org/10.1136/vr.137.5.117>.
- Rudolph, C.E., 1936. A Comparative Study in Root Resorption in Permanent Teeth. *The Journal of the American Dental Association* 23, 822–826, <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1936.0381>.
- Schatzmann, U., Armbruster, S., Stucki, F., Busato, A., Kohler, I., 2001. Analgesic Effect of Butorphanol and Levomethadone in Detomidine Sedated Horses. *Journal of Veterinary Medicine Series A* 48, 337–342, <https://doi.org/10.1046/j.1439-0442.2001.00366.x>.
- Schrock, P., Lüpke, M., Seifert, H., Staszuk, C., 2013a. Finite element analysis of equine incisor teeth. Part 2: Investigation of stresses and strain energy densities in the periodontal ligament and surrounding bone during tooth movement. *The Veterinary Journal* 198, 590–598, <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.10.010>.
- Schrock, P., Lüpke, M., Seifert, H., Staszuk, C., 2013b. Three-dimensional anatomy of equine incisors: tooth length, enamel cover and age related changes. *BMC Veterinary Research* 9, 249, <https://doi.org/10.1186/1746-6148-9-249>.
- Schulze, R., Heil, U., Gross, D., Bruellmann, D.D., Dranischnikow, E., Schwanecke, U., Schoemer, E., 2011. Artefacts in CBCT: a review. *Dento maxillo facial radiology* 40, 265–273 <https://doi.org/10.1259/dmfr/30642039>.
- Sellon, D.C., Monroe, V.L., Roberts, M.C., Papich, M.G., 2001. Pharmacokinetics and adverse effects of butorphanol administered by single intravenous injection or continuous intravenous infusion in horses. *American Journal of Veterinary Research* 62, 183–189, <https://doi.org/10.2460/ajvr.2001.62.183>.
- Smedley, R.C., Earley, E.T., Galloway, S.S., Baratt, R.M., Rawlinson, J.E., 2015. Equine Odontoclastic Tooth Resorption and Hypercementosis: Histopathologic Features. *Veterinary Pathology* 52, 903–909, <https://doi.org/10.1177/0300985815588608>.
- Staszuk, C., 2011. Anatomie. In Vogt, C., editor. *Lehrbuch der Zahnheilkunde beim Pferd*. Schattauer, Stuttgart, 1–30.
- Staszuk, C., 2015. Zähne und Gebiss des Pferdes - Eine klinisch-anatomische Übersicht. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere - Nutztiere* 43, 375–386, <https://doi.org/10.15653/TPG-150822>.
- Staszuk, C., Bienert, A., Kreutzer, R., Wohlsein, P., Simhofer, H., 2008. Equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis. *The Veterinary Journal* 178, 372–379, <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2008.09.017>.

- Staszyk, C, Lehmann, F., Bienert, A., Ludwig, K., Gasse, H., 2006. Measurements of masticatory forces in the horse. *Pferdeheilkunde Equine Medicine* 22, 12–16, <https://doi.org/10.21836/PEM20060102>.
- Staszyk, C., Suske, A., Pöschke, A., 2015. Equine dental and periodontal anatomy: A tutorial review. *Equine Veterinary Education* 27, 474–481, <https://doi.org/10.1111/eve.12317>.
- Staszyk, Carsten, Wulff, W., Jacob, H.-G., Gasse, H., 2006. Collagen Fiber Architecture of the Periodontal Ligament in Equine Cheek Teeth. *Journal of Veterinary Dentistry* 23, 143–147, <https://doi.org/10.1177/089875640602300303>.
- Steinfurt, S., Röcken, M., Vogelsberg, J., Failing, K., Staszyk, C., 2019. The Equine Gingiva: A Histological Evaluation. *Frontiers in Veterinary Science* 6, 435, <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00435>.
- Sykora, S., Pieber, K., Simhofer, H., Hackl, V., Brodesser, D., Brandt, S., 2014. Isolation of *Treponema* and *Tannerella* spp. from equine odontoclastic tooth resorption and hypercementosis related periodontal disease. *Equine Veterinary Journal* 46, 358–363, <https://doi.org/10.1111/evj.12115>.
- du Toit, N., Rucker, B.A., 2013. The Gold Standard of Dental Care. The Geriatric Horse. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 29, 521–527, <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2013.04.002>.
- Tweed, C.H., 1946. The frankfort-mandibular plane angle in orthodontic diagnosis, classification, treatment planning, and prognosis. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery* 32, 175–230, [https://doi.org/10.1016/0096-6347\(46\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0096-6347(46)90001-4).
- De Vos, W., Casselman, J., Swennen, G.R.J., 2009. Cone-beam computerized tomography (CBCT) imaging of the oral and maxillofacial region: A systematic review of the literature. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 38, 609–625, <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2009.02.028>.
- Walker, H., Chinn, E., Holmes, S., Barwise-Munro, L., Robertson, V., Mould, R., Bradley, S., Shaw, D.J., Dixon, P.M., 2012. Prevalence and some clinical characteristics of equine cheek teeth diastemata in 471 horses examined in a UK first-opinion equine practice (2008 to 2009). *Veterinary Record* 171, 44–44, <https://doi.org/10.1136/vr.100829>.
- Warhonowicz, M., Staszyk, C., Rohn, K., Gasse, H., 2006. The equine periodontium as a continuously remodeling system: Morphometrical analysis of cell proliferation. *Archives of Oral Biology* 51, 1141–1149, <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2006.05.013>.
- Zhou, J., Zhao, Y., Xia, C., Jiang, L., 2012. Periodontitis with hypercementosis: report of a case and discussion of possible aetiologic factors. *Australian Dental Journal* 57, 511–514, <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2012.01725.x>.

8 Publikationsverzeichnis

Ergebnisse dieser Dissertation wurden in einer international anerkannten Fachzeitschrift mit Gutachtersystem (peer review) zur Veröffentlichung angenommen:

Frontiers in Veterinary Science (akzeptiert am 16.06.2020)

Computed tomography (CT)-assisted 3D cephalometry in horses: interincisal angulation of clinical crowns

S. Kau, K. Failing, C. Staszuk

DOI: 10.3389/fvets.2020.00434

Volume 7, July 2020, Article

Ergebnisse dieser Dissertation wurden nach Begutachtung (peer review) und Anerkennung durch die Akademie für tierärztliche Fortbildung (ATF) in folgender Fachzeitschrift für „Continuing Veterinary Education“ zur Veröffentlichung angenommen:

Pferdespiegel (akzeptiert am 21.11.2018)

Computertomografie in der Pferde Zahnheilkunde – ein Überblick

S. Strauch, J. Schwarzer, S. Kau

DOI: 10.1055/a-0671-8580

Volume 22, Issue 01, Seiten 23-36

Teilergebnisse dieser Dissertation wurden auf folgendem Fachkongress präsentiert:

3D cephalometry in the horse – Angulation of opposing incisors

18. IGFP-Kongress, Niedernhausen, 06.-07. März 2020

(ISBN: 978-3-00-061407-1)

9 Erklärung

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

Gießen, den 06.08.2020

Mag. Silvio Kau

10 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen Personen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation und auf dem Weg dorthin so unermüdlich unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr. Carsten Staszky, Justus-Liebig-Universität Gießen. Danke für Deinen unermüdlichen Einsatz und das enorme Engagement bei der Planung und Umsetzung der gesamten Arbeit. Deine überlegte Art sich Fragestellungen anzunähern und Konstruktivität haben mich sehr inspiriert. Ich danke Dir für die zahlreichen motivierenden Dialoge und freue mich auf weitere gemeinsame Projekte.

Einen nicht unwesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten Dr. Julia Schwarzer, Dr. Saskia Strauch und Dr. Timo Zwick, Tierärztliche Klinik Gessertshausen. Danke für die außerordentlich lehrreiche Zeit in der ich Euch als Kollege begleiten durfte sowie für die umfangreiche Bereitstellung computertomografischer Daten und Euer aller technischer und zahnmedizinischer Expertise.

Des Weiteren möchte ich Dr. Dipl.-Math. Klaus Failing und Team, Justus-Liebig-Universität Gießen, für Ihren unverzichtbaren Beitrag zu Studiendesign und Datenanalyse herzlichst danken. Trotz der großen Distanz, Wien – Gießen, klappte der Austausch hervorragend.

Für die freundliche finanzielle Unterstützung eines Forschungsaufenthaltes in Gießen will ich meinem derzeitigen Arbeitgeber, der Veterinärmedizinischen Universität Wien, danken.

Nicht zuletzt gilt der Dank meiner Familie und der Familie meiner Freundin, die mich auf allen Wegen bedingungslos unterstützen und mir mit unbändigem Idealismus die Kraft geben, gesteckte Ziele und Träume konsequent weiterzuverfolgen. Danke Mama und Freddy, Papa und Silke, Sandro und Nini, Maja, Opa und Omas, Christa und Christian.

Der größte Dank gehört jedoch meinem Piepsi, Katharina. Du warst es die mit Ihrem aufopferungsvollen Verständnis für die lange Zeit in Deutschland das Zustandekommen dieser Arbeit erst möglich gemacht hat. Darum sollen auch Dir die letzten Worte gewidmet sein. Danke dass Du stets an mich glaubst und mich mit Deinem Frohmut und Deiner Heiterkeit durch so manche Situationen trägst. Danke dass Du da bist.