

Vermessung der Zahnwurzeloberfläche beim  
Hund mit Hilfe der Computertomographie zur  
Dimensionierung der kieferorthopädisch  
anzuwendenden Kräfte

---

**Jakob Frieder Reufels**



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



*édition scientifique*  
**VVB LAUFERSWEILER VERLAG**

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

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

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

1. Auflage 2014

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

1<sup>st</sup> Edition 2014

© 2014 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen  
Printed in Germany



*édition linguistique*  
**VVB LAUFERSWEILER VERLAG**

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

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

Aus dem Klinikum Veterinärmedizin  
Klinik für Kleintiere, Chirurgie  
der Justus-Liebig-Universität Gießen  
Betreuer: Prof. Dr. Dr. h.c. Martin Kramer

**Vermessung der Zahnwurzeloberfläche beim Hund mit Hilfe der Computertomographie  
zur Dimensionierung der kieferorthopädisch anzuwendenden Kräfte**

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

eingereicht von

**Jakob Frieder Reufels**  
Tierarzt aus Santiago de Compostela

**Gießen 2014**

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

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

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

Prof. Dr. Carsten Staszuk

Tag der Disputation: 21. Februar 2014

**Meinen Eltern und meiner wunderbaren Frau**



## **Inhaltsverzeichnis**

Verzeichnis der Abbildungen .....	III
Verzeichnis der Tabellen .....	IV
Verzeichnis der Abkürzungen .....	V
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
2 Literaturübersicht.....	3
2.1 Zahnanatomie und -embryologie .....	3
2.1.1 Zahnanatomie .....	3
2.1.2 Zahnembryologie.....	6
2.1.3 Zahnnomenklatur.....	8
2.2 Zahnwurzelmessungen .....	9
2.2.1 Zahnwurzelmessungen in der Humanmedizin .....	9
2.2.2 Zahnwurzelmessungen in der Veterinärmedizin .....	11
2.3 Zahnverhältnisse .....	13
2.4 Kieferorthopädische Grundlagen .....	16
2.4.1 Biologische Grundlagen der Zahnbewegung .....	16
2.4.2 Kieferorthopädische Kräfte .....	17
2.4.3 Kieferorthopädische Behandlungen in der Veterinärmedizin.....	19
2.5 Computertomographie .....	22
2.5.1 Physikalische Grundprinzipien.....	22
3 Material und Methode.....	25
3.1 Probanden.....	25
3.1.1 Anästhesie.....	28
3.1.2 Lagerungstechnik .....	28
3.2 Geräte, Scanprotokoll und Vermessung .....	29
3.3 Datenverarbeitung .....	35
3.4 Statistische Methoden .....	37

3.4.1 Datenanalyse .....	37
3.5 Fehlerberechnung .....	39
3.5.1 Fehler der Vermessungsmethode.....	39
3.5.2 Fehler der Umrechnungsmethode .....	39
4 Ergebnisse .....	41
4.1 Studienergebnisse.....	41
4.2 Fehlerberechnungsergebnisse .....	47
4.2.1 Fehler der Vermessungsmethode.....	47
4.2.2 Fehler der Berechnungsmethode .....	48
5 Diskussion.....	49
5.1 Diskussion der eigenen Methodik .....	49
5.1.1 Vermessungstechnik .....	49
5.1.2 Limitationen der eigenen Untersuchung .....	50
5.1.3 Fehlerberechnung .....	50
5.2 Ergebnisinterpretation .....	51
5.2.1 Rasseverteilung.....	51
5.2.2 Altersverteilung.....	52
5.2.3 Geschlechterverteilung.....	52
5.2.4 Zahnwurzeloberflächen .....	53
6 Zusammenfassung.....	61
7 Summary.....	63
8 Literaturverzeichnis .....	65
Erklärung.....	73
Danksagung .....	75
Anhang.....	77
Anhang 1. Kieferorthopädische Behandlungsempfehlung .....	77
Anhang 2. Ergebnisse der Zahnvermessung.....	80
Anhang 3. Ergebnisse der statistischen Analyse .....	90
Anhang 4. Auszug aus dem erarbeiteten Arbeitsblatt .....	102

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Dehnschraubenbehandlung .....	20
Abbildung 2: Aufbisschiene mit zwei schiefene Ebenen.....	21
Abbildung 4: Alter der Probanden bei Durchführung der CT-Untersuchung.....	26
Abbildung 5: Rasseverteilung der Probanden.....	27
Abbildung 6: Darstellung der Lagerung eines Hundes während einer CT- Untersuchung.....	28
Abbildung 7: Spiral-CT Siemens Emotion.....	29
Abbildung 8 a-c: Positionierung der Ebenen.....	31
Abbildung 9 a & b: Darstellung der Kronenhöhenvermessung.....	32
Abbildung 10: Darstellung des Parodontalspaltes.....	32
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Schichten bei einer Zahnwurzelvermessung..	33
Abbildung 12: Darstellung der Vermessungsmethode .....	34
Abbildung 13: Mathematisches Modell zur Flächenberechnung .....	36
Abbildung 14: Regressionsfunktion zwischen Caninuskronenhöhe und Caninuszurzeloberfläche. ....	42
Abbildung 15: Regressionsfunktion zwischen Reißzahnkronenhöhe und Reißzahnwurzeloberfläche .....	43
Abbildung 16: Regressionsfunktion zwischen Caninuskronenhöhe und der Summe der Incisivenwurzeloberfläche .....	44
Abbildung 17: Regressionsfunktion zwischen Reißzahnkronenhöhe und der Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1 .....	45

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1. Zahnschema nach Triadan (nach Eickhoff, 2005) .....	8
Tabelle 2. Zahnwurzeloberfläche nach Gewichtsklassen in cm <sup>2</sup> .....	12
Tabelle 3. Wurzelquotient nach Staudacher (2009) .....	15
Tabelle 4. Zahnwechselalter (nach Wiggs & Lobprise, 1997) .....	19
Tabelle 5: Vergleich der Modelle mit- und ohne Kieferseparierung .....	41
Tabelle 6: Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse nach der REML-Methode. ....	46
Tabelle 7: Fehlerberechnung der Vermessungsmethode .....	47
Tabelle 8: Fehlerberechnung der Umrechnungsmethode .....	48
Tabelle 9: Gesamtübersicht zur Zahnwurzeloberflächenberechnung.....	79
Tabelle 10: Vermessungsergebnisse der 28 vermessenen Probanden .....	80

## Verzeichnis der Abkürzungen

3D	Dreidimensional
Abb.	Abbildung
ANOVA	Analysis of variance
C	Dens caninus
cm	Zentimeter
cm <sup>2</sup>	Quadratcentimeter
CT	Computertomographie
FDI	Fédération Dentaire Internationale
HU	Hounsfield Unit (computertomographische Einheit)
I1	erster Dens incisivus
I2	zweiter Dens incisivus
I3	dritter Dens incisivus
k.A.	keine Angabe
KM	Körpermasse
KFO	Kieferorthopädie
kg	Kilogramm
M1	erster Dens molaris
M2	zweiter Dens molaris
M3	dritter Dens molaris
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
N	Newton (physikalische Einheit)
Nr.	Nummer
P1	erster Dens prämolare
P2	zweiter Dens prämolare
P3	dritter Dens prämolare
P4	vierter Dens prämolare
REML	restricted maximum likelihood estimation (statistisches Verfahren)
R	Reißzahn
S	Seite
Tab.	Tabelle



### 1 Einleitung und Zielsetzung

#### 1.1 Einleitung

Ein funktionierendes Gebiss ist evolutionsbedingt für den Hund von enormer Wichtigkeit, da er mit dieser Nahrung erwirbt, aufnimmt und zerkleinert. Wie auch beim Menschen kommt es bei Hunden zunehmend zu pathologischen Zahn- oder Gebissstellungen. So entstehen den Tieren Schmerzen durch Einbisse fehlgestellter Zähne, es kommt zu Haltungsänderungen der Kiefer, und oftmals führt dies zu einer nicht physiologischen Nahrungsaufnahme.

Die Kieferorthopädie ist ein sich schnell entwickelndes Fachgebiet der Veterinärmedizin. In der praktischen Kieferorthopädie werden durch Einbringen von Ligaturen und Elastics, Drähten, Platten, selbsthärtendem Kunststoff, gegossenen Metallapparaturen oder anderen Materialien Kräfte auf die Zähne übertragen. Die Kraftübertragung hat das Ziel, fehlgestellte oder in anderer Art und Weise veränderte Zähne wieder in eine orthodontische oder zumindest funktionelle Position zu bringen. Eine solche kieferorthopädische Behandlung stellt immer einen großen Eingriff für den Patienten dar, bei welchem durch exakte Applikation von Zug- und Druckkräften gearbeitet wird, um die Zähne oder sogar den ganzen Kiefer, in ihrer Position zu verändern. Diese Kräfte werden vom Zahn direkt auf seine Verankerung weitergegeben, die Zahnwurzel mit Parodontium.

Die auf einen Zahn ohne Schädigung anwendbaren Kräfte hängen in großem Maß von der Zahnwurzeloberfläche ab. Je größer die Oberfläche der Zahnwurzel, desto umfangreicher ist die Verankerung im umgebenden Knochen und somit auch die Fixation des Zahnes in seiner Alveole durch das Parodontium. Wird über längere Zeit eine zu große Kraft angewandt, werden umliegende Parodontalgefäße zu stark komprimiert und zerstört. Dies führt zu einer lokalen Hypoxie mit anschließender Nekrose, was die Zerstörung und den Verlust des Zahnes bedeuten kann. Physikalisch gilt am Zahn das 3. Newtonsche Axiom,  $actio = reactio$ . Dies bedeutet, dass die auf einen Zahn einwirkende Kraft an einer anderen Stelle verankert werden muss, um diesen in seiner Position zu verändern. Auch hier ist die Fixierungsfläche des Verankerungspunktes von entscheidender Bedeutung. Da die Zahnwurzeloberfläche des caninen Gebisses weitestgehend unbekannt ist, werden kieferorthopädische Behandlungen so durchgeführt, dass die Anwendung der Kräfte meist auf Erfahrungswerten der Therapeuten unter Berücksichtigung aus der Humanmedizin übernommener Behandlungsschemata beruht.

### **1.2 Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit ist es, die Wurzeloberflächen des caninen Gebisses zu quantifizieren sowie eine Möglichkeit zu finden, diese für das Einzeltier nicht invasiv, möglichst einfach bestimmen zu können. Hierzu wird die Zahnwurzeloberfläche caniner Gebisse an computertomographischen Bildern vermessen. Zusätzlich werden im Fang befindliche und unter Praxisbedingungen leicht aufzufindende Parameter ins Verhältnis zur Zahnwurzeloberfläche gesetzt, damit praktizierende Tierärzte durch einfaches Vermessen einer bukkalen Struktur aus dieser die Zahnwurzeloberflächen berechnen können.

In dieser Studie soll die Größe der Zahnwurzeloberfläche jedes Zahnes bei Hunden erarbeitet werden. So haben veterinärmedizinische Kieferorthopäden eine Größe zur Hand, um die Kraft, welche auf einen bestimmten Zahn während einer Behandlung ohne Schaden für ihn einwirken darf, exakt planen und bemessen zu können. Hat man Kenntnis über die Größe der einzelnen Zahnwurzeln, kann man gezielt die anzuwendende Gesamtkraft auf mehrere Zähne so übertragen, dass die Kraftgrenze der einzelnen Zähne nicht überschritten wird und so hätte eine notwendige kieferorthopädische Zahnbehandlung eine bessere Prognose.

## **2 Literaturübersicht**

### **2.1 Zahnanatomie und -embryologie**

Der Zahn und das gesamte Gebiss sind maßgebliche Bestandteile dieser Studie. Eine grundlegende Beschreibung der einzelnen Zahnformen und deren Entstehung sind für das Verständnis der später dargestellten Zusammenhänge unentbehrlich.

#### **2.1.1 Zahnanatomie**

„Die Gesamtheit der Zähne bildet das Gebiss“ (König & Liebich, 2005). Hunde besitzen ein heterodontes Gebiss. Das bedeutet, dass die Zähne je nach Position im Gebiss und Gebrauch unterschiedlich geformt sind (König & Liebich, 2005). Trotz einer morphologischen Vielfalt weisen alle Zähne des Gebisses ein gemeinsames strukturelles Bauprinzip auf. Die Zähne bestehen aus drei mineralisierten Substanzen, dem Zahnschmelz (Enamelum), dem Dentin (Dentinum) und dem Zement (Cementum) (Thomé, 2004). Der Schmelz ist die härteste Substanz des Körpers und wird von den Adamantoblasten (Ameloblasten) gebildet. Es ist von rein weißer Farbe und kann sich nicht selbst regenerieren (Salomon et al., 2008). Je nach Anatomie des Schmelzes unterscheidet man schmelzhöckerige und schmelzfaltige Zähne (Thomé, 2004). Das Dentin ist von einer gelblich-weißen Farbe, bildet die Grundsubstanz des Zahnes und wird durch Odontoblasten produziert. Es ist härter als normales Knochengewebe, wird von Odontoblastenfortsätzen durchzogen und liegt sowohl dem Zement, als auch dem Schmelz von innen an (König & Liebich, 2005). Der Zement bildet den Überzug der im Zahnfach befindlichen Zahnwurzel. Er wird durch Zementoblasten produziert und schichtweise abgelagert (Thomé, 2004). Der Zement ist sehr resistent gegen Druckerosion, was eine vorteilhafte Eigenschaft für kieferorthopädische Behandlungen darstellt (König & Liebich, 2005).

Anatomisch werden am Zahn die Zahnkrone (Corona dentis), die Zahnwurzel (Radix dentis) und der Zahnhals (Collum oder Cervix dentis) unterschieden (Salomon et al., 2008). Als Zahnkrone wird der freistehende, in die Mundhöhle hineinragende Teil des Zahnes bezeichnet. Dieser tritt in Kontakt mit der Nahrung und zerkleinert diese. Die Zahnwurzel ist in den knöchernen Zahnfächern, den Alveolen, verankert und vollständig von Zahnfleisch, der Gingiva, umgeben. Zwischen Zahnkrone und Zahnwurzel ist, als kleine Einschnürung, der Zahnhals zu identifizieren (König & Liebich, 2005).

Im Zahninneren befindet sich die Zahnhöhle (Cavum dentis); diese ist von Dentin umschlossen. Die Zahnhöhle umschließt die Zahnpulpa, eine aus zartem Bindegewebe, Blutgefäßen und Nerven bestehende Struktur (Thomé, 2004). Die den Zahn versorgenden Nerven und Gefäße treten am Foramen apicale in den Zahn ein.

Fixiert werden die Zähne an der Zahnwurzel in den Alveolen der Maxilla und der Mandibula (Thomé, 2004). Die Alveolen ragen in den Ober- und Unterkieferaveolarfortsatz (Processus

## 2 Literaturübersicht

alveolaris). Der Processus alveolaris trägt die Alveolen und stellt die Verbindung zum knöchernen Skelett her.

Das Parodont (para, griech. = neben; odous, griech = Zahn) ist ein Zusammenspiel funktioneller Einheiten am Zahn und dient der Fixation des Zahnes in seiner physiologischen Position (Diedrich, 2000). Die Hauptaufgabe des Parodonts besteht darin, auf den Zahn einwirkende Drücke so zu verteilen, dass das spröde Zahnhartgewebe und die Zahnverankerung nicht überbelastet werden. Zum Parodont gehören das den Zahn umgebende Zahnfleisch, das Wurzelzement, das Desmodont und der Alveolarknochen (Diedrich, 2000). Das Wurzelzement bildet die Verankerung der Parodontalfasern; somit dient es als Basis der Verankerung des Zahnes in seiner Alveole (Eickhoff, 2005). Zwischen Wurzelzement und Alveolarknochen befindet sich der Parodontalspalt, welcher wiederum das Desmodont beherbergt (Eickhoff, 2005). Das Desmodont entspricht dem parodontalen Faserapparat (König & Liebich, 2005). Die Fasern bestehen aus Typ I Kollagen, aus Typ III Kollagen und aus säureresistenten Oxytalanfasern (Diedrich, 2000; Eickhoff, 2005). Ein Anteil dieser Fasern wird im Wurzelzement fixiert, man bezeichnet diese als Sharpeysche Fasern. Das Desmodont bildet ein Fasernetzwerk welches durch seine charakteristischen Eigenschaften wie eine Hängematte den Zahn vor Zug, Druck und Rotation in der Alveole sichern soll (Staudacher, 2009). Die Elastizität des Zahnhalteapparates ist allerdings nicht nur auf die Anatomie der Desmodontalfasern zurückzuführen, sie ist viel mehr durch die Nachgiebigkeit aller parodontalen Strukturen bedingt (Eickhoff, 2005).

Die Hauptfunktionen des Gebisses sind der Nahrungserwerb, die Nahrungsaufnahme sowie dessen Zerkleinerung. Diese Aufgaben werden zusammen mit den restlichen Anteilen des Kauapparates – dem Skelett des Ober- und Unterkiefers, den Kaumuskeln, den Lippen und der Zunge – ausgeführt (Thomé, 2004).

Durch die Zahnentwicklung bedingt gibt es eine unterschiedliche Anzahl an Milchzähnen und an permanenten Zähnen. Ein Milchzahnundegebiss besteht aus 28 Zähnen, und ein permanentes Hundegebiss aus 42 Zähnen (Salomon et al., 2008). Im bleibenden Gebiss unterscheidet man von der Medianen aus die Incisivi I1, I2 und I3; daran schließt sich der Dens caninus, C, an. Es folgen im Oberkiefer die Prämolaren P1, P2, P3, P4 und die Molaren M1, M2. Im Unterkiefer ist ein Molar mehr vorhanden, der M3 (Thomé, 2004). Am einfachsten werden diese Gegebenheiten mit Hilfe von Zahnformeln ausgedrückt.

Die Zahnformel der Milchzähne beim Hund lautet:

$$\frac{3I \ 1C \ 3P \ 0M}{3I \ 1C \ 3P \ 0M} = 28 \text{ Zähne}$$

Die permanente Zahnformel ist folgendermaßen aufgebaut

$$\frac{3I \ 1C \ 4P \ 2M}{3I \ 1C \ 4P \ 3M} = 42 \text{ Zähne}$$

(Thomé, 2004; Salomon et al., 2008).

## 2 Literaturübersicht

Der Caninus des Unterkiefers greift in das Diastema des Oberkiefers zwischen I3 und C. Man bezeichnet dieses Gebilde als die canine Trias. Der Oberkiefereckzahn greift bei Kieferschluss in den Raum zwischen C und P1 des Unterkiefers (Staudacher, 2009). Die Zähne des Ober- und Unterkiefers sind so zu einander versetzt, dass eine zickzackförmige, reißverschlussartige Verzahnung der Prämolaren und Molaren entsteht (Kramer, 2004). Der Caninus besitzt als Hauptbeutegreifzahn eine sehr mächtige Zahnwurzel. Diese reicht über die Wurzeln des ersten und zweiten Prämolaren hinweg (Nickel et. al, 2004). Analog dem Caninus sind die Incisiven und der erste Prämolare einwurzelig. Der zweite und dritte Prämolare im Ober- und Unterkiefer sind zweiwurzelig. Im Oberkiefer besitzen P4, M1 und M2 jeweils drei Zahnwurzeln, während im Unterkiefer P4, M1 und M2 zweiwurzelig sind und M3 einwurzelig ist. Der P4 des Oberkiefers und der M1 des Unterkiefers werden als „Reißzahn“ bezeichnet. Sie gleiten dicht aneinander vorbei, sodass eine Scherenwirkung entsteht. Die Reißzähne stehen unter unmittelbarem Einfluss der Kaumuskeln, dadurch wirken sehr große Kaukräfte auf sie ein (Thomé, 2004).

### 2.1.2 Zahnembryologie

In der individuellen Entwicklung eines Tieres werden zwei Zahngenerationen angelegt; man spricht von einem diphyodonten Gebiss (Thomé, 2004). Die erste Zahngeneration wird als Milchzähne, *Dentes decidui*, bezeichnet. Später folgen die *Dentes permanentes*, die das dauerhafte Gebiss bilden (Thomé, 2004).

Zähne entwickeln sich sowohl aus einem ektodermalen, als auch aus einem mesenchymalen Anteil (Rüsse & Sinowatz, 1998). Der Schmelz entsteht aus dem Ektoderm der Mundbucht; die restlichen Zahnstrukturen entstehen aus dem Mesoderm (Schnorr & Kressin, 2006). Die Zahnentwicklung beginnt am 25. Tag post ovulationem mit dem Anlegen der Zahnleiste (Rüsse & Sinowatz, 1998). Die Zahnleiste weist eine der Kieferform entsprechende Morphologie auf, und aus ihr entwickeln sich die einzelnen Zahnformen (Schnorr & Kressin, 2006). Bei der Zahnentwicklung unterscheidet man drei Stadien: das Knospenstadium, das Kappenstadium und das Glockenstadium (Rüsse & Sinowatz, 1998; Eickhoff, 2005; Schnorr & Kressin, 2006). Während des Knospenstadiums entstehen aus der Zahnleiste die ersten Formen der Schmelzorgane, die Zahnknospen. Im Kappenstadium stülpen sich Mesenchymverdickungen nach innen in die Zahnknospe, sodass diese ihre Form verändert und der Schmelzbecher entsteht (Schnorr & Kressin, 2006). Aus diesem entsteht später der Zahnschmelz (Rüsse & Sinowatz, 1998). Die Zahnleiste wird nun bis auf kleine, lingual liegende Reste zurückgebildet. Diese Reste bilden die Ersatzzahnleiste (Rüsse & Sinowatz, 1998). Im Glockenstadium ist die Zahnform schon deutlich zu erkennen; sie entsteht durch Proliferation der Papille zur Schmelzglocke (Schnorr & Kressin, 2006). Bevor sich der eigentliche Zahnschmelz bildet, kommt es zur Dentinbildung. Aus dem Schmelzepithel differenzieren sich einzelne Zellen zu Odontoblasten und beginnen damit, ins Innere der Zahnanlage Dentin zu produzieren (Schnorr & Kressin, 2006). Odontoblasten bilden ein Leben lang Dentin.

Aus den restlichen, nicht zu Odontoblasten werdenden Epithelanteilen, entwickelt sich die gut innervierte und durchblutete Zahnpulpa (Rüsse & Sinowatz, 1998). Während der Dentinbildung differenzieren sich einzelne Schmelzzellen zu Adamantoblasten und beginnen den Schmelzüberzug zu bilden.

Kurz vor dem Zahndurchbruch beginnt erst die Wurzelbildung (Schnorr & Kressin, 2006). Aus den Resten der epithelialen Wurzelscheide entwickeln sich die Zementoblasten, dies sind Zement produzierende Zellen. Diese bilden im Wurzelbereich den schützenden Zement (Schnorr & Kressin, 2006). Über dem Zement wiederum wird vom Mesenchym das Periodontium ausgebildet (Rüsse & Sinowatz, 1998).

Die permanenten Zähne entstehen in gleicher Weise wie die *Dentes decidui* aus der Ersatzzahnleiste. An den Milchzähnen kommt es zu einer Wurzelresorption, dadurch besitzen die Zähne keine Halterung mehr und fallen aus den Alveolen heraus. Der genaue

## 2 Literaturübersicht

Ablauf des Zahnwechsels ist wissenschaftlich noch nicht abschließend erforscht, experimentelle Studien an Hunden zeigen jedoch, dass der Zahnwechsel vom Zahnfollikel ausgeht (Marks & Cahill, 1987; Ericson et al., 2002).

Bis zum vierten Prämolaren gibt es als Vorläufer die Milchzähne; die Molaren entstehen durch Verlängerung der Zahnleiste und haben keine Vorläuferzähne (Eickhoff, 2005; Schnorr & Kressin, 2006). Für den ersten Prämolaren wird ebenfalls kein Milchzahn mehr ausgebildet, dies entspricht einer durch Evolution bedingten Verringerung der Zahnanzahl (Eickhoff, 2005).

Das Wurzelwachstum eines Hundes beginnt vor der Kalzifizierung der Zahnkrone (Wiggs & Lobprise, 1997). Es sistiert, wenn sich das apikale Wurzeldelta schließt (Eickhoff, 2005). Man geht davon aus, dass dieser Zeitpunkt mit der vollständigen Kronenentwicklung zusammenfällt. Das Ende des caninen Wurzelwachstums wird in der Literatur nicht genauer definiert, da dieses je nach Größe, Rasse und auch für jedes Tier individuell deutlich variieren kann (Wiggs & Lobprise, 1997). Der Zahndurchbruch und der Wurzeldeltaverschluss erfolgen bei großen Hunderassen zeitlich früher als bei kleinen Hunderassen (Eickhoff, 2005).

### 2.1.3 Zahnomenklatur

Die Benennung der Zähne erfolgt in der Veterinärmedizin mit Hilfe des 1972 erstellten Zahnschemas nach Triadan (Fahrenkrug, 1986; Floyd, 1991). Triadan modifizierte das humanmedizinische Zahnschema der Fédération Dentaire Internationale (FDI), sodass es für die Veterinärmedizin verwendet werden kann (Triadan, 1972). Das Zahnschema nach Triadan benutzt drei Ziffern. Die erste Ziffer gibt den rechten oder linken Ober- oder Unterkieferquadranten an. Die folgenden zwei Ziffern nummerieren die Zähne vom ersten, inneren Incisivus nach distal fortlaufend (siehe Tabelle (Tab.) 1).

**Tabelle 1. Zahnschema nach Triadan (nach Eickhoff, 2005)**

<b>Oberkiefer rechts</b>										
I1	I2	I1	C	P1	P2	P3	P4	M1	M2	
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	
I1d	I2d	I3d	Cd		P2d	P3d	P4d			
501	502	503	504		506	507	508			
<b>Unterkiefer rechts</b>										
I1	I2	I3	C	P1	P2	P3	P4	M1	M2	M3
401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411
I1d	I2d	I3d	Cd		P2d	P3d	P4d			
801	802	803	804		806	807	808			

<b>Oberkiefer links</b>										
I1	I2	I3	C	P1	P2	P3	P4	M1	M2	
201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	
I1d	I2d	I3d	Cd		P2d	P3d	P4d			
601	602	603	604		606	607	608			
<b>Unterkiefer links</b>										
I1	I2	I3	C	P1	P2	P3	P4	M1	M2	M3
301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311
I1d	I2d	I3d	Cd		P2d	P3d	P4d			
701	702	703	704		706	707	708			

### **2.2 Zahnwurzelmessungen**

Die Zahnwurzeloberfläche ist eine entscheidende Größe in Bezug auf die an einem Zahn anwendbaren Kräften (Hirschmann, 1987; McGuire & Nunn, 1996; Staudacher, 2009). Die Verankerungsfläche einer Zahnwurzel in dem umgebenden Knochen ist maßgeblich für die Fixation des Zahnes in seiner Alveole durch das Parodontium verantwortlich.

#### **2.2.1 Zahnwurzelmessungen in der Humanmedizin**

In der Kieferorthopädie des Menschen ist die Größe der Wurzeloberfläche lange Zeit nicht bekannt, sodass verschiedene Evaluationsmethoden entwickelt wurden, um diese zu bestimmen. Aus dieser Vielzahl von Methoden resultiert, dass viele unterschiedliche Angaben bezüglich der Zahnwurzeloberfläche existieren (Gruber, 2005).

Die früheste in der Literatur beschriebene Zahnwurzelvermessungstechnik ist die Membrantechnik nach Brown (1950). Um diese Methode zu verwenden, werden Zähne extrahiert und mit einer dünnen Schicht aus Latex überzogen. Nach Aushärtung wird die Latexschicht vom Zahn entfernt und anschließend zur Vermessung auf ein Millimeterpapier gelegt. Da konkave Wurzeloberflächen ungenau gemessen werden können, ist diese Methode jedoch relativ ungenau.

Ein weiterer Kritikpunkt bezieht sich auf die Verwendung eines elastischen Materials, da es schnell zu Verformungen und somit zu Ungenauigkeiten kommen kann. 1958 versuchen Watt und Mitarbeiter dies zu korrigieren. Sie verwenden anstelle von Latex ein flüssiges, aufsprühbares Material.

Jepsen modifiziert 1963 diese Methode. Er verwendet zur Wurzelvermessung die sogenannte „Divisions-Planimetrie“. Die Wurzel wird wie bei der Membrantechnik überzogen, ausgehärtet und auf Millimeterpapier gelegt. Der Unterschied zu Brown besteht darin, dass mit Hilfe eines Planimeters (Typ AMSLER) die Zahnwurzeloberfläche vermessen wird (Jepsen, 1963). Eine Kombination dieser Methoden beschreiben Crabb & Wilson (1974). Sie überziehen den Zahn mit einem dünnen Papier, um anschließend das Papier mittels Planimetrie zu vermessen. Diese Methode führt zu genaueren Ergebnissen, kann aber nur bei einwurzeligen Zähnen verwendet werden (Nicholls et al., 1974). Des Weiteren entwickeln Nicholls und Mitarbeiter (1974) eine Methode mit dem Ziel, die genaue Geometrie jeder einzelnen Zahnwurzel zu betrachten. Hierzu zementieren sie extrahierte Zähne in einen Lucite-Block. Nachdem der Block ausgehärtet ist, wird er maschinell in dünne, gleichmäßig dicke Scheiben geschnitten. In diesen Schnitten misst er den Umfang der Zahnwurzel. Zusammen mit der Dicke der Scheibe ergibt sich ein dreidimensionaler Datensatz, der in einen Computer eingegeben werden kann, sodass die Wurzeloberfläche errechnet wird.

## 2 Literaturübersicht

Modernere Methoden basieren auf der Grundlage von digitalen Röntgenbildern, aus denen die Oberfläche errechnet werden soll. Hierzu gibt es verschiedene Lösungsansätze. Der Ansatz von Verdonschot und Mitarbeiter (1990) verwendet ein Vergleichssystem. Zuerst werden röntgendichte Kugeln per Mikrometer vermessen und anschließend mit digitaler Radiographie abgelichtet. An diesen Bildern wird die Anzahl der Pixel pro Kugel gemessen und so auf die Gesamtgröße pro Pixel rückgeschlossen. Diese Kugeln werden in vorgeformte Hohlräume in extrahierten Zähnen eingesetzt. Die präparierten Zähne werden geröntgt und durch Vergleich der Größe der Kugel mit der Zahngröße wird die Gesamtanzahl an Pixeln und somit die Wurzeloberfläche berechnet. Chen et al. (2004) und Pan et al. (2005) versuchen mit ihrer Methode an extrahierten Zähnen mittels einer Kontakttechnik zur Oberflächenvermessung dreidimensionale Zahnbilder zu digitalisieren. Die digitalisierten Bilder werden mit spezieller Software vermessen und mit vorher gemachten Radiographien der Zähne verglichen. Eine ähnliche Methode verwendet Mowry und Mitarbeiter (2002). Die extrahierten Zähne werden gefilmt und die so gewonnenen Bilder mittels Spezialsoftware in dreidimensionale Darstellungen umgerechnet. Anschließend kann die Zahnwurzeloberfläche gemessen werden. Einen neuen Ansatz zur Zahnwurzeloberflächenvermessung stellt die dreidimensionale Laservermessung dar. Hierbei werden periapikale Röntgenaufnahmen von Zähnen erstellt. Anschließend wird die Wurzeloberfläche der extrahierten Zähne per 3D Laser Scanning bestimmt (Tian et al., 2009).

Zur Bestimmung der Zahnwurzeloberfläche mit Hilfe der bisher genannten Techniken ist jedoch immer die Extraktion des Zahnes notwendig. Ziel einer Wurzelvermessung sollte allerdings auch zur Vermeidung von extraktionsbedingten Fehlern eine nicht invasive Zahnwurzeloberflächenmessung sein. Die Computertomographie (CT) wird schon Anfang der 90er Jahre als mögliches Mittel der Wahl zur Zahnwurzel diagnostik aufgeführt (Fuhrmann, 1993, 1994, 1995; Naito, 1998). Wissenschaftler der Universität Wien haben die Zahnwurzeloberfläche mittels CT bestimmt, mit dem Ziel eine Angabe zur Gesamtwurzeloberfläche aller Zähne des Menschen geben zu können (Gruber et al., 2005). Hierzu werden CT-Bilder manuell vermessen. Die Zahnwurzel wird schichtweise umfahren, um aus diesen Daten die Gesamtwurzeloberfläche zu berechnen. Die hier festgestellten Zahnwurzeloberflächen stimmen größtenteils mit den durch Hujoel (1994) in einer meta-Analyse verschiedener Messungsverfahren festgestellten Wurzeloberflächen überein (Gruber et al., 2005).

Mehrere aktuelle Studien belegen, dass sowohl die Cone-beam Computertomographie, als auch die Microcomputertomographie adäquate und genaue Volumenmessungen zulassen (Hechler, 2008; Sherrard et al., 2010; Wang et al., 2011; Maret et al., 2012; Seth et al., 2012).

### 2.2.2 Zahnwurzelmessungen in der Veterinärmedizin

In der veterinärmedizinischen Fachliteratur lassen sich nur sehr wenige Angaben zur Zahnwurzeloberflächenvermessung des caninen Gebisses finden. Smith und Massoudi (1991) vermessen in zwei Studien, rasseunabhängig an aus Hundekadavern extrahierten Zähnen, die caninen Reißzähne. In einer ersten Studie werden Messungen des vierten Oberkieferprämolaren durchgeführt (Smith & Massoudi, 1991), in einer anschließenden Studie wird der erste Unterkiefermolar vermessen (Smith & Massoudi, 1992). Sie ergeben für den Oberkiefer P4 eine durchschnittliche Wurzeloberfläche von  $562.8 \pm 124.9$  Quadratmillimeter ( $\text{mm}^2$ ) und für den Unterkiefer M1 eine durchschnittliche Wurzeloberfläche von  $497.1 \pm 116.2 \text{ mm}^2$  (Smith & Massoudi, 1991; Smith & Massoudi, 1992). Die so gemessenen Werte zeigen eine sehr große Varianz, welche durch die verschiedenen Rassen und durch individuelle Merkmale der Probanden zu erklären ist (Wiggs & Lobprise, 1997). Wiggs und Lobprise (1997) veröffentlichen darauf aufbauend eine Tabelle (siehe Tabelle 2) mit durchschnittlichen Zahnwurzeloberflächen für einige Zähne caniner Gebisse, eingeteilt in vier Gewichtsklassen. Über die Vermessungstechnik, die diesen Ergebnissen zugrunde liegt, gibt es keine Angaben. Auch fehlen Angaben über die mögliche Varianz der vorliegenden Ergebnisse und die Zweckmäßigkeit der Einteilung in Gewichtsklassen.

Staudacher veröffentlicht 2009 eine Studie, in der bei 50 erwachsenen Hunden verschiedener Rassen CT Untersuchungen der Zähne durchgeführt werden. Mit Hilfe eines 3D-Grafikprogrammes wird die Gesamtwurzelfläche eines Zahnes vermessen. An 36 Gebissen werden zusätzlich jeweils mindestens acht Zähne extrahiert und mit diesen näherungsweise die im CT gemessenen Werte bestätigt. Aus diesen Ergebnissen wird ein Wurzelquotient erstellt. Dieser Wurzelquotient stellt, unabhängig von der tatsächlichen Zahngröße, die Zahnwurzeln eines Tieres ins Verhältnis zueinander. Durch die Verhältnisbildung gleichen sich systematische Messfehler weitgehend aus. Durch diese Überlegung kann man eine kieferorthopädische Behandlung grob planen, die absolute Größe einer Zahnwurzel wird damit aber nicht in ausreichender Genauigkeit bestimmt (Staudacher, 2009).

Neuere Methoden wie die Cone-beam Computertomographie, oder die Microcomputertomographietechnik, haben sich in der Tiermedizin noch nicht durchgesetzt. Bar-Am (2008) stellt die Überlegenheit des CT zur Identifizierung anatomischer Strukturen gegenüber normalen Röntgenaufnahmen fest, indem bei 24 Tieren mit maxillofazialen Trauma beide Diagnostika anhand eines Bewertungsbogens verglichen werden.

## 2 Literaturübersicht

**Tabelle 2. Zahnwurzeloberfläche nach Gewichtsklassen in cm<sup>2</sup> (nach Wiggs & Lobprise, 1997)**

<b>Zahnwurzel</b>	<b>&lt; 10 lbs</b>	<b>&lt; 25 lbs</b>	<b>&lt; 50 lbs</b>	<b>&lt; 90 lbs</b>
<b>Oberkiefer</b>				
<b>I1</b>	0,7	1	1,3	1,7
<b>I2</b>	0,8	1,2	1,5	1,9
<b>I3</b>	1,2	1,6	2,25	2,6
<b>C</b>	3,4	5,4	7,8	9,5
<b>P4</b>	2,5	4,15	5,25	6,75
<b>M1</b>	1,5	2,25	3,25	4,25
<b>Unterkiefer</b>				
<b>I1</b>	0,6	0,9	1,2	1,6
<b>I2</b>	0,7	1,2	1,5	1,8
<b>I3</b>	0,9	1,4	1,7	2,0
<b>C</b>	3,3	5,25	7,65	9,25
<b>P4</b>	1,3	1,9	3,25	3,75
<b>M1</b>	2,6	3,8	4,75	6,00

### **2.3 Zahnverhältnisse**

In der humanmedizinischen Zahnheilkunde wird schon seit geraumer Zeit an den Verhältnissen einzelner Zähne zueinander geforscht. Gillen et al. (1994) zeigen, dass die mittleren Schneidezähne 25% breiter als die seitlichen Schneidezähne und 10% breiter als die Eckzähne sind. Lange Zeit forschen Humanmediziner aus ästhetischen Gründen daran, ob das Verhältnis des Goldenen Schnittes (1:1,682) als bestes Breitenverhältnis v.a. zwischen mittlerem und lateralem Schneidezahn gilt (Levin, 1978; Snow 1999; Probst, 2007). Es wird jedoch festgestellt, dass dieser Goldene Schnitt, der als beste Universalproportion in der Natur gilt, nicht auf Zähne übertragbar ist. Das in der Natur vorkommende Verhältnis wird u.a. mit 0,80 (Probst, 2007) bzw. 0,78 (Wolfart et al., 2005) angegeben. Eine Vielzahl weiterer Arbeiten befassen sich mit dem Thema der fazialen Proportionen als Schönheitskriterium (Perrett et al., 1994; Swaddle et al., 1995; Sergl et al., 1998; Mahshid et al., 2004; Tatarunaite et al., 2005). Die so gefundenen Zahnkronenverhältnisse deuten an, dass auch zwischen einzelnen Zähnen bestimmte Verbindungen existieren. Bei den bisher erhobenen Daten handelt es sich um Zahnkronenproportionen und nicht um Zahnwurzelverhältnismäßigkeiten, so dass es keine Referenzen bezüglich der Zahnwurzeloberflächenverhältnisse gibt. Da bestimmte Verhältnisse zwischen den Zahnkronen einzelner Zähne nachgewiesen wurden (Wolfart et al., 2005; Probst, 2007), gilt es zu überprüfen, ob auch Verhältnisse in Bezug auf die Zahnwurzeloberfläche zwischen einzelnen Zähnen existieren.

Ein weiteres beim Menschen untersuchtes und verwendetes Zahnverhältnis ist das Kronen-Wurzel-Verhältnis (Crown-to-root-ratio). Die Länge der Zahnkrone und die Länge der Zahnwurzel werden ins Verhältnis zueinander gesetzt und es wird ein Quotient gebildet (Sanford et al., 1954; Stramotas et al., 2000; Hölttä et al., 2004; Norisa, 2011). Dieses Verhältnis ist in der humanmedizinischen Kieferorthopädie bereits als Richtwert etabliert und wird verwendet, um den Fortschritt periodontaler Defekte angeben zu können. Er wird meist aus intraoralen Röntgenbildern gemessen (Jakobsson & Lind, 1973; Brook & Holt, 1978; Linge & Linge, 1983; Larheim et al., 1984; Carels et al., 1991; Schalk- van der Weide et al., 1993). Andere Autoren haben dieses Verhältnis auch bei extrahierten Zähnen gebildet (Bjoerndahl et al., 1974). Das bei extrahierten Zähnen gebildete Verhältnis kann in der praktischen Kieferorthopädie allerdings nicht verwendet werden, da die eingesetzten Vermessungspunkte klinisch an nicht extrahierten, sondern in der Mundhöhle befindlichen Zähnen, nicht einfach zu erreichen sind (Hölttä et al., 2004).

Das Kronen-Wurzel-Verhältnis bezieht sich eindeutig auf die Länge einer Zahnwurzel und ist somit für die Kieferorthopädie nur bedingt nützlich. Die Fixation eines Zahnes lässt sich anhand dessen grob abschätzen, allerdings hängt diese nicht nur von der Länge der Zahnwurzel, sondern, wie in den vorherigen Abschnitten erläutert, von der Wurzeloberfläche

## 2 Literaturübersicht

ab. Bisher wurde in der Literatur noch nicht untersucht, ob ein Verhältnis zwischen Kronenlänge und Zahnwurzeloberfläche untereinander, oder sogar zwischen der Zahnkrone eines Zahnes und der Wurzeloberfläche eines anderen Zahnes, besteht. Ein solches etabliertes Verhältnis wäre für die kieferorthopädische Behandlung von großem Nutzen, da somit die Berechnung, der in den Alveolen verborgenen Zahnwurzeloberfläche, aus einer einfach zu erreichenden Struktur möglich und somit die exakte Wurzeloberfläche bekannt wäre.

Darüber hinaus gibt es eine Studie über die Relation zwischen Kopfentwicklung und Zahnwurzellänge bei Hunden, die nachweist, dass signifikante Beziehungen zwischen fazialen Proportionen und relativer Wurzellänge bestehen (Riesenfeld & Siegel, 1970). Außerdem wird experimentell geprüft, ob eine Beziehung zwischen Gesichtslänge und Zahnwurzellänge besteht, indem bei Ratten das Nasenseptum operativ entfernt wird. Ratten, die einer solchen Operation unterzogen werden, zeigen eine Verkürzung der Zahnwurzellänge (Riesenfeld, 1949). Die vorgenannten Studien belegen, dass Korrelationen zwischen fazialen Proportionen und der Wurzellänge der Zähne bestehen.

Auch eine Verbindung zwischen Gewicht und parodontalen Erkrankungen ist beschrieben worden; die Art der Abhängigkeit wurde aber nicht genauer untersucht (Harvey et al., 1994). In einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit wird die Mandibulagröße und die Länge des ersten Molaren bei Hunden verglichen, mit dem Ziel eine Verbindung zu Körpergewicht, Body Condition Score, Geschlecht oder Alter herzustellen. Diese zeigt, dass eine signifikante Beziehung zwischen dem Verhältnis aus Mandibulagröße zur Länge des ersten Molaren und dem Körpergewicht eines Tieres besteht (Gioso et al., 2001).

Der von Staudacher 2009 erstellte Wurzelquotient für Hunde setzt die Zahnwurzeln der einzelnen Zähne in ein Verhältnis zueinander, um so eine Therapie genauer planen zu können. In der Kieferorthopädie müssen Kräfte auf einen Zahn einwirken und an einem anderen Punkt fixiert werden. Damit die Funktionalität einer Behandlung gegeben ist, müssen die Zahnwurzeln des zu behandelnden Zahnes und die des Verankerungszahnes in bestimmten Proportionen zueinander stehen. Diese Proportionen werden näherungsweise in der Arbeit bestimmt (siehe Tabelle 3) (Staudacher, 2009).

## 2 Literaturübersicht

**Tabelle 3. Wurzelquotient nach Staudacher (2009)**

<b>Oberkiefer, rechter Quadrant</b>											
	110	109	108	107	106	105	104	103	102	101	<b>Triadan</b>
	M2	M1	P4	P3	P2	P1	C	I3	I2	I1	<b>Anatomisch</b>
	k.A.	2,5	5,5	2,5	1,5	1	4	1,5	1	1	<b>Wurzelquotient</b>

<b>Oberkiefer, linker Quadrant</b>											
	210	209	208	207	206	205	204	203	202	201	<b>Triadan</b>
	M2	M1	P4	P3	P2	P1	C	I3	I2	I1	<b>Anatomisch</b>
	k.A.	2,5	5,5	2,5	1,5	1	4	1,5	1	1	<b>Wurzelquotient</b>

<b>Unterkiefer, linker Quadrant</b>											
311	310	309	308	307	306	305	304	303	302	301	<b>Triadan</b>
M3	M2	M1	P4	P3	P2	P1	C	I3	I2	I1	<b>Anatomisch</b>
k.A.	k.A.	5	3	2,5	1	0,5	4	1	1	1	<b>Wurzelquotient</b>

<b>Unterkiefer, rechter Quadrant</b>											
411	410	409	408	407	406	405	404	403	402	401	<b>Triadan</b>
M3	M2	M1	P4	P3	P2	P1	C	I3	I2	I1	<b>Anatomisch</b>
k.A.	k.A.	5	3	2,5	1	0,5	4	1	1	1	<b>Wurzelquotient</b>

\*k.A. = keine Angabe

### **2.4 Kieferorthopädische Grundlagen**

Die in den vorherigen Abschnitten erläuterten anatomischen Zahneigenschaften sind besonders relevant für die Kieferorthopädie. Wird ein Zahn belastet, so erfährt er eine Auslenkung. Diese Auslenkung wird zum einen durch Dehnungsvorgänge und zum anderen durch Deformationsvorgänge im Zahn sowie im Parodontium bedingt (Diedrich, 2000). Entscheidend für die Manifestation dieser Bewegung sind die physikalischen Eigenschaften des parodontalen Gewebes und die physikalischen Größen der Kraft sowie der Kraftverteilung im Parodontium (Diedrich, 2000).

#### **2.4.1 Biologische Grundlagen der Zahnbewegung**

Bei jeder kieferorthopädischen Kraftapplikation treten im Gewebe komplexe Reaktionen auf, die zu einem Erfolg der Behandlung führen sollen (Staudacher, 2009). Bei den beiden Hauptmechanismen handelt es sich um Resorptions- und Appositionsvorgänge (Graber & Swain, 1989). Nach der Flourens-Tomes'schen Drucktheorie kommt es primär zu einer Veränderung der parodontalen Strukturen und sekundär zu einer Veränderung an den beteiligten knöchernen Strukturen (Gottlieb & Orban, 1931; Schwarz, 1961; Harzer, 1999). Auf der Zugseite führt dies zu einer Erweiterung des Parodontalraums und auf der Druckseite zu einer Einengung (Wiggs & Lobprise, 1997; Harzer, 1999; Diedrich, 2000; Staudacher, 2009). Durch diese Veränderung in der Breite des Parodontalraumes werden verschiedener Mediatoren freigesetzt, wodurch Zellumbau- und Zellerneuerungsvorgänge gesteigert und gerichtet werden (Diedrich, 2000). Rygh (1976) stellt an Ratten fest, dass der Hauptimpuls durch die Veränderung der Hämodynamik ausgelöst wird. Aufgrund der Änderung des Blutflusses wird auf der Druckseite eine vermehrte Osteoklastenmobilisation ausgelöst. Diese wiederum verursacht einen Knochenabbau, der sich histologisch in Form der Howshiplakunen manifestiert (Wiggs & Lobprise, 1997). Auf der Zugseite werden Osteoblasten, Fibroblasten und Zementoblasten freigesetzt, die zu einem vermehrten Aufbau führen (Gianelly, 1969).

Die an einem Zahn auftretenden Veränderungen laufen, je nach Intensität der wirkenden Kräfte, in drei Phasen ab (Reitan, 1967). Während der ersten fünf Tage kommt es in der Initialphase zur maximalen Kompression des Desmodontalspaltes. Die hier messbare Ortsbewegung des Zahnes setzt sich aus der Streckung der Kollagenfasern, der Eigenelastizität des Zahnes, dem Auspressen des Gewebs- und Gefäßflüssigkeitspolsters und der Deformation der Alveole zusammen (Harzer, 1999). In der sich daran anschließenden zweiten Phase, der Hyalinisationsphase, sistiert aufgrund der vaskulären Kompression die Zahnbewegung. Diese Phase dauert beim Menschen zwischen zwei und bis zu zehn Wochen an (Wichelhaus, 2013). Als letzte Phase setzt die „Resorptive Phase“

ein. In dieser Phase transportieren ausdifferenzierte Osteoklasten Gewebe ab, sodass es zu einer Erweiterung des Desmodontalspaltes kommt. Aufgrund dessen verbessert sich die Hämodynamik, Stoffwechselprodukte gelangen zum Zahn und der Zahnauf- und -umbau kann beginnen. Da weiterhin ein gewisser Druck auf das Parodontium vorhanden ist, sistiert der Knochenabbau an der Druckseite jedoch nicht, sondern der Knochen wird weiterhin zeitgleich abgetragen (Harzer, 1999; Staudacher, 2009; Wichelhaus, 2013). Neben der Hämodynamik spielen eine Vielzahl anderer Mechanismen, wie zum Beispiel eine Spannungsänderung in den Kollagenfasern, neurophysiologische und chemische Reaktionsketten oder piezoelektrische Effekte im Knochen eine große Rolle bei orthodontisch induzierten Veränderungen an Geweben (Wiggs & Lobprise, 1997; Harzer, 1999; Diedrich, 2000; Staudacher 2009). Wirkt ein zu großer Druck auf das Gewebe kommt es zur Nekrose und dadurch zu ungewollten Zahnveränderungen. Der gelenkte Umbau kommt dabei zum Stillstand.

### **2.4.2 Kieferorthopädische Kräfte**

Auslösend für oben beschriebene Effekte ist immer eine Kraftapplikation auf einen Zahn. Hierbei muss zwischen kurzzeitig wirkenden und länger einwirkenden Kräften unterschieden werden. Aufgrund der Zusammensetzung des Periodontiums ist der Zahn in der Lage, sehr starken Kräften über einen kurzen Zeitraum standzuhalten (Wiggs & Lobprise, 1997; Harzer, 1999). Bei normalen Kaubewegungen wirken sehr hohe Kräfte auf einen Zahn ein, ohne dass dieser sich in seiner Position oder Struktur dauerhaft verändert (Harzer, 1999; Diedrich, 2000). Bei Hunden belaufen sich diese Kräfte auf bis zu 7.000 Newton (N) (Staudacher 2009). Treffen dagegen seitliche schwache Kräfte über mehrere Stunden auf einen Zahn, beginnen die beschriebenen Gewebereaktionen (Harzer, 1999). Ziel einer orthodontisch eingesetzten Kraft ist es, desmodontale Umbauvorgänge einzuleiten, ohne eine Hyalinisation zu induzieren. Ist die kieferorthopädisch eingesetzte Kraft zu groß, setzt die Hyalinisationsphase ein. Hat die Hyalinisation begonnen, sistiert ungewollter Weise der Zahnumbauvorgang und somit auch die kieferorthopädische Behandlung. Zudem kann es durch eine Verminderung der Durchblutung zu massiven Schädigungen im Parodont sowie zu Wurzelresorption und damit zum Verankerungsverlust des betroffenen Zahnes kommen (Diedrich, 2000). Die bei einer kieferorthopädischen Behandlung entscheidende physikalische Größe ist die auf einen Zahn einwirkende Kraft. Eine zu niedrig dosierte Kraft führt nur zu verminderten oder inexistenten und damit nicht der Therapie entsprechenden Zahnverschiebungen. Wird hingegen eine zu große Kraft angewendet, so kommt es durch Kompression der Kapillaren zur Einleitung der Hyalinisationsphase und folglich zu ungewollten Gewebereaktionen. Das Ziel einer kieferorthopädischen Behandlung ist somit,

## 2 Literaturübersicht

die nötige Kraft aufzubringen, um einen Zahn zu verschieben, ohne diesen durch Hyalinisation zu beschädigen.

Die auf einen Zahn anwendbaren Kräfte hängen in großem Maß von der Zahnwurzeloberfläche ab (Hirschmann, 1987; McGuire & Nunn, 1996; Staudacher, 2009). Schwarz (1961) setzt als Maßstab für die optimale kieferorthopädische Kraftgröße den kapillaren Blutdruck im Desmodontalspalt an; dieser beträgt  $0,25 \text{ N/cm}^2$ . Aus dieser Grenze leitet er vier biologische Wirkungsgrade für kieferorthopädischer Kräfte ab:

- In den ersten biologischen Wirkungsgrad fallen kieferorthopädische Kräfte, die zu gering sind um eine Wirkung zu erzielen und somit ohne Nutzen sind.
- Der zweite biologische Wirkungsgrad beinhaltet Kräfte zwischen  $0,15\text{-}0,2 \text{ N/cm}^2$  belasteter Wurzeloberfläche. Diese Kräfte bleiben damit unter dem kapillaren Blutdruck und führen zu optimalen kieferorthopädischen Ergebnissen, da eine Hyalinisation verhindert wird.
- Der dritte biologische Wirkungsgrad umfasst Kräfte die über dem kapillaren Blutdruck liegen. Diese Kräfte dürfen nur dann therapeutisch genutzt werden, wenn sie intermittierend und nicht dauerhaft angewendet werden.
- Im vierten biologischen Wirkungsgrad werden alle Kräfte abgedeckt, die deutlich höher als der kapillare Blutdruck liegen und bei deren Anwendung es zu ausgedehnten Nekrosen und Wurzelresorption kommt. Diese Kräfte müssen unbedingt vermieden werden.

Nach dem 3. Newtonschen Axiom,  $\text{actio} = \text{reactio}$ , muss die auf einen Zahn angewendete Kraft an einer anderen Stelle verankert werden, da jede Kraft auch eine Gegenkraft besitzt (Meschede, 2010). Bereits während der Behandlungsplanung, aber auch während der Therapie, muss stets darauf geachtet werden, eine ausreichend starke stationäre Verankerung zu schaffen (Harzer, 1999). Man geht davon aus, dass mindestens die doppelte Wurzeloberfläche, oder eine entsprechende Gegenkraft, notwendig sind, um bei stationären Apparaturen eine Mitbewegung des Retentionsblockes zu verhindern (Harzer, 1999; Staudacher, 2009). Um dies zu erreichen, können unter anderem mehrere Zähne in eine Verankerung einbezogen werden, der Anker auf die andere Kieferseite gelegt werden, oder Kieferplatten verwendet werden, um den Gaumen mit einzubeziehen, sowie Verankerungseinrichtungen im Kieferknochen fixiert oder extraorale Vorrichtungen genutzt werden (Staudacher 2009).

Voraussetzung für die Dimensionierung der anwendbaren Kraft ist folglich eine genaue, für jeden Patienten individuell festgelegte Kenntnis der Wurzeloberfläche aller beteiligten Zähne.

### 2.4.3 Kieferorthopädische Behandlungen in der Veterinärmedizin

Grundlegend unterscheidet man die basal-skelettalen von den dento-alveolären Fehlstellungen (Fahrenkrug, 1988; Bieniek, 1993; Eickhoff, 2005). Basal-skelettale Malokklusionen werden in Klassen eingeteilt, um diese genauer beschreiben zu können. Als Klasse 0 bezeichnet man eine eugnathe, also physiologische Bisslage: Ober- und Unterkiefer ermöglichen durch korrespondierende Länge eine Reißverschlussverzahnung im Seitenzahnbereich, eine physiologisch ausgestaltete canine Trias und einen Scherenbiss der Schneidezähne. Bei brachycephalen Rassen wird ein eventuell vorhandener Vorbiss des Unterkiefers auch als Klasse 0 bezeichnet, wenn dieser zum Rassestandard gehört (zum Beispiel ein sogenanntes „Boxergebiss“) (Eickhoff, 2005). Klasse 1 umfasst dento-alveoläre Fehlstellungen, bei denen die knöcherne Grundlage physiologisch ist und nur die Zähne eine Veränderung aufweisen, unabhängig davon, ob nur ein einzelner oder mehrere Zähne betroffen sind (Kramer, 2004; Eickhoff, 2005; Staudacher, 2009). Die Klassen 2, 3 und 4 beinhalten baso-skelettale Fehlstellungen. Als Klasse 2 werden die sogenannten Rückbisse bezeichnet. Ein Rückbiss bedeutet, dass die Mandibula distal der Maxilla beißt. Klasse 3 beinhaltet alle Formen von Vorbissen. Bei dieser Form der Fehlstellung beißt die Mandibula mesial der Maxilla. Klasse 4 beschreibt seltene Sonderfälle, wie zum Beispiel einen schiefen Biss (Eickhoff, 2005).

Wichtig für die Kieferorthopädie (KFO) ist der Zeitpunkt des Zahnwechsels. Vor dem Zahnwechsel werden nur wenige, basal-skelettale Zahnfehlstellungen behandelt, da eine gewisse Zeit benötigt wird, um eine Behandlung erfolgreich abzuschließen. Nach dem Zahnwechsel kann das zu diesem Zeitpunkt hohe Wachstumspotenzial des Patienten genutzt werden. Dento-alveoläre Fehlstellungen lassen sich in der Regel auch noch im bleibenden Gebiss erfolgreich korrigieren, eine Behandlung der Milchzähne bedeutet nicht, dass die Fehlstellung im bleibenden Gebiss nicht auch vorhanden ist (Staudacher, 2007). Der jeweilige Zeitpunkt des Zahnwechsels wird in Tabelle 4 illustriert.

**Tabelle 4. Zahnwechselalter (nach Wiggs & Lobprise, 1997)**

Zahn	Zahnwechsel/ -durchbruch
I1, I2, I3	3-5 Monate
C	4-6 Monate
P1	4-6 Monate
P2, P3, P4	5-7 Monate
M1	5-7 Monate
M2	5-7 Monate
M3	5-7 Monate

Zu den häufigsten Zahnfehlstellungen zählen beim Hund Fehlstellungen der Unterkiefer Eckzähne und der Incisiven sowie Veränderungen am reißverschlussartigen Biss der Prämolaren und Molaren (Eickhoff, 2005; Staudacher, 2009). Caninusfehlstellungen

werden je nach dem Punkt, an dem der Unterkiefercaninus den Gaumen trifft, in vier Grade eingeteilt (Fahrenkrug, 1988; Eickhoff, 2005; Staudacher, 2009). Als Grad 1 bezeichnet man Caninusfehlstellungen, bei denen die Unterkiefercaninusspitze peripher am Alveolarkamm des Oberkiefers auftritt. Beim Vorliegen eines Grad 2 Unterkiefercaninusfehlstandes trifft die Caninusspitze mesiopalatinal des Oberkiefercaninus auf. Bei Grad 3 liegt die Auftrittsfläche palatinal des Oberkiefercaninus und bei Grad 4 distopalatinal (Fahrenkrug, 1988; Eickhoff, 2005). Staudacher veröffentlichte 2009 eine Erweiterung dieser Einteilung unter Einbezug von Oberkiefercaninusfehlstellungen, welche allerdings erheblich seltener als Unterkiefercaninusfehlstellungen sind.

Zur Korrektur einer Caninusfehlstellung stehen verschiedene kieferorthopädische Hilfsmittel



**Abbildung 1: Dehnschraubenbehandlung am rechten, verkürzten Unterkiefercaninus.**

zur Verfügung. Liegt eine Caninusfehlstellung Grad 1 oder 2 vor, so sollte das reine Auswärtsführen der Canini zu einer Normokklusion und somit zum Behandlungserfolg führen. Ein probates Hilfsmittel sind hierbei Dehnschrauben (Abbildung (Abb.) 1). Die Dehnschrauben werden mittels spezieller Adhäsiv-Techniken zwischen den Canini einer Kieferhälfte (Ober- oder Unterkiefer) befestigt und mit Hilfe einer Stellschraube gedehnt. Das Drehen an der Stellschraube führt zu einem Auseinandergleiten

der Seitenteile und dadurch zu einer Erhöhung des Druckes auf die Canini (Eickhoff, 2005). Dieser Druck wird bei symmetrischer Anbringung gleichmäßig auf beide Canini übertragen, sodass auf beide die gleiche Kraft einwirkt und sie somit gleichmäßig bewegt werden. Eine seitenungleiche Kraftverteilung ist nur durch die Variation des Ansatzpunktes an einem der Canini möglich, da so das Drehmoment verlagert wird. Diese Möglichkeit ist jedoch stark eingeschränkt (Eickhoff, 2005). Die Stellschraube sollte alle 3-4 Tage um 90° gedreht werden, sodass immer wieder ein initial hoher und langsam nachlassender Kraftaufbau gewährleistet ist. Auch hier gilt das Prinzip, dass je größer die Caninuswurzel ist, desto höher auch die applizierte Kraft sein muss. Es sollte in jedem Fall eine geringgradige Überregulierung der Fehlstellung angestrebt werden. Die Stellschrauben sollten auch noch nach Erreichen der Endposition für ca. 1-2 Wochen in Position belassen werden, um die endgültige Festigung des Zahnes zu gewährleisten (Eickhoff, 2005).

## 2 Literaturübersicht

Eine andere Methode zur Begleichung von Caninusfehlstellungen ist der Einsatz von schiefen Ebenen (Abb. 2) (Staudacher, 2009). Schiefe Ebenen zählen zu den funktionskieferorthopädischen Apparaturen. Sie werden bei Caninusfehlstellungen Grad 2, 3 und 4 eingesetzt, weil es hier erforderlich ist, die Distalkippung der Canini zu berücksichtigen. Die schiefe Ebene wird entweder aus selbsthärtendem Kunststoff direkt am Patienten gefertigt



(sogenannte direkte schiefe Ebene) oder es wird zuerst ein Abdruck genommen, um in einem zweiten Schritt in einem Labor die Ebene fertigen zu lassen (indirekte schiefe Ebene) (Eickhoff, 2005; Roes, 2010). Bei stärkeren Verschiebungen der Canini muss auf eine ausreichende Fixation der Ebene, notfalls kieferviertelübergreifend, gesorgt werden. Hintergrund ist es eine fehlerhafte Verschiebung der Zähne unter der Platte zu vermeiden. Der Einsatz einer schiefen Ebene führt zu einer intermittierenden Krafteinwirkung, wobei der Patient selber die Kraftdosis bestimmt. Durch ausgeführte Kaubewegungen gleiten die Canini an der Ebene entlang und werden in die richtige Position verschoben. Eine Überdosierung der Kraft findet nur sehr selten statt, da die einwirkende Kraft durch Sensoren im Parodont registriert und reguliert wird (Eickhoff, 2005).

**Abbildung 2: Aufbissschiene mit zwei schiefene Ebenen bei einem Dackel mit einem Engstand der Unterkiefercanini.**

Bei einem starken Rückbiss besteht die Möglichkeit, dass zusätzlich zum Einsatz einer schiefen Ebene der Ober- oder Unterkiefer in seiner Position verschoben werden muss, damit die Canini in der Lage sind, durch die schiefe Ebene eine physiologische Okklusion zu ermöglichen. Hierzu können die Canini, welche in die schiefe Ebene integriert worden sind, durch eine zusätzliche Anwendung von elastischen Zügen in ihrer Position verändert werden. Zu beachten ist allerdings, dass die Distalisierung der Canini verankerungstechnisch stets eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt, da aufgrund der großen Wurzeloberfläche immer mehrere Zähne in die Verankerung einbezogen werden müssen (Eickhoff, 2005).

Die Verschiebung in eine physiologische Position muss gerade bei der gleichzeitigen Anwendung verschiedener kieferorthopädischer Apparaturen in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden (Staudacher, 2009).

Jede KFO-Behandlung erfordert die Anfertigung individueller Apparate speziell für den Patienten. Hierfür ist eine Vielzahl verschiedener kieferorthopädischer Apparaturen und Anwendungen bekannt (Staudacher, 2009). Allen dient das 3. Newton'sche Gesetz,  $actio = reactio$ , als Grundlage (Harzer, 1999). Der Erfolg einer Behandlung hängt somit davon ab, ob die Wurzeloberflächen der einzelnen betroffenen Zähne korrekt ermittelt worden sind.

### **2.5 Computertomographie**

Godfrey Hounsfield stellt 1973 den ersten Computertomographen zum Scannen eines Kopfes vor. Schon damals werden die hervorragenden diagnostischen Möglichkeiten im Kopfbereich beschrieben (Kalender, 2006).

#### **2.5.1 Physikalische Grundprinzipien**

Die Computertomographie basiert auf dem Prinzip eines Schichtaufnahmeverfahrens. Eine Röntgenröhre ist gegenüber zahlreichen Detektoren angeordnet und steht mit diesen in Verbindung (Kalender, 2006). Die Röhren rotieren während einer Untersuchung um den Patienten herum und geben dabei ständig fächerförmige Röntgenstrahlung mit einer vorgegebenen Breite (oder auch Schichtdicke) ab. Während der Untersuchung wird der auf einem beweglich gelagerten Tisch fixierte Patient langsam durch die untersuchte Schicht gefahren. Der zwischen Röntgenröhre und Detektor befindliche Patient absorbiert einen Teil dieser Strahlung, sodass nur noch ein abgeschwächter Teil der Strahlung den Detektor tatsächlich trifft (Kalender, 2006). Die ankommenden Strahlen werden gemessen und mit Hilfe eines Computers wird ein entsprechendes Bild in Graustufen errechnet und auf einem Monitor angezeigt (Tipold & Tipold, 1991). Zur Berechnung der Bilder wird heutzutage das Verfahren der Faltung und Rückprojektion eingesetzt. Hierbei wird jede Projektion in der gemessenen Richtung auf den Bildspeicher übertragen. So erhält man für einen Punkt mehrere Projektionen aus verschiedenen Winkeln. Vor der Rückprojektion wird jede Projektion mit einer mathematischen Funktion, dem sogenannten Faltungskern, belegt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um eine Hochpassfilterung, wodurch es zu einer Glättung der Kanten und somit zur detaillierteren und schärferen Aufnahmen kommt. Dieser Faltungskern wird auch als „Kernel“ bezeichnet. Durch Auswahl verschiedener Faltungskerne kann die Bildcharakteristik beeinflusst werden – von weich oder glättend bis hin zu scharf oder kantenbetonend (Kalender, 2006).

Direkt proportional zu Gewebdichte sind die auf dem Bildschirm angezeigten Grauwerte (Möller, 2009). Die CT-Dichteskala wird in Hounsfield-Einheiten (HU) angegeben. Es werden Fixwerte festgelegt, an denen sich die restlichen Gewebewerte orientieren und mit deren Hilfe Gewebe in ihrer Dichte verglichen werden können. Hierbei hat Wasser immer den Wert 0 HU und Luft immer den Wert -1000 HU (Tipold & Tipold, 1991; Hathcock & Stickle, 1993; Kalender, 2006). Diese beiden Werte sind unabhängig von der Energie der Röntgenstrahlung und stellen ideale Fixpunkte für die CT-Werteskala dar (Kalender, 2006).

Mittels CT-Fensterung kann die Darstellung eines Bildes je nach gesuchtem Gewebe optimiert eingestellt werden. Dies ist von Vorteil, da das menschliche Auge nur ca. 20-50

## 2 Literaturübersicht

Grauwerte differenzieren kann und moderne Computertomographen bis zu 4.096 verschiedene Graustufen unterscheiden (Hathcock & Stickle, 1993; Kalender, 2006).

Bei der CT-Untersuchung wird zu Beginn ein Topogramm oder Scout erstellt, mit dessen Hilfe das Scanareal festgelegt wird. Zudem werden die Schichtdicke und der Tischvorschub definiert. Eine Schichtdicke und ein Tischvorschub vom 1,5 mm bedeuten, dass die Röntgenstrahlen auf einer Fläche von 1,5 mm Breite gebündelt werden (=Schnittbreite) und sich der Tisch nach einem Röhrenumlauf um 1,5 mm vorschiebt, um anschließend die nächste Aufnahme zu machen (Nöller, 2007). Bei einem normalen Computertomographen erfolgt dieser Tischvorschub phasenweise; das heißt, dass der Tisch vorgeschoben, die Messung durchgeführt und anschließend der Tisch wieder um eine bestimmte Weite vorgeschoben wird. Bei der neueren Methode, der Spiral-CT-Technologie, erfolgt der Tischvorschub kontinuierlich und es kommt zur Aufnahme überlappender Schichten (Kalender et al., 1990; Hofer, 2000). Ein Vorteil dieser Methode ist die verkürzte Scanzeit, außerdem wird ein Datensatz einander überlappender Schichten akquiriert, sodass eine nachfolgende Berechnung lückenlos möglich ist.

Bei der cone-beam Computertomographie, in deutschem Sprachgebrauch auch digitale Volumentomographie genannt, handelt es sich um ein dreidimensionales Tomographieverfahren. Im Gegensatz zu konventionellen Computertomographen werden die Strahlen kegelförmig ausgesendet. Diese Technik wird vorwiegend in der humanen Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, sowie in der Hals-Nasen-Ohrenheilkunde eingesetzt (Scarfe et al., 2006; Mah et al., 2010). Die Mikro-Computertomographie besitzt hingegen eine Ortsauflösung von wenigen Mikrometern und dient vorzugsweise der zerstörungsfreien, dreidimensionalen Vermessung von Implantaten oder Geweben. Hartgewebe, wie zum Beispiel Knochen, sind hingegen nur eingeschränkt sichtbar (Saldamli & Müller, 2010).

Bei der Darstellung von CT-Bildern werden drei Ebenen im Raum unterschieden. Üblicherweise werden transversale Bilddatensätze aufgenommen und die weiteren Ebenen aus diesem Datensatz errechnet (Nöller, 2007). In der Kleintiermedizin unterscheidet man die transversale/axiale, die sagittale und die dorsale Schnittführung (Schwarz, 2002). Die dorsale Schnittführung entspricht der coronalen/frontalen Schnittführung in der Humanmedizin (Nöller, 2007).

Die Durchführung einer CT-Untersuchung an einem wachen Tier stellt sich als nahezu unmöglich dar. Daher muss die CT-Untersuchung in der Regel an einen narkotisierten Hund durchgeführt werden, um Bewegungsartefakte zu vermeiden.



### 3 Material und Methode

#### 3.1 Probanden

Diese Studie wurde retrospektiv an insgesamt 28 CT-Untersuchungen am Kopf von Hunden ausgewertet. Die Geschlechterverteilung ergab 11 männliche, 3 männlich-kastrierte, 8 weibliche und 6 weiblich-kastrierte Tiere (Abbildung 3). Das Verhältnis weiblicher zu männlicher Tiere war 50:50.

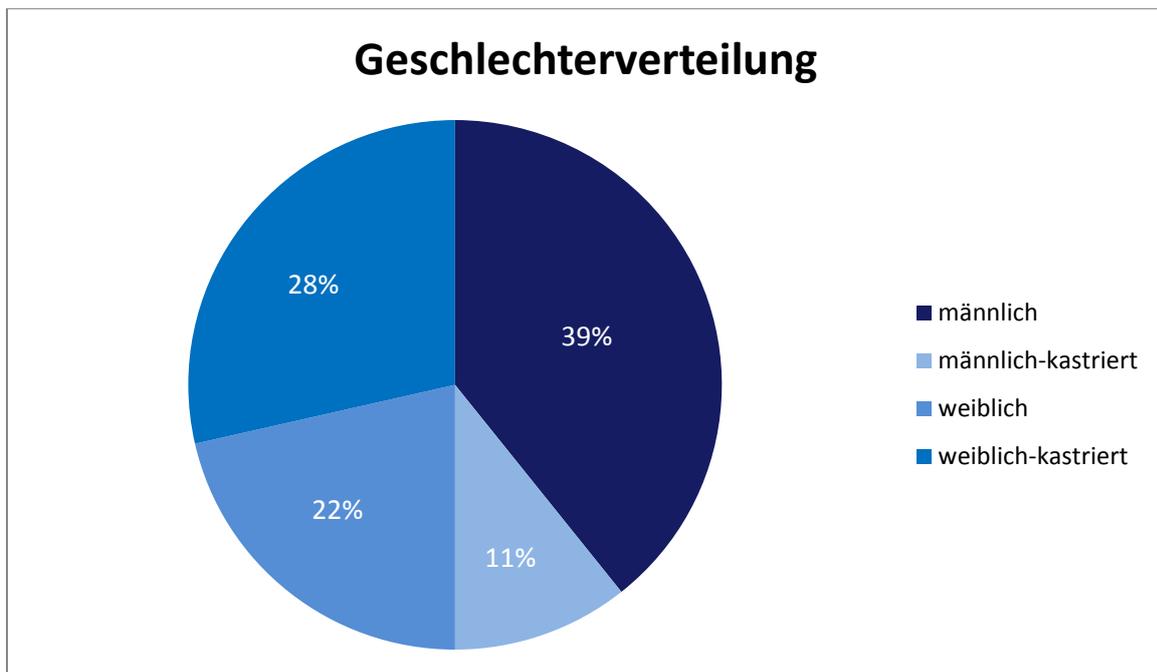


Abbildung 3: Geschlechterverteilung der Probanden

Die Tiere stammten alle aus dem Patientengut der Tierklinik Dr. Staudacher in Aachen. Sie wurden aus verschiedenen Gründen einer CT-Untersuchung des Kopfes unterzogen, und es wurde retrospektiv eine Auswertung der Bilddaten durchgeführt.

Um in die Studie aufgenommen zu werden, mussten folgende Kriterien erfüllt sein: Die Tiere mussten älter als fünf Monate sein, die Verzahnung musste orthodont mit ausgewachsener und geschlossener Zahnwurzel sein und es durfte kein Hinweis auf Caninusabnutzung gegeben sein. Der Wurzelschluss wurde bei jedem Probanden vor der Vermessung überprüft. Wurden deutliche Hinweise auf Wurzelresorption oder Zahnkronenabnutzung festgestellt, mussten einzelne Zähne oder der gesamte Patient aus der Studie ausgeschlossen werden. Der Parodontalspalt musste deutlich zu erkennen sein, damit dieser auf dem computertomographie Bild gut zu umfahren war.

### 3 Material und Methode

Bei 10 Tieren wurden alle 42 Zähne eines Gebisses untersucht, zusätzlich wurden noch die Kopf- und Gaumenlänge vermessen. Bei weiteren 4 Tieren wurden alle einwurzeligen Zähne und als wichtigster Verankerungspunkt zusätzlich der Reißzahn vermessen. Schließlich wurden bei weiteren 14 Tieren die Dentis canini vermessen. Insgesamt wurden an 552 Zähnen ca. 15.000 Messwerte erhoben.

Das Alter der untersuchten Tiere lag zwischen 5 und 156 Monaten mit einem Mittelwert von 74,5 Monaten (Abb. 4).

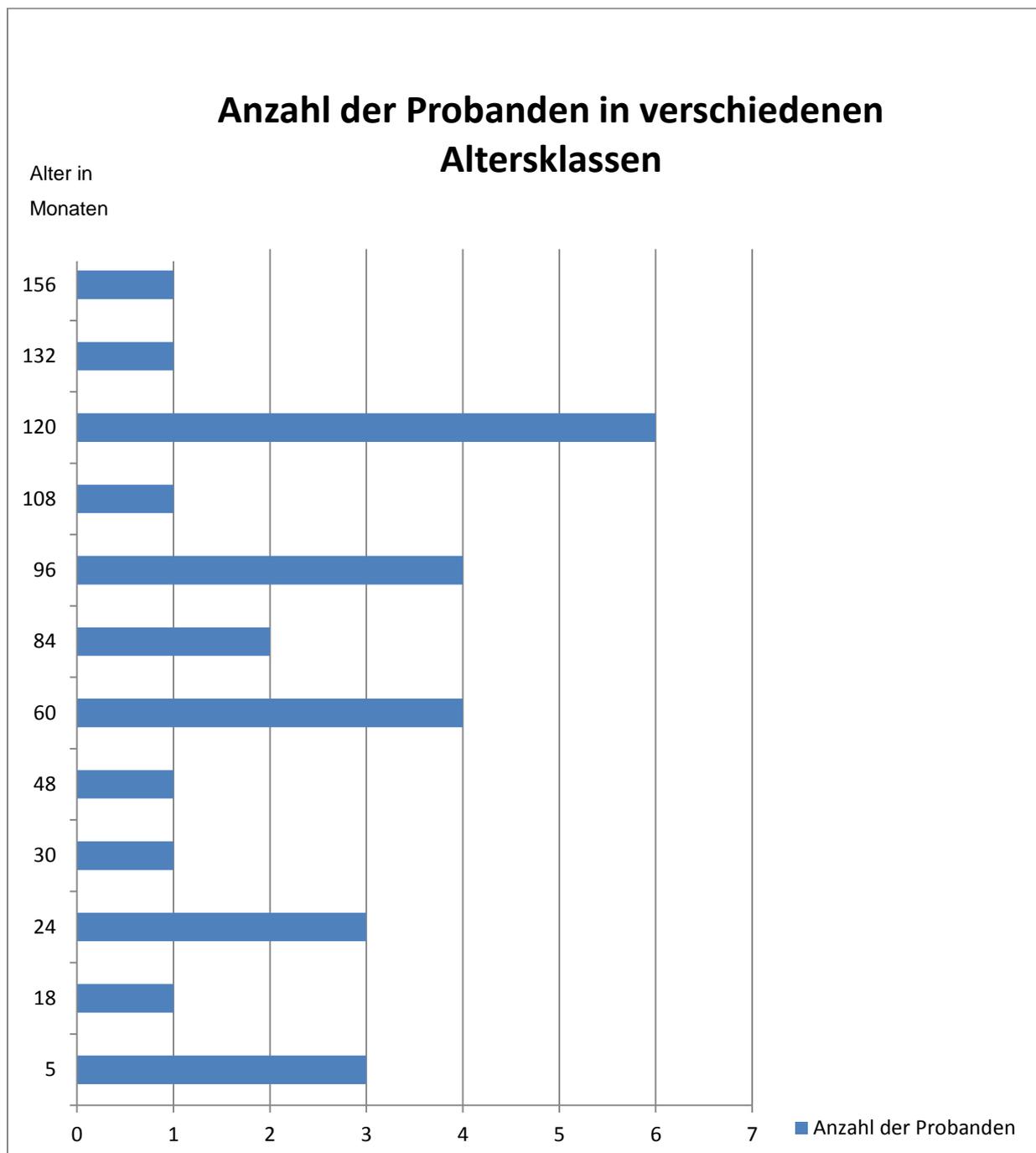


Abbildung 4: Alter der Probanden bei Durchführung der CT-Untersuchung

### 3 Material und Methode

Die Rasseverteilung ergab eine Gesamtanzahl von 22 verschiedenen Rassen unterschiedlicher Körpergröße (Abb. 5).

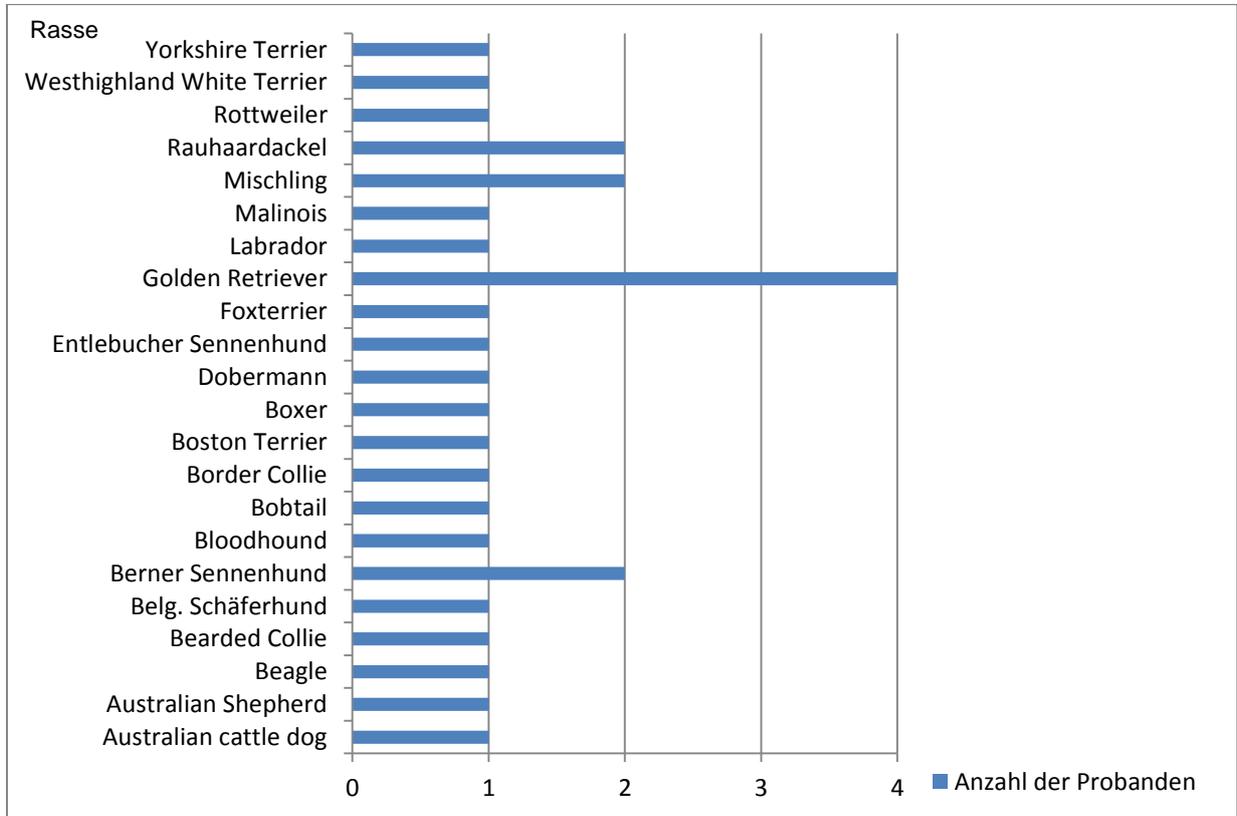


Abbildung 5: Rasseverteilung der Probanden

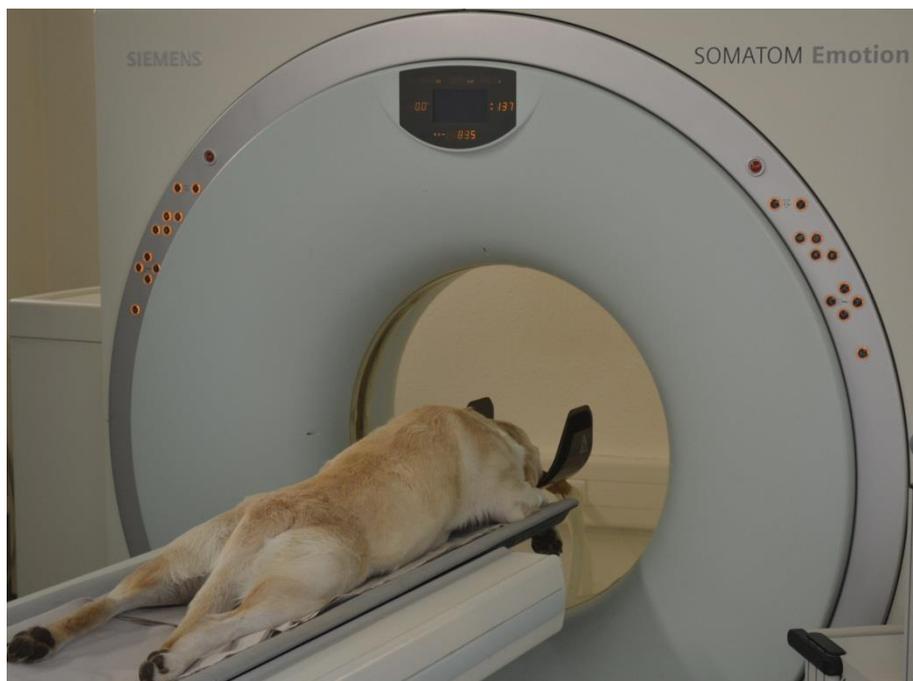
### 3.1.1 Anästhesie

Eine korrekte und fehlerfreie bildgebenden Diagnostik erforderte bei allen Patienten eine Allgemeinanästhesie. Die korrekte Lagerung des Kopfes und die Durchführung einer computertomographischen Untersuchung waren am wachen Tier nicht möglich. Zudem war es erforderlich, dass der Untersucher den Raum verlässt, um eine Strahlenbelastung zu vermeiden.

Alle Probanden wurden nach einer klinischen, allgemeinen Untersuchung durch eine intramuskuläre Injektion von 20-100 $\mu$ g/kg Körpergewicht Medetomidin, einer Kombination von Medetomidin (10-25  $\mu$ g/kg Körpergewicht) und Butorphanol (0,1 mg/kg Körpergewicht) oder einer Kombination aus Levomethadonhydrochlorid (0,25-1 mg/kg Körpergewicht) und Fenpipramidhydrochlorid (0,013-0,05 mg/kg Körpergewicht) mit Acepromazin (0,02-0,3 mg/kg Körpergewicht) sediert und anschließend intubiert. Die Narkose wurde durch eine Isofluran-Inhalationsnarkose aufrechterhalten.

### 3.1.2 Lagerungstechnik

Um die computertomographische Untersuchung des Kopfes durchzuführen, wurden die Tiere in Brust-Bauchlage oder Rückenlage positioniert und die Vordergliedmaßen nach vorne fixiert (siehe Abb. 6). Mittels Sandsäcken und Klebestreifen wurden die Tiere so fixiert, dass sie auch während des Tischvorschubs nicht in ihrer Lagerung verändert wurden. Die symmetrische Lagerung wurde durch Lagerungshilfen im Kopfbereich gewährleistet.



**Abbildung 6:** Darstellung der Lagerung eines Hundes während einer CT-Untersuchung. Der Hund ist in Brust-Bauchlage positioniert und die Vordergliedmaßen nach vorne fixiert.

### **3.2 Geräte, Scanprotokoll und Vermessung**

Alle computertomographischen Untersuchungen der Hundeschädel erfolgten mit einem Spiral-Computertomographen Siemens „Emotion 16-Zeiler“ (Abb. 7).



**Abbildung 7: Spiral-CT Siemens Emotion**

Hierzu wurde der komplette Schädel in axialer Schnitfführung mit folgendem Scanprotokoll untersucht:

- Röhrenspannung: kV: 130
- Röhrenstrom: mAs: 200
- Schichtdicke: 0,75 mm
- Inkrement: 0,6 mm
- Gantry: 0,0
- Schichtkollimation: 16 x 0,6
- Pitchfaktor: 0,55 – 1,15
- Kernel: Schädel H70s L1C0 2
- Matrix: 512 x 512

Bei einem Probanden (Proband Nummer 24) wurde eine Röhrenspannung von 120 kV und ein Inkrement von 0,6mm verwendet. Der Pitchfaktor variierte aufgrund der Größe der verschiedenen Hunderassen zwischen 0,55 und 1,15. Dieser lag somit größtenteils im hochauflösenden Bereich (Kalender, 2006).

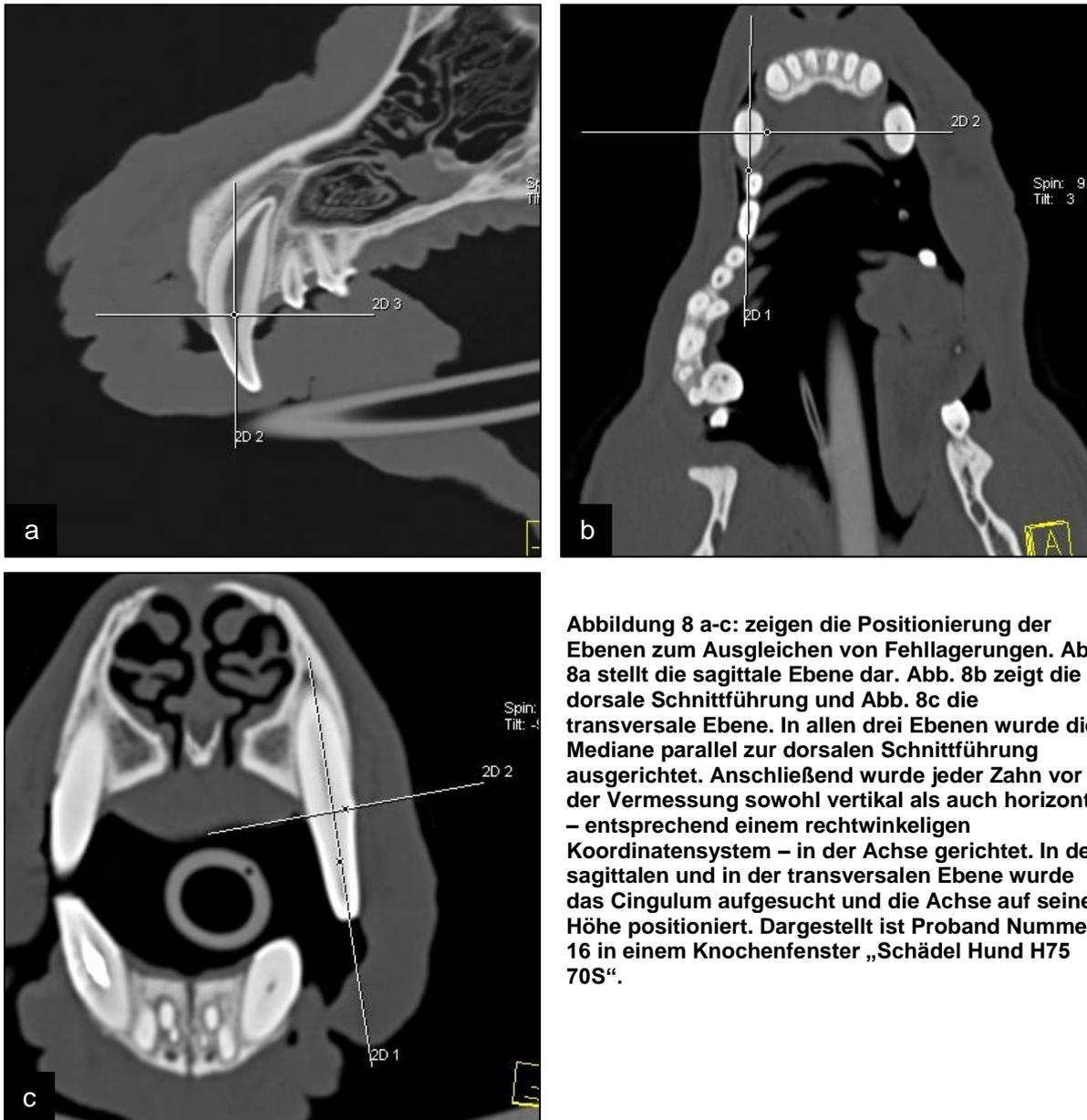
### 3 Material und Methode

Mit Hilfe des Bildbearbeitungsarbeitsplatzes Siemens „Syngo2008B“ (Version VE30A SC10P34), a Syngo Multi Modality Workplace, wurden die medizinischen Bilddaten im Folgenden weiter bearbeitet. Das Programm ermöglichte ein schichtweises Betrachten der CT-Bilder.

Nach Auswahl des gewünschten Patienten, wurde dieser markiert und der für die Vermessung interessante Datensatz „Schädel Hund H75 70S“ geladen. Hierbei handelte es sich um einen hochauflösenden Knochenkernel. Die Auswahl dieses Kernel war relevant, da zum einen die Graustufen der zu vermessenden Zahnstrukturen in einem Weichteilkernel schlechter zu erkennen waren und zum anderen bei Verwendung eines Weichteilkernel – bedingt durch den veränderten Faltungskern – die Zahnwurzel größer dargestellt wurde, als sie tatsächlich ist (siehe Abschnitt 2.5.1).

Mit dem Ziel, die Messgenauigkeit möglichst hoch zu halten und die Messung wiederholbar zu machen, wurden Fehllagerungen des Schädels im Aufnahme­feld mit Hilfe der „Bilder rotieren“-Funktion so korrigiert, dass in allen drei Ebenen die Mediane parallel zur dorsalen Schnittführung ausgerichtet wurde. Anschließend wurde jeder Zahn vor der Vermessung sowohl vertikal als auch horizontal – entsprechend einem rechtwinkligen Koordinatensystem – in der Achse gerichtet (siehe Abb. 8 a-c). Dies ermöglichte eine genaue Schnittführung in der dorsalen Ebene.

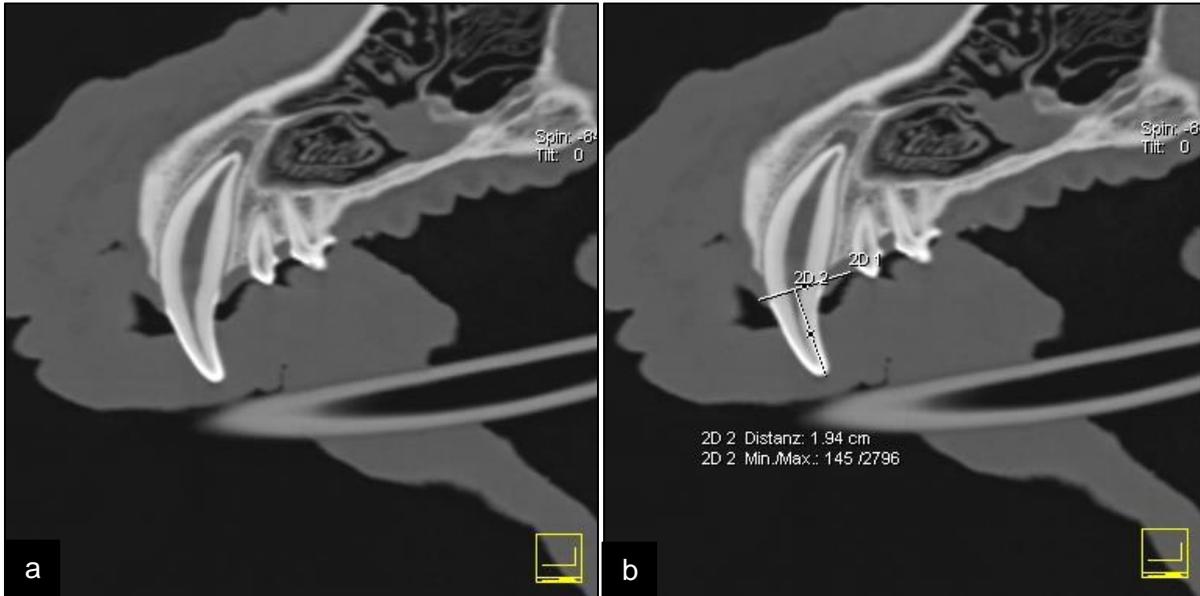
### 3 Material und Methode



In der sagittalen und der transversalen Ebene wurde das Cingulum als Übergangspunkt zwischen Zahnkrone und Zahnwurzel aufgesucht. Dieses war an der Veränderung von einem sehr hellen Grau zu einem matten Grauton an der Schmelz-Zement-Grenze sowie an einer Einziehung am Zahnhals deutlich zu erkennen.

Als erste Messung bei Caninus und Reißzahn wurde in der sagittalen Ebene, mit der Funktion „2D- gerade Linie“, die Höhe der Zahnkrone gemessen und notiert (siehe Abb. 9 a + b). Bei 10 Tieren wurden auch die Kopflänge vom Foramen magnum bis zur Nasenspitze, die Gaumenlänge von der Spina nasalis caudalis bis zur Zahnbogenspitze und die Breite und Höhe des Atlas an jeweils der breitesten/höchsten Stelle vermessen.

### 3 Material und Methode



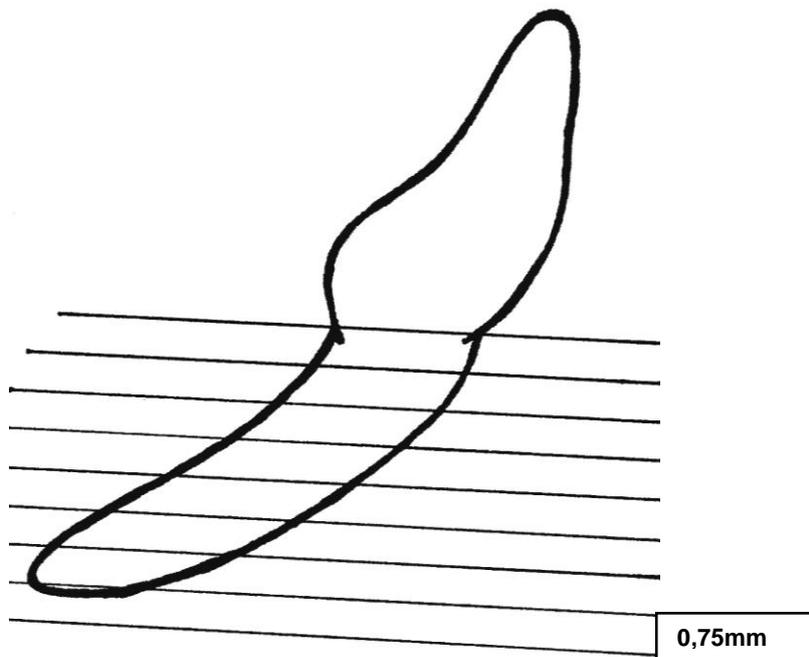
**Abbildung 9 a & b:** Darstellung der Kronenhöhenvermessung. Abb. 9a zeigt den Zahn vor der Kronenvermessung. Abb. 9b stellt den Zahn nach der Kronenvermessung dar. Das Cingulum wurde als Richtlinie markiert und die Höhe wurde vom Cingulum bis zur Kronenspitze mit der Funktion „2D-gerade Linie“ vermessen. Dargestellt ist Proband Nummer 16 in einem Knochenfenster „Schädel Hund H75 70S“.



Der betrachtete Zahn wurde in der dorsalen Ebene auf die gewünschte Größe eingestellt. Diese Größe wurde so gewählt, dass eine gute Differenzierbarkeit der Strukturen gewährleistet war, ohne dass es zu einer Einbuße an Schärfe kam. Durch eine Veränderung des Kontrastes konnte der Parodontalspalt genauer dargestellt werden (siehe Abb. 10).

Die Messung des Wurzelumfangs begann an der Schmelz-Zement-Grenze auf Höhe des Cingulum. Sie wurde schichtweise mit einem Abstand von 0,75mm durchgeführt. Die Messung endete am Wurzelapex (Abb. 11).

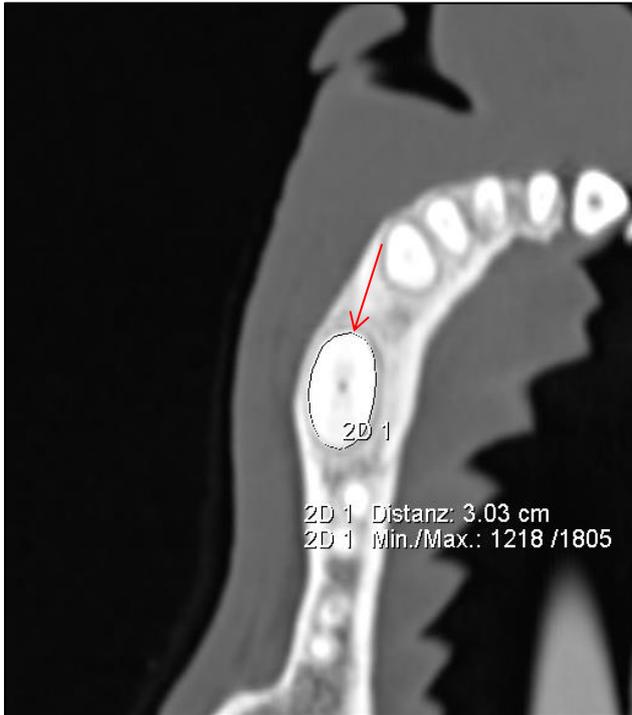
**Abbildung 10:** Darstellung des Parodontalspalt. Der Parodontalspalt ist deutlich als hypodense Struktur rund um die Zahnwurzel herum darstellbar (roter Pfeil). Durch eine Veränderung des Kontrastes kann der Parodontalspalt genauer dargestellt werden. Fokussiert wurde der Parodontalspalt eines linken OK Caninus (in der Abbildung rechts) bei Proband Nummer 16 in einem Knochenfenster „Schädel Hund H75 70S“.



**Abbildung 11: Schematische Darstellung der Schichten bei einer Zahnwurzelvermessung. Auf jeder Ebene (= Linie) wird der Umfang der Zahnwurzel durch manuelles Umfahren vermessen. Die oberste Linie stellt die Messung auf Höhe des Cingulum und die vorletzte auf Höhe des Wurzelapex dar. Der Abstand zwischen zwei Messebenen beträgt 0,75mm.**

In jeder Schicht wurde der Umfang, mit der Funktion „2D-beliebige Linie“, manuell mit der Maus umfahren und es wurden pro Schicht ca. 25 Punkte markiert (siehe Abb. 12). Diese ergaben bei Wiederanklicken nach dem Umrunden des ersten Punktes ein geschlossenes Gebilde, den Umfang. Insgesamt wurden auf diese Weise an den 28 Probanden 552 Zähne in ungefähr 15.000 Einzelmessungen vermessen, dies entspricht circa 13 Messungen pro Zentimeter Wurzellänge. Der durch das Umfahren erhaltene Umfang wurde in eine Excel-Tabelle übertragen. Zur Dokumentation wurde eine Abbildung der Wurzelumfangsvermessung gespeichert.

Bei mehrwurzeligen Zähnen wurden die einzelnen Wurzeln separat umfahren und in der Excel-Tabelle anschließend als Gesamtoberfläche addiert.



**Abbildung 12: Darstellung der Vermessungsmethode. Dargestellt ist ein manuell umfahrener rechter OK Caninus (roter Pfeil). In jeder Schicht wurde der Umfang, mit der Funktion „2D-beliebige Linie“, manuell mit der Maus umfahren und es wurden pro Schicht ca. 25 Punkte markiert. Diese ergeben bei Wiederanklicken nach dem Umrunden des ersten Punktes ein geschlossenes Gebilde, den Umfang. Der Umfang wurde im Datenblatt notiert und anschließend in der nächsten Ebene nach demselben Verfahren gemessen. Dargestellt ist Proband Nummer 16 in einem Knochenfenster „Schädel Hund H75 70S“.**

### 3.3 Datenverarbeitung

Die an der Syngo-Workstation vermessenen Umfänge wurden in eine Excel-Tabelle eingefügt. Es wurde ein Datenblatt für jedes Kieferviertel von jedem Hund erstellt. Die Datenblätter wurden wiederum in die jeweiligen Zähne des Kieferviertels unterteilt. So erhielt man pro Kieferquadranten eine Datei, in der sich für jeden Zahn ein eigenes Datenblatt befand. Das Datenblatt wurde so formatiert, dass nach Eingabe der einzelnen Umfangswerte die Gesamtoberfläche für die jeweilige Schicht berechnet wurde. Es wurde die Formel zur Berechnung eines Kegelstumpfes verwendet (Baumann, 2003) (Abb. 13). Um eine Annäherung an die tatsächliche Zahnform zu gewährleisten, wurde mit der Länge der Mantellinie (s) gerechnet. Die Länge der Mantellinie wurde mittels unten angegebener Formel ermittelt. Durch diese Kalkulation entstand ein rechtwinkliges Dreieck bestehend aus der Höhe h, der Differenz der Radien (R-r) und der Mantellinie s. Auf dieses rechtwinklige Dreieck wurde der Satz des Pythagoras  $a^2 + b^2 = c^2$  angewandt (Baumann, 2003). Würde die Mantellinie nicht mit einbezogen, würde irrtümlicherweise angenommen, dass der gemessene Umfang für die gesamte Schichtdicke von 0,75mm gilt. Da die Zahnwurzel sich allerdings verjüngt, müsste diese Annahme zu einem größeren Fehler führen.

Die folgende Formel wurde verwendet:

$$O = \pi * (R + r) * s = \pi * (R + r) * (0,075^2 + (R - r)^2)^{0,5}$$

$$s = (h^2 + (R - r)^2)^{0,5} = (0,075^2 + (R - r)^2)^{0,5}$$

$$r = \frac{U}{2 * \pi}$$

Hierbei gilt:

O = Wurzeloberfläche

r = Radius der vermessenen Schicht

R = Radius der nächsthöhergelegenen Schicht

s = Länge der Mantellinie

U = Umfang der Schicht

h = Höhe (= 0,075cm)

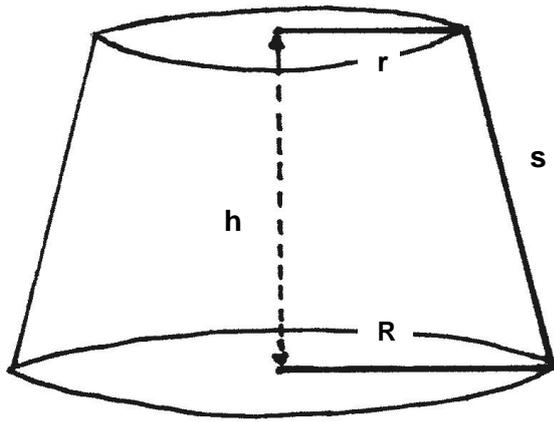


Abbildung 13: Mathematisches Modell zur Flächenberechnung einer Kegelstumpfoberfläche (nach Gruber et al., 2005)

Diese Rechnung wurde für alle Schichten jedes einzelnen Zahnes durchgeführt. Anschließend wurden die Einzeloberflächen zu einer Gesamtoberfläche zusammengerechnet und in das Ergebnisdatenblatt übertragen. In diesem sind die Gesamtwurzeloberflächen aller vermessenen Zähne aufgeführt (siehe Anhang 2).

#### 3.4 Statistische Methoden

Die statistische Datenanalyse erfolgte mit den statistischen Programmpaketen BMDP (Dixon, 1993) und R Library lme4 (Statistiksoftware R). Die zur bildlichen Darstellung verwendeten Graphen wurden mit MS Excel erstellt. Die Durchführung der statistischen Analyse erfolgte in der Arbeitsgruppe „Biomathematik und Datenverarbeitung“ des Fachbereichs Veterinärmedizin an der Justus-Liebig-Universität Gießen.

##### 3.4.1 Datenanalyse

Die erstellten Tabellen wurden in eine Datenmatrix der statistischen Software übertragen. Zur Untersuchung der entwickelten Fragestellungen wurde eine lineare Regressionsanalyse unter Angabe des Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) und der Regressionsgeraden ( $y = m * x + b$ ) durchgeführt. Mit Hilfe der Regressionsanalyse wurden Vorhersageregeln für die Variablen berechnet (Weiß, 2010). Die Regressionsgeradengleichung ergab die Umrechnungsformel, in der  $m'$  dem Regressionskoeffizienten und  $b'$  der additiven Konstanten entspricht.

Allerdings kann der Zusammenhang zwischen Wurzeloberflächen und Kronenhöhe der Zähne für den Unter- und Oberkiefer sowie jeweils für die rechte und linke Seite berechnet werden. Um zu überprüfen, ob zwischen diesen Varianten Unterschiede bezüglich der Regressionskoeffizienten bestehen, wurde unter Verwendung der „restricted maximum likelihood estimation“ („REML-Methode“) für „linear mixed-effect-Modelle“ aus dem Programmpaket R in Anlehnung an den Versuchsplan eine Überprüfung der Gleichheit der Regressionskoeffizienten zwischen Ober- und Unterkiefer an demselben Tier unter Berücksichtigung eines möglichen Seiteneffekts mit einer Varianzanalyse vorgenommen. Damit konnte gleichzeitig überprüft werden, ob ein Unterschied zwischen rechter und linker Kieferhälfte und zwischen Ober- und Unterkiefer bestand. Die Ergebnisse wurden in Form von ANOVA (Analysis of Variance-) -Tabellen dargestellt. Für die Daten wurde das folgende lineare Modell, welches gleichzeitig die für die Fragestellung notwendigen fixen und zufälligen potentiellen Einflussfaktoren enthält, mit unten angegebener Formel angepasst:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + b * x_{ijk} + K_j + S_k + b_j * x_{ijk} + \epsilon_{ijk}$$

Mit:

Y = abhängige Variable (z.B. Caninuswurzeloberfläche)

i = Hund-Nummer (i = 1,2,...,28)

j = Kiefernummer (1 = Unterkiefer; 2 = Oberkiefer)

k = Seitennummer (1 = rechts; 2 = links)

### 3 Material und Methode

$\mu$  = Achsenschnittpunkt auf y-Achse

$T_i$  = Einfluss des i-ten Tieres (zufälliger Effekt)

$b$  = gemeinsamer Regressionskoeffizient (Oberkiefer + Unterkiefer)

$x$  = unabhängige Variable (Prädiktor)

$x_{ijk}$  = Wert der unabhängigen Variable bei Tier  $i$ , Kiefer  $j$  und Seite  $k$

$K_j$  = Einfluss des Kiefers  $j$  (Unter- oder Oberkiefer) (fester Effekt)

$S_k$  = Einfluss der Seite  $k$  (rechts oder links) (fester Effekt)

$b_j$  = Abweichung des Regressionskoeffizienten für den Kiefer  $j$  vom gemeinsamen Regressionskoeffizienten  $b$  (Nebenbedingung:  $b_1 + b_2 = 0$ )

$\varepsilon_{ijk}$  = Zufallsabweichung

Nach Auswertung der durchgeführten Varianzanalyse mit diesem vollständigen Modell wurde ein vereinfachtes Modell angepasst, da bestätigt werden konnte, dass weder der Kiefer, noch die Seite einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Analyse hatten.

Der statistischen Analyse wurde ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  zugrunde gelegt. Dies bedeutet, dass generell Unterschiede bzw. Abweichungen unterhalb einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 5% ( $p = 0,05$ ) als statistisch signifikant betrachtet wurden. Zusätzlich wurde, wenn möglich, der exakte p-Wert angegeben.

### **3.5 Fehlerberechnung**

#### **3.5.1 Fehler der Vermessungsmethode**

Mit dem Ziel, den Messfehler der in dieser Studie angewandten Vermessungsmethode zu berechnen wurde die Methodik des Infimum und Supremum verwendet. Nach dieser Methode ist eine reelle Zahl  $s$  die größte untere Schranke oder Infimum einer Menge  $M$ , wenn  $s$  die untere Schranke von  $M$  ist und zudem jede Zahl  $> s$  nicht die untere Schranke von  $M$  ist. Dementsprechend gilt, dass eine reelle Zahl  $s$  das Supremum ist, wenn  $s$  die größte obere Schranke einer Menge  $M$  ist und jede Zahl  $< s$  nicht die obere Schranke von  $M$  ist (Heuser, 2009).

Wendet man dieses Prinzip auf die zugrunde liegende Vermessungsmethode an, so bedeutet dies, dass zwischen zwei gemessenen Ebenen eine Menge  $M$  besteht. Das Infimum ist immer die kleinere der beiden verglichenen Ebenen und das Supremum immer die größere der beiden Ebenen. Die kleinstmögliche Zahnwurzeloberfläche wurde berechnet, indem die unter Abschnitt 3.3 beschriebene Methodik ausschließlich auf die Infima angewendet wurde. Umgekehrt entstand die größtmögliche Zahnwurzeloberfläche unter Anwendung der Methodik (Abschnitt 3.3) auf die Suprema. Um die prozentuale Abweichung der Wurzeloberflächen bei ausschließlicher Verwendung der Suprema und Infima zu eruieren, wurde die Wurzeloberfläche der Suprema durch die Wurzeloberfläche der Infima dividiert. Diese Methodik wurde bei 25 zufällig ausgewählten Canini angewandt und daraus der durchschnittliche Vermessungsfehler gebildet.

#### **3.5.2 Fehler der Umrechnungsmethode**

Zur Fehlerberechnung der Umrechnungsmethode  $y = m * x + b$  wurde die Zahnwurzeloberfläche aller an dieser Studie teilnehmenden Probanden berechnet und die daraus resultierenden Werte mit den gemessenen Zahnwurzeloberflächen verglichen. Eine Umrechnung der Abweichung in Prozent wurde durchgeführt und der daraus resultierende Mittelwert als Gesamtfehler der Umrechnungsmethode verwendet.



## 4 Ergebnisse

### 4.1 Studienergebnisse

Die durch die REML-Methode erhaltenen ANOVA (Analysis of Variance) Tabellen erbrachten folgende Ergebnisse (siehe Tab. 5):

**Tabelle 5: Vergleich der Modelle mit- und ohne Kieferseparierung bezüglich des Regressionskoeffizienten. Die Tabelle fasst die Ergebnisse der mittels ANOVA verglichenen Modelle zusammen. Es wurde untersucht, ob ein Unterschied der einzelnen Paarungen besteht, wenn man diese für Ober- und Unterkiefer separat oder zusammen betrachtet. Die Paarungen stellen die miteinander verglichenen Parameterwerte dar. Der statistischen Analyse wurde ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  zugrunde gelegt.**

Paarung	p-Wert
C-Kronenhöhe – C-Wurzeloberfläche	0,777
R-Kronenhöhe – R-Wurzeloberfläche	0,417
C-Kronenhöhe – Summe der Incisivi	0,278
C-Wurzeloberfläche – Summe der Incisivi	*0,04622
C-Kronenhöhe – R-Wurzeloberfläche	0,875
C-Wurzeloberfläche – R-Wurzeloberfläche	0,857
C-Kronenhöhe – Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1	0,597
C-Wurzeloberfläche – R-Wurzeloberfläche + M1/P4-Wurzeloberfläche	0,619
R-Kronenhöhe – Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1	0,122

Die dargestellten p-Werte ergaben, dass nur bei einer Paarung einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Ober- und Unterkiefer nachgewiesen werden konnte. Dabei handelte es sich um die Regression zwischen Caninuswurzeloberfläche und der Summe der Incisivi. Bei allen anderen Analysen konnten somit Ober- und Unterkiefer zusammen betrachtet werden.

Die Auswertung der Varianzanalysen ergab, dass weder der Kiefer (ob Ober- oder Unterkiefer), noch die Seite (ob links oder rechts) einen statistisch signifikanten Einfluss hatten.

#### 4 Ergebnisse

Die Regressionsanalyse zwischen Caninuskronenhöhe und Caninuswurzeloberfläche ergab einen Regressionskoeffizienten von 3,284 und eine additive Konstante von -0,4387, also  $y = 3,284 * x - 0,4387$  (Abb. 14). Die statistische Signifikanz lag bei  $p < 0,0001$ .

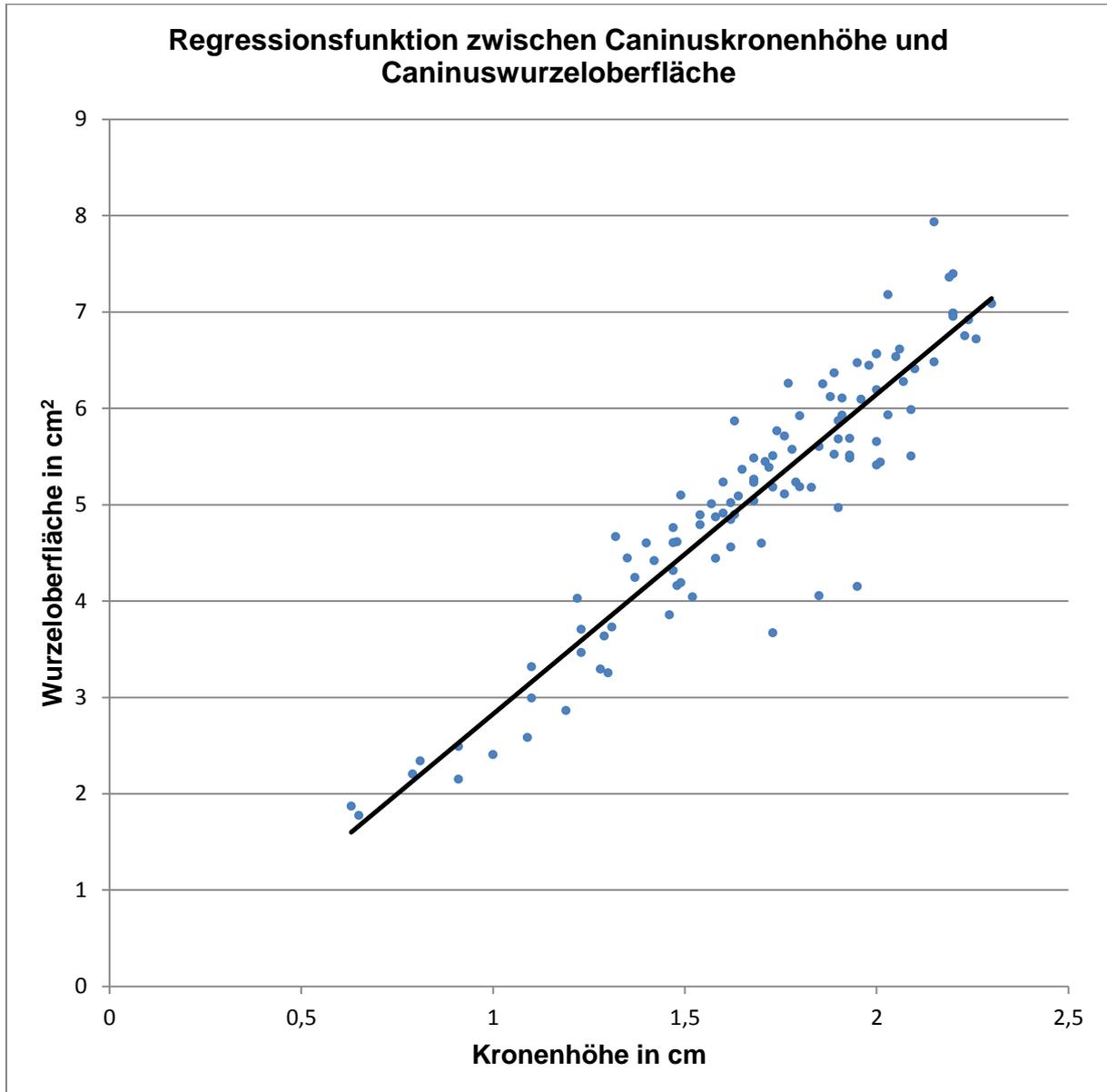


Abbildung 14: Regressionsfunktion zwischen Caninuskronenhöhe und Caninuswurzeloberfläche. Der Graph zeigt die Regressionsgerade zwischen Caninuskronenhöhe als unabhängige Variable und Caninuswurzeloberfläche als abhängige Variable. Die Regressionsgeradengleichung ergibt die klinisch relevante Umrechnungsformel  $y = 3,284 * x - 0,4387$ .

#### 4 Ergebnisse

Zwischen Reißzahnkronenhöhe und Reißzahnwurzeloberfläche ergaben sich ein Regressionskoeffizient von 3,761 und eine additive Konstante von 1,12, also  $y = 3,761 * x + 1,1185$  (Abb. 15). Die Ergebnisse waren statistisch hoch signifikant ( $p < 0,0001$ ).

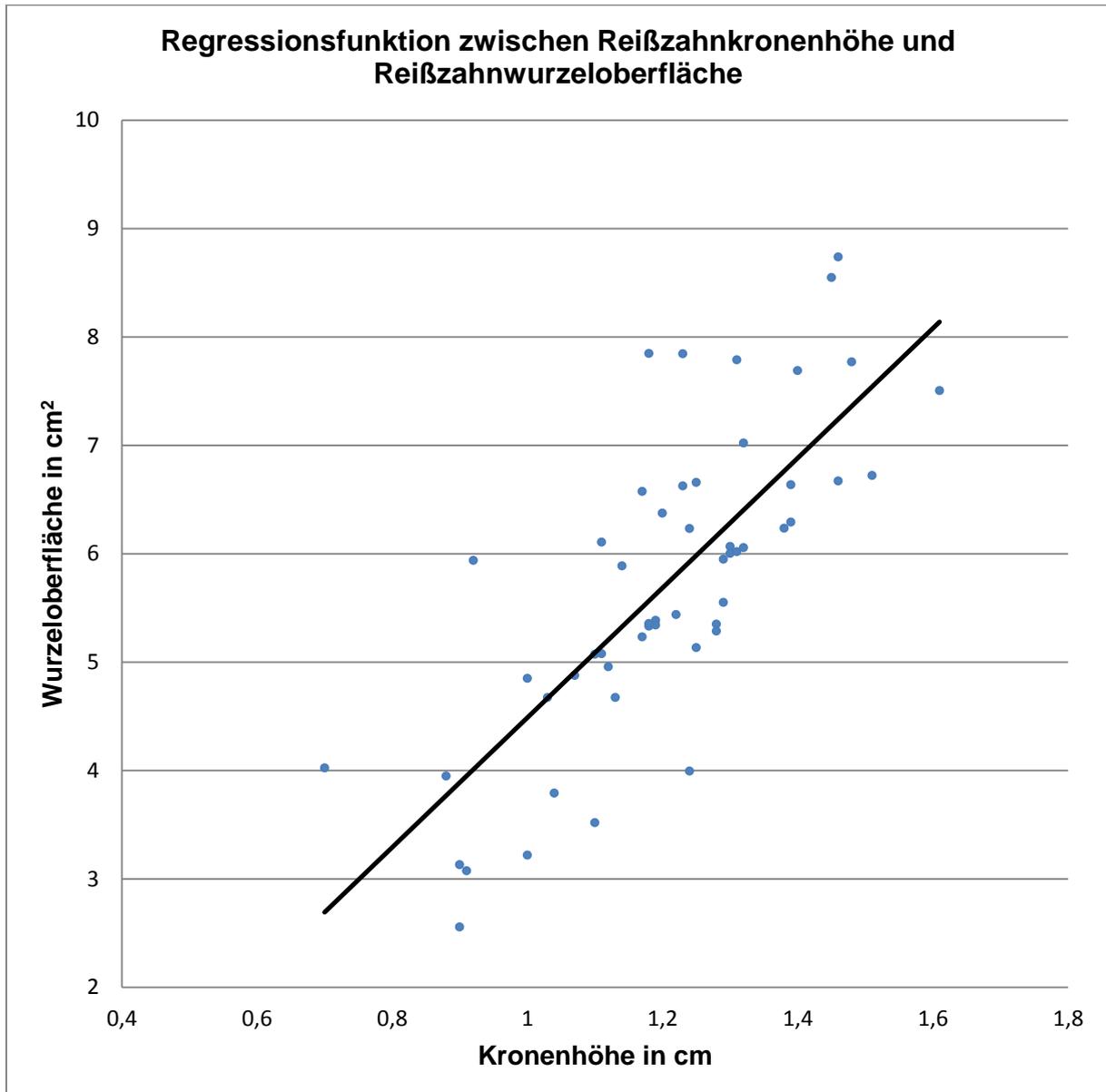
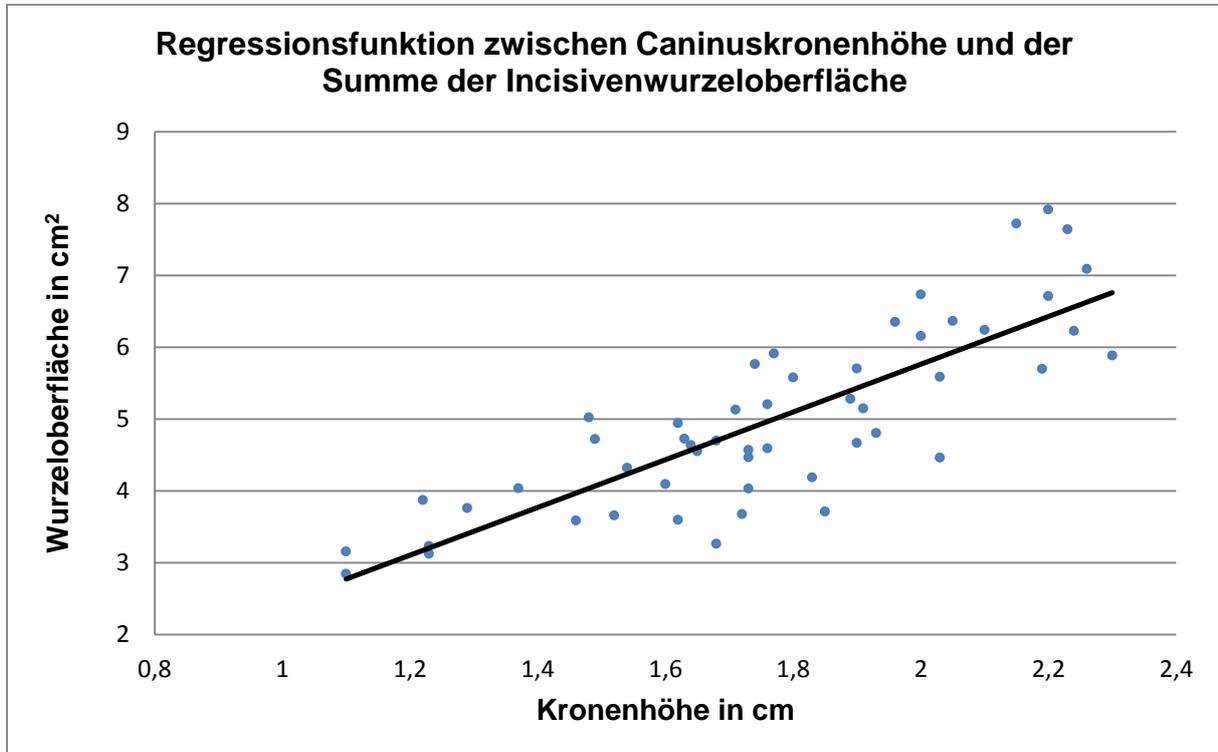


Abbildung 15: Regressionsfunktion zwischen Reißzahnkronenhöhe und Reißzahnwurzeloberfläche. Der Graph zeigt die Regressionsgerade zwischen Reißzahnkronenhöhe als unabhängige Variable und Reißzahnwurzeloberfläche als abhängige Variable. Die Regressionsgeradengleichung ergibt die klinisch relevante Umrechnungsformel  $y = 3,761 * x + 1,1185$ .

## 4 Ergebnisse

Der Regressionskoeffizient der Analyse zwischen Caninuskronenhöhe und der Summe der Incisivenwurzeloberfläche betrug 3,39 und die additive Konstante betrug -1,0, also  $y = 3,39 * x - 1$  (Abb. 16). Die statistische Signifikanz lag bei  $p < 0,0001$ .



**Abbildung 16: Regressionsfunktion zwischen Caninuskronenhöhe und der Summe der Incisivenwurzeloberfläche. Der Graph zeigt die Regressionsgerade zwischen Caninuskronenhöhe als unabhängige Variable und die Summe der Incisivenwurzeloberfläche als abhängige Variable. Die Regressionsgeradengleichung ergibt die klinisch relevante Umrechnungsformel  $y = 3,39 * x - 1$ .**

Gemäß den in Tabelle 6 dargestellten Ergebnissen war die Regressionsanalyse zwischen Caninuswurzeloberfläche und der Summe der Incisivenwurzeloberfläche mit einer zusätzlichen Konstante für Ober- und Unterkiefer (Kj; siehe Abschnitt 3.4.1) zu berechnen. Der Regressionskoeffizient betrug 0,83 und die additive Konstante lag bei 0,94. Außerdem war eine statistisch hohe Signifikanz bezüglich des Zusammenhangs festzustellen ( $p < 0,0001$ ).

Beim Vergleich von Caninuskronenhöhe und Reißzahnwurzeloberfläche betrug der Regressionskoeffizient -1,11 und die additive Konstante 7,50. Dieser Zusammenhang war jedoch statistisch knapp nicht signifikant ( $p = 0,07$ ).

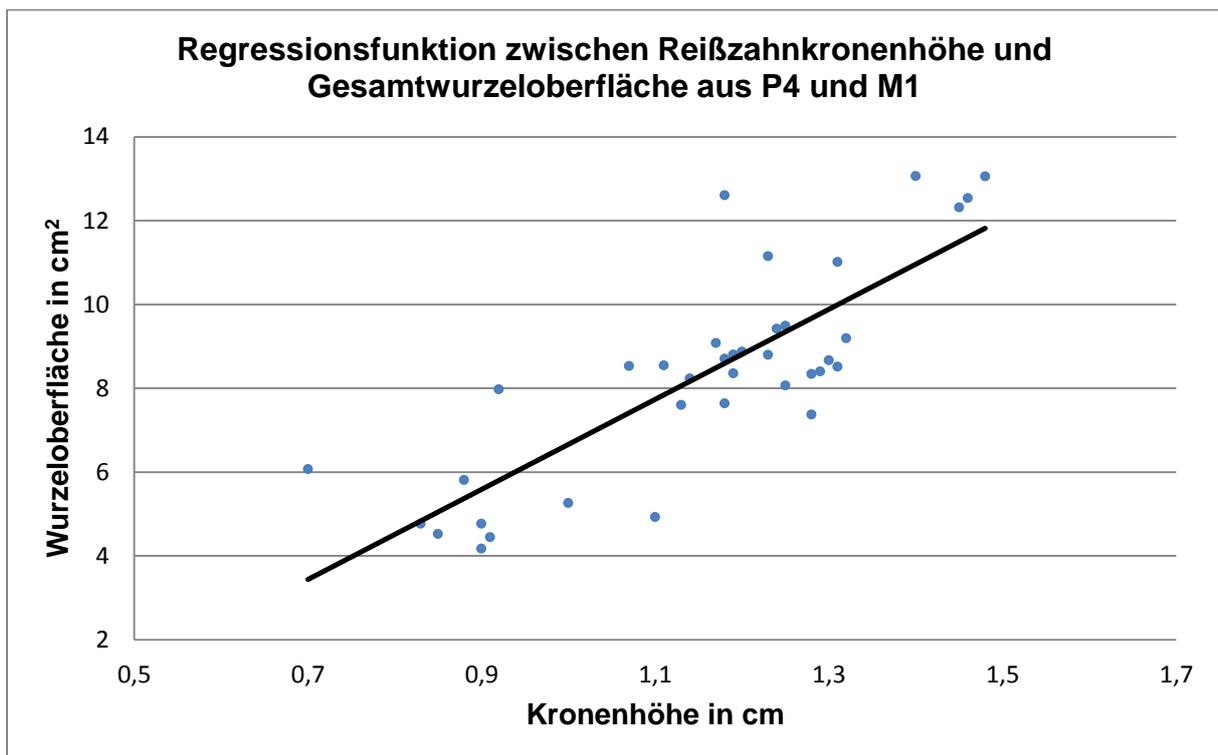
## 4 Ergebnisse

Auch der Vergleich von Caninuswurzeloberfläche und Reißzahnwurzeloberfläche zeigte keine statistische Signifikanz ( $p = 0,14$ ). Der Regressionskoeffizient betrug  $-0,33$  und die additive Konstante  $7,34$ .

Die Regressionsanalyse zwischen Caninus Kronenhöhe und Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1 lieferte statistisch nicht signifikante Werte,  $p$  betrug  $0,51$ . Der Regressionskoeffizient betrug  $-0,2771$  und die Konstante  $8,61$ .

Zwischen der Gesamtwurzeloberfläche des P4 und M1 und der Caninuswurzeloberfläche bestand ebenfalls kein statistisch signifikanter Zusammenhang ( $p = 0,76$ ). Die Regressionsanalyse ergab einen Regressionskoeffizienten von  $0,622$  mit einer additiven Konstante von  $6,71$ .

Der Zusammenhang zwischen Reißzahnkronenhöhe und der Summe aus Wurzeloberfläche des P4 und M1 war statistisch signifikant mit einem  $p = 0,0052$ . Der Regressionskoeffizient hatte einen Wert von  $4,225$  und die additive Konstante von  $3,23$ , also  $y = 4,225 * x + 3,23$  (Abb. 17).



**Abbildung 17: Regressionsfunktion zwischen Reißzahnkronenhöhe und der Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1. Der Graph zeigt die Regressionsgerade zwischen Reißzahnkronenhöhe als unabhängige Variable und der Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1 als abhängige Variable. Die Regressionsgeradengleichung ergibt die klinisch relevante Umrechnungsformel  $y = 4,225 * x + 3,23$ .**

## 4 Ergebnisse

Tabelle 6 fasst die mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse erhaltenen Ergebnisse zusammen.

**Tabelle 6: Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse nach der REML-Methode. Die Tabelle zeigt das Ergebnis des Zusammenhanges zwischen einer unabhängigen und einer abhängigen Variable. Die unabhängige Variable ist immer die erst genannte. Das Resultat wird aus einem Regressionskoeffizienten und einer additiven Konstante zusammengesetzt. Aus diesen Werten setzt sich die Regressionsfunktionsgleichung zusammen. Zur Überprüfung der statistischen Signifikanz wurde ein  $p < 0,05$  als relevant betrachtet.**

Paarung	Regressionskoeffizient	Additive Konstante	Statistische Signifikanz p
C-Kronenhöhe – C-Wurzeloberfläche	3,2844	-0,4387	< 0,0001
R-Kronenhöhe – R-Wurzeloberfläche	3,7604	1,1185	< 0,0001
C-Kronenhöhe – Summe der Incisivi	3,3903	-1	< 0,0001
C-Wurzeloberfläche – Summe der Incisivi	0,8267	0,9417	< 0,0001
C-Kronenhöhe – R-Wurzeloberfläche	-1,1097	7,5005	0,071
C-Wurzeloberfläche – R-Wurzeloberfläche	-0,32891	7,33684	0,14
C-Kronenhöhe – Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1	-0,2771	8,6105	0,51
C-Wurzeloberfläche – R-Wurzeloberfläche + M1/P4-Wurzeloberfläche	0,62246	6,70505	0,76
R-Kronenhöhe – Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1	4,225	3,232	0,0052

## 4.2 Fehlerberechnungsergebnisse

### 4.2.1 Fehler der Vermessungsmethode

Die durchschnittliche prozentuale Abweichung zwischen Infimum und Supremum der Wurzeloberfläche betrug 4,47%. Die durchschnittliche prozentuale Messungsungenauigkeit lag bei 2,18% (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 7: Fehlerberechnung der Vermessungsmethode. Die Vermessungsmethode wurde mittels der Infimum und Supremum Methode überprüft. Das Infimum stellt immer die kleinstmögliche Messung und das Supremum die größtmögliche Messung dar. Der Prozentuale Messfehler setzt sich aus der Differenz zwischen Infimum- und Supremum-Wurzeloberfläche zusammen.**

Caninus-Nummer	Prozentuale Differenz Infimum zu Supremum (%)	Prozentualer Messfehler (%)
1	1,6	0,7
2	2,7	1,3
3	2,5	1,2
4	2,7	1,4
5	4,8	2,4
6	6,1	3
7	4,9	2,4
8	8,8	4,3
9	7,5	3,7
10	4,5	2,2
11	6,8	3,3
12	5,7	2,8
13	7,4	3,6
14	5,5	2,6
15	8,6	4,2
16	4,5	2,2
17	4,9	2,4
18	6,5	3,2
19	3,9	1,9
20	2,7	1,3
21	3,7	1,8
22	0,6	0,3
23	0,6	0,3
24	1,8	0,9
25	2,5	1,2
<b>∅</b>	<b>4,47</b>	<b>2,18</b>

#### 4.2.2 Fehler der Berechnungsmethode

Bei der Umrechnung aus der Caninuskronenhöhe auf die Caninuswurzeloberfläche ergab sich der geringste Umrechnungsfehler, dieser betrug 7,68% (siehe Tabelle 8).

Die Umrechnung von Reißzahnkronenhöhe auf Reißzahnwurzeloberfläche war mit einem Fehler von 15,28% durchführbar (siehe Tabelle 8).

Wurde aus der Caninuskronenhöhe die Summe der Incisivenoberflächen berechnet, betrug der Fehler 11,77%. Bestimmte man aus der Caninuswurzeloberfläche die Summe der Incisivenoberflächen entstand ein Fehler von 14,24% (siehe Tabelle 8).

Bei der Umrechnung von Reißzahnkronenhöhe auf die Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1 entstand der höchste festgestellte Umrechnungsfehler mit 19,23% (siehe Tabelle 8).

**Tabelle 8: Fehlerberechnung der Umrechnungsmethode. Der Fehler der Umrechnungsmethode wurde aus dem Vergleich der gemessenen Werte und der an denselben Zahn errechneten Werte gebildet. Dieser Umrechnungsfehler muss in Form eines Sicherheitsfaktors in die spätere Kalkulation mit einfließen.**

<b>Paarung</b>	<b>Prozentualer Fehler (%)</b>
C-Kronenhöhe – C-Wurzeloberfläche	<b>7,68</b>
R-Kronenhöhe – R-Wurzeloberfläche	<b>15,28</b>
C-Kronenhöhe – Summe der Incisivi	<b>11,77</b>
C-Wurzeloberfläche – Summe der Incisivi	<b>14,24</b>
R-Kronenhöhe – Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1	<b>19,23</b>

## 5 Diskussion

### *5.1 Diskussion der eigenen Methodik*

#### **5.1.1 Vermessungstechnik**

Die in dieser Studie angewendete Vermessungsmethode ist eine Kombination aus manuellen Fertigkeiten und den zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln aus der verwendeten CT-Software. Sie beruht darauf, eine Zahnwurzel manuell mit der Computermaus zu umfahren und somit den Umfang der umrundeten Schicht zu messen.

Bevor man sich für die Verwendung des unter Abschnitt 3.2 beschriebenen Messverfahrens entschieden hat, werden verschiedene Messmöglichkeiten erörtert und in Erwägung gezogen. Mit Hilfe der computertomographischen Einstellungen und Hilfsmittel können einzelne Strukturen in einem dreidimensionalen (3D) Gitternetz auf dem CT abgebildet werden. Eine Möglichkeit sieht vor, die Zahnwurzel und den dazugehörigen Zahn jeweils einzeln in 3D darzustellen und diese 3D Abbildung aus der CT-Software auf einem übertragbaren Medium zu speichern. Anschließend könnte die so extrahierte Abbildung in einer mathematischen Software zur 3D-Oberflächenvermessung aufgerufen werden. Es kann jedoch klar festgestellt werden, dass das manuelle Umfahren der Zahnwurzel unerlässlich ist, da nur so gewährleistet werden kann, dass die tatsächliche Zahnwurzel umfahren wird und nicht einzelne Strukturen übergangen werden. Die Zahnwurzel ragt teilweise so dicht an die umgebende Alveole heran, dass der Parodontalspalt nicht sicher von der Alveole differenzierbar ist. Durch ein manuelles Umfahren ist es möglich an diesen Stellen den Parodontalspalt trotzdem zu vermessen, eine Tatsache welche bei einem computerisierten Verfahren nicht möglich ist. Die Dichteunterschiede, und somit auch die Grautondifferenzen, zwischen den einzelnen parodontalen Strukturen stellen keine absoluten, sondern relative Unterschiede dar, bei denen eine maschinelle Vermessung nicht sinnvoll ist, da manuell das Hounsfieldfenster einzustellen ist. Bei Vermessung durch einen geübten Untersucher wird in solchen Abschnitten die Zahnwurzel eindeutig von der Alveole differenziert und die Wurzeloberfläche korrekt dargestellt. Auch Unterbrechungen in der Zementoberfläche können nur durch das manuelle Umfahren des jeweiligen Areales eindeutig vermessen werden.

Planimetrische Verfahren, wie sie andere Studien verwenden, kommen bei dieser Studie nicht zum Einsatz, da eine extraktionsfreie Vermessung der Zahnwurzeloberfläche erfolgen sollte (Brown, 1950; Watt et al., 1958; Jepsen, 1963; Crabb & Wilson, 1974; Nicholls et al., 1974; Verdonschot et al., 1990; Smith & Massoudi, 1991 + 1992; Chen et al., 2004; Staudacher, 2009). Jede planimetrische Anwendung setzt allerdings eine Zahnextraktion voraus. Eine Zahnextraktion ist zwangsläufig mit einer Verletzung der parodontalen

Strukturen verbunden, dies führt zu einer Veränderung der Wurzeloberfläche, die somit falsch dargestellt wird.

Die letztendlich verwendete Vermessungstechnik wird in ähnlicher Art und Weise von Gruber und Mitarbeitern (2005) eingesetzt. Die Herausforderung dieser Methode liegt darin, dass sie sehr zeitintensiv ist und ein hohes Maß an Konzentration verlangt. Das Umfahren der einzelnen Wurzelschichten erfordert Übung und auch handwerkliches Geschick beim Umgang mit der Computermaus. Diese Nachteile lassen sich jedoch durch eine klare Organisation einfach beheben. Einen großen Vorteil stellt die sehr hohe Auflösung der erhaltenen CT-Bilder dar. Dadurch ist es möglich die Darstellungen auf den gesamten Bildschirm zu vergrößern und diese sogar bei fraglichen Abschnitten bis auf einzelne Pixel genau abzubilden. Die angewendete Methodik ist sehr gut reproduzierbar und daher auch bei einem wiederholten Vermessen von Zahnwurzeln anwendbar.

### **5.1.2 Limitationen der eigenen Untersuchung**

Um die festgestellten Studienergebnisse zu verifizieren, wäre eine erneute Vermessung der Zähne nach deren Extraktion ideal. Auch die Höhenvermessung der Zahnkrone wäre idealerweise an extrahierten Zähnen durchführbar, da dort der Übergang zwischen Zahnkrone und Zahnwurzel exakter darstellbar ist (Hölttä, 2004). Bei den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Hunden handelt es sich um Tiere, die von den Besitzern aufgrund einer Erkrankung in der Tierklinik vorgestellt werden und bei denen eine Zahnextraktion nicht in Frage kommt.

### **5.1.3 Fehlerberechnung**

Die Fehlerberechnung nach der Infimum und Supremum Methode ergibt einen Messfehler der verwendeten Vermessungsmethode von 2,18%. Dieser Messfehler ist als sehr gering anzusehen. Verdonschot et al. (1990) beschreibt einen Messfehler von 5,3%, während Chen und Mitarbeiter (2004) sogar einen Fehler von 9,58% beschreiben. Auf eine Caninuswurzeloberfläche gesehen bedeutet dies einen Unterschied von maximal ein bis zwei mm<sup>2</sup>. Dieser Unterschied ist klinisch nicht relevant, da die auf einen Zahn angewendeten Kräfte nicht in solch kleinen Dimensionen einstellbar sind. Der durch die Vermessung entstandene Fehler ist genauer als der durch oben genannte Studien festgestellte Fehler und muss somit nicht in die Berechnung einer Wurzeloberfläche einbezogen werden.

Der Umrechnungsfehler hingegen variiert stark zwischen den einzelnen Umrechnungsformeln und -parametern (siehe Tabelle 9, Abschnitt 4.2.2). Bei der klinischen

Anwendung der ermittelten Verhältnismäßigkeiten muss der Umrechnungsfehler in Form eines Sicherheitsfaktors beachtet und wie unter Abschnitt 5.2.4 erläutert angewandt werden. Die ermittelten Sicherheitsfaktoren sind für den klinischen Einsatz der hier festgestellten Umrechnungsregeln gut tolerierbar, da es so erstmals möglich ist, einzelne Zahnwurzeloberflächen zu berechnen.

### **5.2 Ergebnisinterpretation**

Ziel dieser Studie ist es, die Zahnwurzeloberflächen von klinisch orthodonten Patienten zu vermessen und eine Möglichkeit zu finden, mit deren Hilfe die Wurzeloberflächen jedes Patienten, individuell für die kieferorthopädisch relevantesten Zähne, bestimmt werden können. Die ermittelten Ergebnisse zusammen mit den daraus resultierenden Umrechnungsformeln erfüllen dieses Ziel, und mit deren Anwendung kann eine kieferorthopädische Therapie genauer und besser geplant werden. Bisher ist es nur möglich näherungsweise eine Wurzeloberfläche zu bestimmen (Wiggs & Lobprise, 1997). Mit den aufgestellten Berechnungsformeln kann die Wurzeloberfläche für jedes Tier bestimmt werden und somit ist die anzuwendende Kraft genauer berechenbar, womit sich die Risiken einer zu großen Kraftapplikation verringern.

#### **5.2.1 Rasseverteilung**

Es werden Hundegebisse von insgesamt 22 verschiedenen Rassen vermessen. Die Rassen variieren zwischen sehr kleinen, leichten Rassen (zum Beispiel Yorkshire Terrier) und sehr großen, schweren Rassen (zum Beispiel Berner Sennenhund oder Dobermann). Da bei Hunden die Kopfformen stark divergieren, sind von brachyzephalen Rassen (Boxer) über mesozepmale Rassen (Golden Retriever) bis hin zu dolichocephale Rassen (Malinois) alle Kopfformen vertreten. Diese Rassenvielfalt ist für die durchgeführte Studie wichtig, um ein repräsentatives Spektrum an unterschiedlichen Gebissformen und -größen zu vermessen. Eine separate Analyse für die einzelnen Gebissformen ist aufgrund des vorliegenden Patientengutes nicht möglich. Da die vorliegenden Ergebnisse allerdings eine sehr hohe statistische Signifikanz ( $p < 0,01$ ) der einzelnen überprüften Parameter aufweisen, ist davon auszugehen, dass unabhängig von der Rasse eines Tieres klare Zusammenhänge zwischen den Zahnkronen und den Zahnwurzeln eines Tieres bestehen. Die Rasse-, Größe- und Gewichtsvielfalt der Probanden gewährleistet, dass die ermittelten Umrechnungsformeln generell auf Hunde, unabhängig von Größe, Gewicht und Kopfform anwendbar sind.

### 5.2.2 Altersverteilung

Die Altersverteilung der Tiere variiert zwischen fünf Monaten und 13 Jahren mit einem Mittel von 74,5 Monaten (sechs Jahre und zwei Monate). Der Zahnapex bei drei Probanden aus großrahmigen Hunderassen im Alter von fünf bis sechs Monaten wird besonders kritisch untersucht. Bei diesen Hunderassen ist ein Wurzelschluss und ein Auswachsen der Canini früher zu erwarten ist als bei kleinen Hunderassen (Wiggs & Lobprise, 1997; Eickhoff, 2005). Der Wurzelapex ist bei allen Probanden geschlossen, und die Canini hochgewachsen. Nur unter diesen Voraussetzungen ist eine Messung der Probanden sinnvoll, da andernfalls die Zahnwurzel noch etwas wachsen würde, während die Zahnkrone schon ausgewachsen ist. Dadurch würde das Kronen-Wurzel-Verhältnis nicht korrekt dargestellt.

Bei den Probanden fortgeschrittenen Alters wurde ein besonderes Augenmerk auf eventuelle Abnutzungserscheinungen an den Zähnen gelegt. Eine Abnutzung der Kronen hätte aufgrund der dadurch deutlich kleineren Kronenhöhe ebenfalls zu einer Verschiebung des Ergebnisses beigetragen.

Die Altersstruktur der vermessenen Probanden lässt zu, dass die Ergebnisse dieser Studie auf Tiere unterschiedlichen Alters anwendbar sind; relevant ist lediglich, dass die Zähne ausgewachsen sind. Bei einer Vermessung noch nicht vollständig ausgewachsener Zähne wird das Kronen-Wurzeloberflächen-Verhältnis voraussichtlich kleiner ausfallen als bei den vermessenen, ausgewachsenen Zähnen. Die Zahnkrone wird wahrscheinlich relativ gesehen größer sein als die Zahnwurzel und daher das Verhältnis verkleinern. Zudem besteht die Möglichkeit, dass es noch zu keinem Verschluss des apikalen Wurzeldeltas gekommen ist und somit die Zahnwurzeloberfläche nicht final sondern partiell bestimmt werden kann, da die Wurzel ohne Spitze endet.

### 5.2.3 Geschlechterverteilung

Die Geschlechterverteilung zwischen weiblichen und männlichen Probanden liegt bei 1 zu 1. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass bei männlichen und weiblichen Hunden dieselben Verhältnismäßigkeiten zwischen Kronenhöhe und Wurzeloberfläche gelten. Daraus ergibt sich, dass die ermittelten Ergebnisse geschlechtsunabhängig verwendet werden können. Die Ergebnisse der Studie lassen den Schluss zu, dass eine kieferorthopädische Behandlung bei männlichen und weiblichen Tieren unter gleichen Voraussetzungen durchzuführen ist. In der Humanmedizin können Unterschiede bezüglich der Zahnkronenhöhe, sowie der Zahnwurzellänge zwischen männlichen und weiblichen Probanden festgestellt werden (Bjoerndahl et al., 1974; Verhoeven et al., 1979; Holttä et al., 2004). Es werden keine Unterschiede bezüglich der Zahnwurzeloberfläche zwischen Männern und Frauen untersucht.

Die Verteilung von kastrierten zu unkastrierten Hunden zeigt ein Verhältnis von ungefähr 1 zu 2. Einen Einfluss der Kastration auf das Zahnwachstum wird in der Literatur nicht beschrieben und kann in dieser Arbeit auch nicht festgestellt werden.

### 5.2.4 Zahnwurzeloberflächen

Die Ergebnisse der vorgelegten Arbeit zeigen, dass zwischen der Zahnwurzeloberfläche und der Zahnkronenhöhe sowie einzelner Zähne untereinander signifikante Verhältnismäßigkeiten bestehen, welche genutzt werden können, um eine kieferorthopädische Behandlung besser und effektiver zu planen und durchzuführen.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist es, ein Hilfsmittel für den praktischen Tierarzt zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Wurzeloberfläche eines Zahnes für jeden Patienten individuell berechnet werden kann. Bei kieferorthopädischen Behandlungen geht es um den zielgerichteten Einsatz von Dehnungs- und Zugkräften, wobei grundsätzlich leichte kieferorthopädische oder orthodontische Kräfte einzusetzen sind. Die Zahnbewegung verfolgt das Ziel, durch Knochenresorption und -apposition den Zahn in eine bestimmte Richtung zu bewegen, sodass ein möglichst physiologischer Biss entsteht (Wiggs & Lobprise, 1997; Eickhoff, 2005). Zu hohe Kräfte führen ab einem gewissen Punkt zur Einleitung der Hyalinisationsphase. Im Verlauf dieser Phase kann eine Verminderung der Vaskularisierung zu Nekrosen im parodontalen Gewebe und dadurch bedingt zu einer Fehlfunktion des Zahnes, bis hin zum Absterben, führen (Diedrich, 2000). Eine genaue Angabe über die maximalen Kräfte, die am Zahn pro Quadratzentimeter Zahnwurzel einwirken sollten, fehlt. Sowohl in der Veterinär-, als auch in der Humanmedizin verlässt man sich auf Werte, die durch theoretische Überlegungen geschätzt wurden (Schwarz, 1961). Diese besagen, dass die maximale Belastung pro Quadratzentimeter Zahnwurzeloberfläche bei 0,25N liegt (Schwarz, 1961).

Die vorgelegten Messungen liefern dem Kleintierpraktiker erstmals die Möglichkeit eine Zahnwurzeloberfläche nicht mehr schätzen zu müssen, sondern diese durch einfache Hilfsmittel und Kalkulationen zu berechnen. Zur Zahnwurzeloberflächenbestimmung muss die Kronenhöhe des Caninus und des Reißzahnes bestimmt werden. Das Cingulum dient als Anfangspunkt und die Caninus-/Reißzahnkronenspitze als Endpunkt der Zahnkronenhöhenvermessung. Die Messung erfolgt am besten mit Hilfe einer Schieblehre. Die Tiefenmessstange wird an der lingualen Caninuskronenfläche am Gingivarand aufgesetzt und der so ermittelte Wert in die jeweilige Formel aus Tab. 9, S. 79, eingesetzt. Durch diese Berechnungen ist es möglich, eine genaue Wurzeloberflächenangabe zu erhalten und auf dieser basierend die in einer kieferorthopädische Therapie anwendbaren Kräfte zu ermitteln.

Die erhaltenen Ergebnisse sind aufgrund der gezielten Probandenauswahl unabhängig von Rasse, Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht eines Tieres anwendbar. Da diese Studie an klinisch orthodonten Patienten durchgeführt wurde, ist keine verlässliche Angabe über die Verwendung der Ergebnisse bei Patienten mit Kieferanomalien (zum Beispiel einer Micrognathia inferior) möglich. Zwar ist davon auszugehen, dass bei einer Kieferanomalie die festgestellten Verhältnismäßigkeiten trotzdem zutreffend sind, da die Kieferknochen und Zähne unabhängig voneinander vererbt werden (Staudacher, 2009), eine verlässliche Angabe über die Verwendung der Ergebnisse dieser Studie bei nicht orthodonten Gebissen ist jedoch nicht möglich.

Ein Vorteil der ermittelten Ergebnisse liegt zudem darin, dass bei Patienten mit einer veränderten Caninus- oder Reißzahnkrone eine der drei verbleibenden Zahnkronen zur Wurzeloberflächenberechnung verwendet werden kann. Aus der ersten erstellten Regressionsanalyse und der angeschlossenen REML- Analyse ist zu schließen, dass die Verhältnismäßigkeiten kiefer- und seitenunabhängig berechnet werden können. Ob ein Zahn im rechten oder linken Kieferquadranten sitzt, beeinflusst seine Wurzeloberfläche nur minimal – bis gar nicht –, so dass der Unterschied statistisch nicht nachweisbar ist. Diese Tatsache ist durchaus logisch, da die Gegenannahme bedeuten würde, dass es zu einer unterschiedlich großen Ausprägung der Zähne je nach Seite und somit zu einem inkongruenten Gebiss kommen würde. Eine Ausprägung, die in einem physiologischen caninen Gebiss nicht gegeben ist (Thomé, 2004). Der Einfluss der Kieferhälfte (Ober- oder Unterkiefer) hingegen lieferte bei der Regressionsanalyse zwischen Caninuswurzeloberfläche und der Summe der Incisivenwurzeloberfläche statistisch signifikante Werte ( $p = 0,046$ ). Folglich wurde die anschließende Berechnung mit einer eigenen Konstante für die Kieferhälfte (Kj; siehe Abschnitt 3.4.1) berechnet. Eine Hypothese zur Erklärung für die vorgefundenen Differenzen zwischen Ober- und Unterkiefer besteht darin, dass die Incisivi des Oberkiefers kräftiger ausgebildet sind, als die Incisivi im Unterkiefer und sich dadurch die statistischen Differenzen ergeben (Thomé, 2004). Die Wurzeloberflächen der drei Dentes incisivi eines Kieferquadranten wurden in dieser Arbeit auch zu einer Gesamtincisivenwurzeloberfläche addiert. Der Grund für diese Maßnahme liegt darin, dass bei einer kieferorthopädischen Behandlung diese drei Zähne häufig zusammen verschoben werden oder als gemeinsame Verankerungsfläche dienen. Diese klinische Gegebenheit aufgreifend wurden nicht nur die einzelnen Wurzeloberflächen betrachtet, sondern die Summe direkt als einzelner Parameter verwendet. Dies führt zu einer starken Vereinfachung der späteren klinischen Anwendung, da so nicht jede Wurzeloberfläche einzeln berechnet und später die Summe gebildet werden muss. Auch die Anwendung der Studienergebnisse bei kieferorthopädischen Behandlungen von einzelnen Incisivi ist mit dem in Anhang 4 aufgezeigten Arbeitsblatt möglich.

## 5 Diskussion

Versucht man die Summe der Incisivenwurzeloberflächen zu berechnen, so wird man als Tierarzt immer mit der Caninuskronenhöhe als Ausgangsgröße vorgehen, obwohl dies auch aus der Caninuswurzeloberfläche möglich wäre. Zum einen da die Caninuskronenhöhe, im Gegensatz zur Wurzeloberfläche, äußerlich einfach zu messen ist; zum anderen da die Berechnung aus der Caninuswurzeloberfläche mit einem größeren mathematischen Fehler behaftet und somit nicht unbedingt praktikabel ist. Die Vergrößerung des mathematischen Fehlers ergibt sich daraus, dass nicht nur der Sicherheitsfaktor für die Incisivi, sondern auch der Sicherheitsfaktor aus der Berechnung der Caninuswurzeloberfläche in die Gleichung mit aufgenommen werden muss.

Statistisch nicht signifikante Ergebnisse ergeben sich bei der Analyse zwischen Caninuskronenhöhe oder -wurzeloberfläche und der Wurzeloberfläche des Reißzahnes. Dieses statistische Ergebnis lässt sich damit erklären, dass diese Zähne in einem Gebiss anatomisch weit voneinander entfernt liegen und funktionell deutlich zu unterscheiden sind (König & Liebig, 2005). Der Caninus hat als Hauptaufgabe, die Beute eines Fleischfressers zu fangen, er wird dabei von den Incisiven unterstützt, während der Reißzahn, wie der Name es besagt, eine beutereißende, also zerkleinernde Funktion besitzt. Zudem besitzen Caninus und Reißzahn die größten Wurzeloberflächen eines caninen Gebisses (Thomé, 2004). Aufgrund des anatomischen wie auch physiologischen Unterschiedes der beiden Zähne ist zu erklären, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kronenhöhe oder Wurzeloberfläche des einen zu der Wurzeloberfläche des anderen besteht.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch eine äußerliche Messung auf die in der Gingiva verborgene Wurzeloberfläche der kieferorthopädisch relevantesten Zähne zu schließen. Um dies zu erreichen werden anfangs neben der Kronenhöhe weitere Parameter bestimmt. Diese sind die Gaumenlänge, die Kopflänge, sowie die Breite und Höhe des Atlas und des Axis. Diese Parameter werden gewählt, da Riesenfeld (1949) einen Zusammenhang zwischen Gesichtslänge und Zahnwurzellänge untersucht und Riesenfeld & Siegel (1970) eine Beziehung zwischen fazialen Proportionen und relativer Zahnwurzellänge feststellen kann. Aufgrund der klinisch sehr schwierigen Messbarkeit dieser Parameter und der damit einhergehenden Irrelevanz für die Ziele dieser Studie, werden diese nicht weiter verwendet. Für diese Studie bedeutend sind der Regressionskoeffizient sowie die additive Konstante und die dazugehörige statistische Signifikanz. Eine Regressionsgerade setzt sich wie folgt zusammen:  $y = m * x + b$ . Y ist hierbei die abhängige und somit unbekannte Variable, welche berechnet werden soll (= Wurzeloberfläche). m steht für den Regressionskoeffizienten, x ist die unabhängige, bekannte Variable (= Kronenhöhe) und b steht für die additive Konstante. Die Umrechnungsformel entspricht der Formel einer Regressionsgeraden mit den eingesetzten Werten. Eine bekannte Größe x wird mit dem Regressionskoeffizienten multipliziert und anschließend die additive Konstante addiert.

## 5 Diskussion

Daraus ergibt sich der Wert für die abhängige, unbekannte Variable. Demzufolge ist es möglich aus der bekannten Variablen die unbekannte Variable zu bestimmen. Da für die Berechnung der Caninuswurzeloberfläche, der Summe der Incisivenwurzeloberfläche, der Reißzahnwurzeloberfläche und auch der Gesamtwurzeloberfläche aus P4 und M1 statistisch hochsignifikante Ergebnisse gegeben sind, ist es möglich die oben genannten Wurzeloberflächen zu berechnen. Als unabhängige Variable fungiert meistens eine Kronenhöhe (nur in einem Fall eine Wurzeloberfläche) und somit eine aus praktischer Handhabbarkeit äußerlich einfach zu bemessende Größe.

Wendet man diese Regeln an, so ergibt sich für die Berechnung der Caninuswurzeloberfläche die Möglichkeit, diese aus der Caninuskronenhöhe zu errechnen. Die resultierende Formel ist in diesem Fall:  $Caninuswurzeloberfläche (cm^2) = 3,2844 * Caninuskronenhöhe - 0,438$ . Da es sich um eine additive Konstante handelt, bedeutet dies, dass bei einem negativen Vorzeichen ein Subtrahieren der Konstante erfolgt. Der in dieser Studie festgestellte Umrechnungsfehler muss als Sicherheitsfaktor in die Berechnung mit einbezogen werden. Berechnet man auf diese Weise die Caninuswurzeloberfläche, muss ein Sicherheitsfaktor von 7,68% einkalkuliert werden.

Aus der Caninuskronenhöhe lässt sich in gleicher Art und Weise auch die Formel zur Berechnung der Incisivenwurzeloberfläche zusammensetzen. Die Formel dazu lautet:  $Incisivenwurzeloberfläche (cm^2) = 3,3903 * Caninuskronenhöhe - 1$ .

Der resultierende Sicherheitsfaktor liegt bei 11,77%.

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Incisivenwurzeloberfläche besteht darin, aus der errechneten Caninuswurzeloberfläche in einem zweiten Schritt die Incisivenwurzeloberfläche zu berechnen. Hierzu sollte folgende Formel angewandt werden:  $Incisivenwurzeloberfläche (cm^2) = 0,8267 * Caninuswurzeloberfläche + 0,9417$ .

Zu beachten ist allerdings, dass bei dieser Methode ein Sicherheitsfaktor von 14,24% entsteht. Zu diesem müssen die 7,68% Sicherheitsfaktor aus der Berechnung der Caninuswurzeloberfläche hinzugefügt werden. Dies ergibt eine deutlich niedrigere Genauigkeit der Incisivenwurzeloberfläche als bei der direkten Berechnung aus der Caninuskronenhöhe.

Auch die Reißzahnkronenhöhe kann zur Berechnung von Wurzeloberflächen verwendet werden. Möchte man die Reißzahnwurzeloberfläche berechnen sollte die Formel

$Reißzahnwurzeloberfläche (cm^2) = 3,7604 * Reißzahnkronenhöhe + 1,1185$  angewandt werden. Der Sicherheitsfaktor liegt bei 15,28%. Trotz der unterschiedlichen Wurzelanzahl zwischen den Reißzähnen im Ober- und Unterkiefer konnte kein statistisch relevanter Unterschied festgestellt werden. Möglicherweise liegt dies daran, dass im Unterkiefer zwar nur zwei Wurzeln vorhanden sind, diese aber deutlich massiver als im Oberkiefer ausgebildet sind; der Oberkieferreißzahn ist bekanntlich dreiwurzelig. Eine letzte Paarung

## 5 Diskussion

zur Regressionsanalyse bezieht sich darauf zu überprüfen, ob es möglich ist, aus der Reißzahnkronenhöhe die Summe der Wurzeloberflächen des P4 und des M1 zu berechnen. Der Sinn hinter dieser Überlegung liegt darin, dass bei einer kieferorthopädischen Behandlung die Verankerungsfläche nach Möglichkeit doppelt so groß sein sollte wie die Wurzeloberfläche des zu bewegenden Zahnes (Harzer, 1999; Staudacher, 2009). Aus diesem Grund wird als Verankerungsfläche für den Caninus häufig der Reißzahn und jeweils sein benachbarter Zahn (im Oberkiefer der M1, im Unterkiefer der P4) verwendet, um so eine zielgerichtete Caninusverschiebung zu erreichen. Möchte man die Summe der Wurzeloberflächen dieser Zähne berechnen, sollte folgende Formel angewandt werden:

*Summe der Wurzeloberfläche von P4 und M1 (cm<sup>2</sup>) = 4,225 \* Reißzahnkronenhöhe + 3,232.* Diese Umrechnung ist nur mit einem Sicherheitsfaktor von 19,23% möglich.

Die in dieser Arbeit ermittelten Wurzeloberflächen stimmen größtenteils mit den durch Wiggs und Lobprise (1997) angenommenen Wurzeloberflächen überein. Die durch Wiggs & Lobprise (1997) gewählten Gewichtsklassen können in dieser Arbeit nicht 1 zu 1 verglichen werden, da die Probandenauswahl eine andere Gewichtsklassenverteilung bedingen würde. Teilt man die in dieser Studie vermessenen Probanden in angenäherte Gewichtsklassen ein, so sind die Ergebnisse grob nachvollziehbar, allerdings führt das Einteilen in Gewichtsklassen bei vielen Patienten zu einer fälschlichen Annahme einer zu großen Wurzeloberfläche. Auch aus klinischen Überlegungen heraus macht eine solche Einteilung wenig Sinn. Als Beispiel nehme man einen übergewichtigen Cavalier King Charles Spaniel und einen normalgewichtigen Jagdterrier. Beide haben näherungsweise dasselbe Gewicht. Richtet man sich ausschließlich nach der Einteilung in Gewichtsklassen, so wird davon ausgegangen, dass beide Tiere gleich große Wurzeloberflächen haben. Die Praxis zeigt jedoch, dass der Jagdterrier ein deutlich ausgeprägteres und kräftigeres Gebiss als der Cavalier King Charles Spaniel hat. Vergleicht man die in dieser Studie vermessenen Wurzeloberflächen der Probanden, so lässt sich sehr schnell das Problem der Gewichtsklassenunterteilung erkennen. Die Kategorien sind unterteilt in < 4,5 Kilogramm (kg) Körpermaße (KM), < 11,3 kg KM, < 22,6 kg KM und < 40,8 kg KM. Es gibt in der vorliegenden Studie 3 Probanden mit einem Körpergewicht über 42 kg KM. Nach Wiggs & Lobprise (1997) gibt es für diese Tiere keine Kategorien um deren Wurzeloberfläche abzulesen, sodass man bei einer KFO- Behandlung keine verlässlichen Angaben hätte. Mit den in dieser Arbeit aufgestellten Regeln ist auch für diese Tiere möglich die Wurzeloberfläche zu bestimmen. Vergleicht man nun Proband 3 mit einem Gewicht von 38 kg KM mit Proband 8 mit einem Gewicht von 26 kg KM, so lässt sich feststellen, dass beide Tiere nach Wiggs & Lobprise (1997) in eine Kategorie fallen (Kategorie < 40,8 kg KM). Dies würde bedeuten, dass fälschlicherweise für beide Tiere dieselbe Wurzeloberfläche angenommen wird und somit auch theoretisch dieselbe Kraft auf die Wurzeln einwirken

## 5 Diskussion

sollte. Vergleicht man nun die tatsächlich, mit der CT-Untersuchung gemessenen Wurzeloberflächen, so lässt sich zeigen, dass Proband 3 ein bedeutend ausgeprägteres Gebiss und deutlich größere Wurzeloberflächen besitzt als Proband 8 (Caninuswurzeloberfläche Proband 3 = 7,93 cm<sup>2</sup>; Caninuswurzeloberfläche Proband 8 = 6,41 cm<sup>2</sup>).

Vergleicht man Proband 8 mit Proband 12 (Caninuswurzeloberfläche = 6,10 cm<sup>2</sup>), so zeigt sich, dass beide 26 kg KM aufweisen. Wiggs & Lobprise (1997) folgend müsste die Wurzeloberfläche dieser beiden Tiere nahezu identisch sein. Ein Vergleich der mittels CT gemessenen Wurzeloberflächen zeigt allerdings, dass Proband 8 größere Wurzeloberflächen aufweist als Proband 12. Selbiges Problem lässt sich beim Vergleich zwischen Proband 1 (Caninuswurzeloberfläche = 6,25 cm<sup>2</sup>) und Proband 23 (Caninuswurzeloberfläche = 5,23 cm<sup>2</sup>) feststellen, beide haben das gleiche Körpergewicht, aber erheblich divergierende Zahnwurzeloberflächen.

Die nach Wiggs & Lobprise (1997) gemessenen Wurzeloberflächen stellen einen nur groben Richtwert dar, und sind somit für den praktischen Einsatz nicht sicher. Die in dieser Arbeit aufgestellten Regeln lassen es zu, unabhängig von dem Gewicht eines Tieres, allein durch Messung intraoraler Größen, einen Rückschluss auf die Wurzeloberflächen zu ziehen. Die so ermittelten Daten sind weit genauer und für jedes Einzeltier individuell zu erstellen. Aufgrund der vielen verschiedenen Rassen und Gewichte der Probanden ist eine neutrale und korrektere Schätzung der Werte möglich.

Smith & Massoudi (1991, 1992) geben eine durchschnittliche Wurzeloberfläche des Oberkiefers P4 von 562.8 +/- 124.9 mm<sup>2</sup> und des Unterkiefers M1 von 497.1 +/- 116.2 mm<sup>2</sup> an. In der vorliegenden Arbeit konnte für den Oberkiefer P4 eine durchschnittliche Wurzeloberfläche von 531 mm<sup>2</sup> und für den Unterkiefer M1 von 590 mm<sup>2</sup> gemessen werden. Beide Werte liegen im Bereich der Durchschnittswerte, welche durch Smith & Massoudi (1991) angegeben werden. Der angegebene Fehler beträgt nach den Autoren ca. 22%-23%. In der vorliegenden Studie kann der Reißzahn mit einer Genauigkeit von 14% angegeben werden. Für die Berechnung des Caninus beträgt der Fehler sogar nur 7,68%. Darüber hinaus kann durch die dieser Arbeit zugrunde liegende Studie die Wurzeloberfläche für das Einzeltier zutreffend berechnet werden und nicht aus einem Durchschnitt angenommen werden. Zudem können in die Wurzeloberflächen nach den ermittelten Umrechnungsformeln für mehr Zähne pro Gebiss berechnet werden. Somit ist festzuhalten, dass eine kieferorthopädische Kraftapplikation mit einem geringeren Risiko möglich ist, da die zugrunde liegenden Wurzeloberflächen erheblich genauer angegeben werden können.

Die durch Staudacher (2009) veröffentlichten Zahnwurzelquotienten können ebenfalls näherungsweise bestätigt werden. Die festgestellten Zahnverhältnisse stimmen überein; allerdings sind die in dieser Arbeit aufgestellten Verhältnismäßigkeiten und die

## 5 Diskussion

Umrechnungsregeln genauer als dies bisher der Fall war. Staudacher (2009) rechnet mit Wurzelquotienten, wodurch die absolute Zahnwurzelgröße nicht berücksichtigt wird. Es kann somit keine Aussage über die anzuwendende Kraft getätigt werden. Mit den in dieser Studie erlangten Ergebnissen kann die absolute Zahnwurzeloberfläche berechnet werden und somit ist es auch möglich, die auf einen Zahn anwendbare Kraft zu errechnen – ein entscheidender Vorteil in Bezug auf den Ausgang einer kieferorthopädischen Therapie.

Durch die in dieser Studie bestimmten Wurzeloberflächen und die aufgestellten Regeln ist es erstmals in der Veterinärmedizin möglich, die Zahnwurzeloberflächen des caninen Gebisses für das Einzeltier mit einem geringen Fehler zu berechnen. Darüber hinaus wird eine so große Zahnanzahl in bisherigen veterinärmedizinischen Studien noch nicht zusammenhängend vermessen (Smith & Massoudi, 1991, 1992; Wiggs & Lobprise, 1997; Staudacher, 2009). Ein weiteres Novum stellt die Vermessung der Zahnwurzeloberfläche mit Hilfe der Computertomographie an nicht extrahierten und damit intakten Zähnen dar. Eine Tatsache, welche zu einer deutlichen Reduzierung des Fehlers und zu einer erheblichen Vergrößerung der Genauigkeit der Ergebnisse geführt hat.



### 6 Zusammenfassung

Die Zahnwurzeloberflächen sind von großer Relevanz für eine kieferorthopädische Behandlung, da ihre Größe direkt proportional zu den therapeutisch nutzbaren kieferorthopädischen Kräften ist, die ohne Schaden am Zahnhalteapparat auf den Zahn ausgeübt werden können. Ziel dieser Arbeit war es, die Wurzeloberflächen des caninen Gebisses zu quantifizieren sowie eine Möglichkeit zu finden, diese für das Einzeltier äußerlich bestimmen zu können.

Nach computertomographischer Untersuchung wurden 552 Zähne von 28 Hunden mit Hilfe von ca. 15.000 Einzelmessungen vermessen. Für jeden Zahn wurde die Wurzeloberfläche beginnend am Apex bis zum Cingulum nach einem Standardprotokoll bestimmt. Hierzu wurde in der axialen Schnittführung auf jeder computertomographischen Ebene der Wurzelumfang vermessen und aus diesem die Oberfläche des Abschnittes berechnet. Die Wurzelfläche jedes Zahnes ergab sich als Summe der vermessenen Abschnitte.

Basierend auf den Vermessungen wurden verschiedene Beziehungen der Zahnwurzeln untereinander sowie zu äußeren, im Fang befindlichen Strukturen – insbesondere der Kronenhöhe - gebildet. Die statistische Auswertung erfolgte mittels einer linearen Regressionsanalyse und der „restricted maximum likelihood estimation“ Methode (REML).

Die ermittelten Ergebnisse lassen es erstmals in der Veterinärmedizin zu, für jeden einzelnen caninen Patienten die Wurzeloberflächen seiner Zähne individuell zu bestimmen. Hierzu wurden verschiedene Regeln zur Berechnung kieferorthopädisch relevanter Oberflächen abgeleitet. So ist die Oberfläche der Caninuswurzel mathematisch aus der Kronenhöhe bestimmbar. Die mathematische Formel zur Berechnung lautet  $Caninuswurzeloberfläche (cm^2) = 3,2844 * Caninuskronenhöhe - 0,438$ .

Des Weiteren kann die Summe der Incisivenwurzeloberflächen mittels zweier Ansätze bestimmt werden. Zum einen kann bei bekannter Caninuswurzeloberfläche aus dieser die Summe der Incisivenwurzeloberflächen ermittelt werden. Die Formel zur Berechnung aus der Caninuswurzeloberfläche lautet  $Incisivenwurzeloberfläche (cm^2) = 0,8267 * Caninuswurzeloberfläche + 0,9417$ . Zum anderen ist die Incisivenwurzeloberfläche direkt aus der Caninuskronenhöhe berechenbar. Die Formel zur Bestimmung aus der Caninuskronenhöhe lautet

$Incisivenwurzeloberfläche (cm^2) = 3,3903 * Caninuskronenhöhe - 1$ .

Darüber hinaus gibt es auch für die Berechnung der Reißzahnwurzeloberfläche eine klinisch einsetzbare Umrechnungsformel. Die Berechnung der Reißzahnwurzeloberfläche ist ausschließlich aus der Reißzahnkronenhöhe möglich. Die Formel hierzu ist  $Reißzahnwurzeloberfläche (cm^2) = 3,7604 * Reißzahnkronenhöhe + 1,1185$ .

## 6 Zusammenfassung

Eine weitere Berechnungsmöglichkeit bietet die Betrachtung der Gesamtwurzeloberflächen aus M1 und P4 als Verankerungspunkt. Hierzu sollte folgende Formel angewendet werden:

*Summe der Wurzeloberfläche von P4 und M1 (cm<sup>2</sup>) = 4,225 \* Reißzahnkronenhöhe + 3,232.*

Mit dem Ziel der besseren Handhabung der kieferorthopädischen Therapie wurde ein Excel-Arbeitsblatt erstellt, aus welchem sich nach Vermessen der Caninus- und der Reißzahnkronenhöhe durch Anwendung programmierter Formeln automatisch die daraus resultierenden Zahnwurzeloberflächen, die Sicherheitsfaktoren, sowie die anwendbaren Kräfte in Newton und die empfohlenen Zahnkombinationen ablesen lassen (Anhang 4).

Für den Kieferorthopäden sind die gewonnenen Erkenntnisse von großer Bedeutung, da die Wurzeloberflächen der kieferorthopädisch relevantesten Zähne für das Einzeltier während der laufenden Behandlung bestimmt werden können. Damit steht ein Instrument zur Verfügung, mit dessen Hilfe die auf einen Zahn anzuwendenden Kräfte sowie die Gesamtgröße der Verankerungsfläche berechnet werden können. Auf diese Weise können kieferorthopädische Therapien effektiver und mit besserer Prognose geplant und risikoärmer und schneller durchgeführt werden.

## 7 Summary

The tooth root surfaces are of great importance for an orthodontic treatment because their size is directly proportional to the therapeutically useful orthodontic forces that may be used on the tooth without damaging the root. The aim of this study was to quantify the root surfaces of the canine teeth and to find a way to determine them externally for every individual animal.

552 tooth root surfaces of 28 dogs were measured after computed tomographic examination with the help of approximately 15.000 individual measurements. For each tooth, the root surface was determined from the apex to the cingulum following a standard protocol. To this end the root circumference was measured in the axial incision on each level of the computed tomographic image and the root surface of the section was calculated out of the circumference. The total root surface of each tooth was obtained as the sum of the measured sections.

Based on the measurements of the roots, different relationships with each other and to external located structures – especially the crown height – were formed. Statistical analysis was performed using linear regression analysis and the "restricted maximum likelihood estimation" method (REML).

The results obtained can be used for the first time in veterinary medicine to determine the root surface of canine teeth individually for each patient. Based on the survey results, various rules for the calculation of orthodontically relevant surfaces can be derived.

The root surface of the Cuspid can mathematically be derived from his crown height. The mathematical formula for calculating is *Cuspid root surface (cm<sup>2</sup>) = 3,2844 \* Cuspid crown height – 0,438*.

For the calculation of the sum of the incisors root surface two options could be found. Firstly, the root surface can be determined out of the Cuspid root surface.

The formula for the calculation is: *Summ of root surfaces of the incisors (cm<sup>2</sup>) = 0,8267 \* Cuspid root surface + 0,9417*. Furthermore, the root surface can be obtained directly from the Cuspid crown height. The formula for determination is *Summ of root surfaces of the incisors (cm<sup>2</sup>) = 3.3903 \* Cuspid crown height – 1*. In addition, there is a conversion formula, which can be used clinically for the root surface determination of the maxillary 4th premolar and the mandibular 1st molar. In this case the calculation of the root surface is only possible based on the crown height. The formula to be used equals *Root surface of 4th premolar or 1st molar (cm<sup>2</sup>) = 3.7604 \* crown height + 1.1185*.

## 7 Summary

Another possibility builds the calculation of the total root surface of the 4th premolar and the 1st molar as an anchor point. For this purpose, the following formula should be applied:

*Total root surface of 4th premolar and 1st molar (cm<sup>2</sup>) = 4.225 \* crown height + 3.232.*

In this case, the crown height of the maxillary 4th premolar and the mandibular 1st molar should be used.

With the aim of a more efficient handling of the orthodontic treatment an Excel spreadsheet was created. After the crown height has been measured, the resulting root surfaces, the safety factors, the applicable forces in Newton and the recommended combinations are automatically calculated by applying programmed formulas (Appendix 4).

The findings obtained are of great importance to the orthodontist because root surfaces of the orthodontically most relevant teeth can be determined for every individual animal during a treatment. This provides an available tool that allows calculating the applied forces to a tooth and the total size of the anchoring surface. Using the root surface calculation rules, which have been identified in this study, every orthodontic therapy can be planned more efficiently with a better prognosis and performed safer and faster.

## 8 Literaturverzeichnis

Bar-Am Y, Pollard RE, Kass PH, Verstraete FJ. The diagnostic yield of conventional radiographs and computed tomography in dogs and cats with maxillofacial trauma. *Vet Surg.* 2008; **37**: 294-299.

Baumann R. Geometrie für die 9./10. Klasse. Zentrische Streckung, Satz des Pythagoras, Kreis- und Körperberechnungen. 4. Auflage. Mentor-Verlag, München. 2003.

Bieniek HJ, Bieniek KW. Zahnheilkunde für die Kleintierpraxis. Enke Verlag, Stuttgart. 1993.

Björndal AM, Henderson WG, Skidmore AE, Kellner FH. Anatomic measurements of human teeth extracted from males between the ages of 17 and 21 years. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology.* 1974; **38**: 791-803.

Brook AH, Holt RD. The relationship of crown length to root length in permanent maxillary central incisors. *Proceedings of the British Paedodontic Society.* 1978; **8**: 17-20.

Brown R. A Method of Measurement of Root Area. *J Canad Dent Ass.* 1950; **16**: 130-132.

Carels CEL, Kuijpers- Jagtman AM, Van der Linden FPGM, Van't Hof MA. Age reference charts of tooth length in Dutch children. *J de Biologie Buccale.* 1991; **19**: 297-303.

Chen SK, Pan JH, Chen CM, Jeng JY. Accuracy of supported root ratio estimation from projected length and area using digital radiographs. *J Periodontol.* 2004; **75**: 866-871.

Chen SK, Pan JH, Lin CH, Leu LJ, Chen CM, Jeng JY. A pilot study applying digital Radiography for estimating ratio of supported single-root surface area. *J Periodontol.* 2005; **76**: 268-271.

Crabb JJ, Wilson HJ. A method of measuring root areas of extracted teeth. *Journal of Dentistry.* 1974; **2**: 171-174.

Diedrich P. Praxis der Zahnheilkunde. Band 11/II, Kieferorthopädie II. Urban & Fischer Verlag, München und Jena. 2000.

Dixon WJ (chief editon). *BMDP Statistical Software Manual, Volume 1 and 2.* University of California Press. Berkley, Los Angeles, London. 1993.

Eickhoff M. Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde bei Klein- und Heimtieren. Enke Verlag, Stuttgart. 2005. 1-61.

## 8 Literaturverzeichnis

Ericson S, Bjerklin K, Falahat B. Does the canine dental follicle cause resorption of permanent incisor roots? A computed tomographic study of erupting maxillary canines. *Angle Orthod.* 2002; **72**: 95-104.

Fahrenkrug P. *Handbuch der Zahnbehandlung in der Kleintierpraxis*. 4. Auflage. Albrecht Verlag, Aulendorf. 1988.

Floyd, MR. The modified Triadan System: Nomenclature for Veterinary Dentistry. *J Vet Dent.* 1991; **8**: 18-19.

Fuhrmann R, Langen HJ, Diedrich PR. Parodontale Diagnostik mittels hochauflösender Computertomographie. *Parodontologie.* 1994; **2**: 103-112.

Fuhrmann R, Wehrbein H, Diedrich PR. Dreidimensionale computertomografische Darstellung des bezahnten Alveolarkammes, ein radiologisch- histologischer Vergleich. *Fortschr. Kieferorthop.* 1993; **54**: 91-100.

Fuhrmann R, Wehrbein H, Langen HJ, Diedrich PR. Assessment of the dentate alveolar process with high resolution computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol.* 1995; **24**: 50-54.

Gianelly A. Force-induced changes in the vascularity of the periodontal ligament. *Am J Orthod.* 1969; **55**: 5-11.

Gillen RJ, Schwartz RS, Hilton TJ, Evans DB. An analysis of selected normative tooth proportions. *Int J Prosthodont.* 1994; **7**: 410-417.

Gioso MA, Shofer F, Barros PSM, Harvey CE. Mandible and Mandibular First Molar Tooth Measurements in Dogs: Relationship of Radiographic Height to Body Weight. *J Vet Dent.* 2001; **18**: 65-68.

Gottlieb B, Orban B. *Die Veränderungen im Gewebe bei übermäßiger Beanspruchung der Zähne*. Thieme Verlag, Leipzig. 1931. 25-60.

Graber TM, Swain BF. *Grundlagen und moderne Techniken der Kieferorthopädie*. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, Chicago, London, Sao Paulo und Tokio. 1989.

Gruber J, Kropf C, Schneider B, Gahleitner A, Solar P. Vermessung der Zahnwurzeloberfläche an vollbezahnten, parodontal gesunden Patienten mit Hilfe der Computertomographie. *Parodontologie.* 2005; **2**: 131-136.

Harvey CE, Shofer FS, Laster L. Association of age and body weight with periodontal disease in North American dogs. *J Vet Dent.* 1994; **11**: 94-105.

## 8 Literaturverzeichnis

Harzer W. Lehrbuch der Kieferorthopädie. Carl Hanser Verlag, München und Wien. 1999.

Hathcock JT, Stickle RL. Principles and concepts of computed tomography. Vet Clin North Am Small Anim Pract. 1993; **23**: 399-415.

Hechler SL. Cone-beam CT: applications in orthodontics. Dent Clin North Am. 2008; **52**: 809-823.

Heuser H. Lehrbuch der Analysis Teil 1. Vieweg + Teubner GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden. 17. Auflage. 2009. 71-76.

Hirschmann PN. Radiographic interpretation of chronic periodontitis (review). Int Dent J. 1987; **37**: 3-9.

Hofer M. CT-Kursbuch: Ein Arbeitsbuch für den Einstieg in die Computertomographie. 3. Auflage. Mattias Hofer Verlag Didamed. 2000. 6-14.

Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1. Description of system. Br. J. Radiol. 1973; **46**: 1016.

Hölttä P, Nyström M, Evälathi M, Alaluusua S. Root-crown ratios of permanent teeth in a healthy Finnish population assessed from panoramic radiographs. Europ J of Ortho. 2004; **26**: 491-497.

Hujoel PP. A meta-analysis of normal ranges for root surface areas of the permanent dentition. J Clin Periodontol. 1994; **21**: 225-229.

Jakobsson R, Lind V. Variation in root length of the permanent maxillary central incisors. Scand J of Dent Res. 1973; **81**: 335-338.

Jepsen A. Root Surface Measurement and a Method for X-ray Determination of Root Surface Area. Acta Odontol Scand. 1963; **21**: 35-46.

Kalender WA. Computertomographie, Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen. Publicis Corporate Publishing Verlag, Erlangen. 2. Auflage. 2006.

Kalender WA, Seissler W, Klotz E, Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. Radiology. 1990; **176**: 181-183.

König HE, Sótónyi P, Liebich HG, in König HE, Liebich HG. Anatomie der Haussäugetiere. Schattauer Verlag, Stuttgart. 2005. 310-319.

## 8 Literaturverzeichnis

Kramer M. Kompendium der Allgemeinen Veterinärchirurgie. Schlütersche Verlag, Hannover. 2004. 64-75.

Larheim T, Svanaes D, Johannessen S. Reproducibility of radiographs with the Orthopantomograph 5: tooth-length assessment. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology. 1984; **58**: 736-741.

Levin EI. Dental esthetics and the golden proportion. J Prosthet Dent. 1978; **40**: 244-252.

Linge BO, Linge L. Apical root resorption in upper anterior teeth. Eur J Orthod. 1983; **3**: 173-183.

Mah JK, Huang JC, Choo HR. Practical Applications of Cone-Beam Computed Tomography in Orthodontics. J Am Dent Assoc. 2010; **141**: 75-135.

Mahshid M, Khoshvaghti A, Varshosaz M, Vallaei N. Evaluation of "golden proportion" in individuals with an esthetic smile. J Esthet Restor Dent. 2004; **16**: 185-192.

Maret D, Telmon N, Peters OA, Lepage B, Treil J, Inglise JM, Peyre A, Kahn JL, Sixou M. Effect of voxel size on the accuracy of 3D reconstructions with cone beam CT. Dentomaxillofac Radiol. 2012; **41**: 649-655.

Marks SC, Cahill DR. Regional control by the dental follicle of alterations in alveolar bone metabolism during tooth eruption. J Oral Pathol. 1987; **16**: 164-169.

McGuire MK, Nunn ME. Prognosis versus actual outcome. II. The effectiveness of clinical parameters in developing an accurate prognosis. J Periodontol. 1996; **67**: 658-665.

McGuire MK, Nunn ME. Prognosis versus actual outcome. III. The effectiveness of clinical parameters in accurately predicting tooth survival. J Periodontol. 1996; **67**: 666-674.

Meschede D. Gerthsen Physik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 22. Auflage. 2010. 16-20.

Mowry JK, Ching MG, Orjansen MD, Cobb CM, Friesen LR, MacNeill SR, Rapley JW. Root surface area of the mandibular cuspid and bicuspid. J Periodontol. 2002; **73**: 1095-1100.

Möller C. Zur Diagnostik intrakranieller Neoplasien bei Hund und Katze durch vergleichende Anwendung der Magnetresonanztomographie und der Computertomographie. Inauguraldissertation Tiermedizinische Hochschule Hannover. 2009. 23-35.

Naito T, Hosokawa R, Yokota M. Three-dimensional alveolar bone morphology analysis using computed tomography. J Periodontol. 1998; **69**: 584-589.

## 8 Literaturverzeichnis

Nicholls JI, Daly CH, Kydd WL. Root Surface Measurements Using a Digital Computer. *J Dent Res.* 1974; **53**: 1338-1341.

Norisa O, Haslina T, Norehan M. Root-crown ratios of permanent teeth in Malay patients attending HUSM Dental Clinic. *Archives of Orofacial Sciences.* 2011; **6**: 21-26.

Nöller C. Klinisch-funktionelle Anatomie und computertomographische Darstellung der Nase bei normo- und brachycephalen Katzen. Inauguraldissertation Freie Universität Berlin. 2007. 38-43.

Pan JH, Chen SK, Lin CH, Leu LC, Chen CM, Jeng JY. Estimation of single-root surface area from true thickness data and from thickness derived from digital dental radiography. *Dentomaxillofac Radiol.* 2004; **33**: 312-317.

Perrett DI, May KA, Yoshikawa S. Facial shape and judgements of female attractiveness. *Nature.* 1994; **368**: 239-242.

Probst, FA. Dreidimensionale Untersuchungen zur Morphologie der oberen Frontzähne. 2007. 28-34.

Reitan K. Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment. *Am J Orthod.* 1976; **53**: 721-745.

Riesenfeld A. The effect of environmental factors on tooth development: an experimental investigation. *Acta Anatom.* 1949; **77**: 188-215.

Riesenfeld A, Siegel MI. The Relationship between Facial Proportions and Root Length in the Dentition of Dogs. *Am J Phys Anthropol.* 1970; **33**: 429-432.

Roes F. Kieferorthopädische Korrektur fehlgestellter Oberkiefer-Canini bei Hunden und Katzen. *Praktischer Tierarzt* 91. 2010; **3**: 190–198.

Rüsse I, Sinowatz F. Lehrbuch der Embryologie der Haustiere. Parey Buchverlag, Berlin. 1998.

Rygh P. Ultrastructural changes in tension zones of rat molar periodontium incident to orthodontic tooth movement. *Am J Orthod.* 1976; **70**: 269-281.

Saldamli B, Müller B. Mikro-Computertomographie für die dreidimensionale Charakterisierung von Implantaten und Geweben. *Sport-Orthopädie, Sport-Traumatologie.* 2010; **26**: 145-151.

## 8 Literaturverzeichnis

Salomon FV, Geyer H, Gille U. Anatomie für die Tiermedizin. Enke Verlag, Stuttgart. 2008. 251-265.

Sanford K, Bernard K, Lee M. Tooth root length-volume relationships, an aid to periodontal prognosis. 1. Anterior teeth. Oral Surg, Oral Med, Oral Pathol. 1954; **7**: 735-740.

Scarfe WC, Farman Ag, Sukovic P. Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice. J Can Dent Assoc. 2006; **72**: 75-80.

Schalk-van der Weide Y, Steen WHA, Bosman F. Taurodontism and length of teeth in patients with oligodontia. J of Oral Rehabilitation. 1993; **20**: 401-412.

Schnorr B, Kressin M. Embryologie der Haustiere. Enke Verlag, Stuttgart. 2006. 157-159.

Schwarz AM. Lehrgang der Gebissregelung. Band 1 + 2. Urban & Schwarzenberg Verlag, Wien. 1961.

Schwarz T. General prinziples in CT image planning. The European Association of Veterinary Diagnostic Imaging. Yearbook 2002: 9-23.

Sergl HG, Zentner A, Krause G. An experimental study of the esthetic effect of facial profiles. J Orofac Orthod. 1998; **59**: 116-126.

Seth V, Kamath P, Vaidya N. Cone beam computed tomography: third eye in diagnosis and treatment planning. Int J Orthod Milwaukee. 2012; **23**: 17-22.

Sherrard JF, Rossouw PE, Benson BW, Carrillo R, Buschang PH. Accuracy and reliability of tooth and root lengths measured on cone-beam computed tomographs. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2010; **137**: 100-108.

Smith MM, Massoudi LM. Potential attachment area of the first mandibular molar in dogs. Am J Vet Res. 1992; **53**: 258-261.

Smith MM, Massoudi LM. Potential attachment area of the fourth maxillary premolar in dogs. Am J Vet Res. 1991; **52**: 626-629.

Snow SR. Esthetic smile analysis of maxillary anterior tooth width: the golden percentage. J Esthet Dent. 1999; **11**: 177-184.

Statistiksoftware R (Free Software Foundation's GNU project, offizielle Homepage: <http://www.r-project.org>).

## 8 Literaturverzeichnis

Staudacher G. Kieferorthopädie bei Hund und Katze. Vet Punkt, Aachen. Schattauer Verlag, Stuttgart. 1. Auflage. 2009. 8-123.

Staudacher G. Welches Alter ist optimal für die kieferorthopädische Behandlung beim Hund? Praktischer Tierarzt. 2007; **11**: 870–877.

Stramotas S, Geenty JP, Darendeliler MA, Byloff F, Berger J, Petocz P. The reliability of crown-root ratio, linear and angular measurements when taken on panoramic radiographs. Clin Orthod Res. 2000; **4**: 182-191.

Swaddle JP, Cuthill IC. Asymmetry and human facial attractiveness: symmetry may not always be beautiful. Proc Biol Sci. 1995; **261**: 111-116.

Tatarunaite E, Playle R, Hood K, Shaw W, Richmond S. Facial attractiveness: a longitudinal study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2005; **127**: 676-682.

Thomé H. Mundhöhle und Schlundkopf. In Nickel R, Schummer A, Seiferle E. Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Band 2. Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg. 2004. 79-90.

Tian Y, Xu L, Meng HX, Lv PJ, Wang Y, Zhao YJ. Measurement and estimation of the root surface of single-root teeth. Beijing Da Xue Xue Bao. 2009; **41**: 32-35.

Tipold A, Tipold E. Computertomographische Untersuchung des Zentralnervensystems bei Kleintieren. Tierärztliche Praxis. 1991; **19**: 183-191.

Triadan H. Tierzahnheilkunde: Zahnerhaltung (Füllungstherapie mit „Composite Materials“ und Endodontie) bei Affen und Raubtieren. Schweiz. Arch. Tierheilk. 1972; **114**: 292-316.

Verdonschot EH, Sanders AJ, Plasschaert AJ. A Computer-Aided Image Analysis System for Area Measurement of Tooth Root Surfaces. J Periodontol. 1990; **61**: 275-280.

Verhoeven JW, van Aken J, van der Weerd GP. The length of teeth. A statistical analysis of the differences in length of human teeth for radiologic purposes. Oral Surg, Oral Med, Oral Pathol. 1979; **47**: 193-199.

Wang Y, He S, Yu L, Li J, Chen S. Accuracy of volumetric measurement of teeth in vivo based on cone beam computer tomography. Orthod Craniofac Res. 2011; **14**: 206-212.

Watt DM, MacGregor AR, Geddes M, Cockburn A, Boyd JL. A preliminary investigation of the support of partial dentures and its relationship to vertical loads. Dent Practit. 1958; **9**: 2–15.

Weiß C. Basiswissen Medizinische Statistik. Springer Verlag, Heidelberg. 5. Auflage. 2010.

## 8 Literaturverzeichnis

Wichelhaus A. Kieferorthopädie – Therapie Band 1: Grundlegende Behandlungskonzepte. Thieme Verlag, Stuttgart. 1. Auflage. 2013. 31-34.

Wiggs RB, Lobprise HB. Veterinary Dentistry: Principles & Practice. Lippincott Raven Publishers, Philadelphia and New York. 1997. 55-103.

Wiggs RB, Lobprise HB. Veterinary Dentistry: Principles & Practice. Lippincott Raven Publishers, Philadelphia and New York. 1997. 435-481.

Wolfart S, Thormann H, Freitag S, Kern M. Assessment of dental appearance following changes in incisor proportions. Eur J Oral Sci. 2005; **113**: 159-165.

## **Erklärung**

### **Erklärung zur Dissertation**

„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 Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten“.

Jakob Frieder Reufels



### **Danksagung**

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Großer Dank gilt Herrn Dr. Gerhard Staudacher für den ständigen Input und die Hilfe bei der Lösungssuche von alltäglichen Problemen. Auch Frau Maike Thiel gebührt mein Dank für das Anfertigen der verwendeten Skizzen.

Herr Prof. Dr. Dr. h.c. Martin Kramer möchte ich für die Unterstützung, die schnellen Korrekturen und für die Möglichkeit danken, diese Arbeit anzufertigen zu dürfen.

Herrn Dr. Klaus Failing und dem gesamten Team der Arbeitsgruppe für Biomathematik danke ich für die große Hilfe bei der statistischen Auswertung der Daten.

Ganz besonderen Dank möchte ich auch Herrn Dr. Jonathan Spreer von der „University of Queensland“ für den fortwährenden Beistand bei komplexen mathematischen Fragestellungen zollen.

Meiner Frau Marina, meinen Eltern, Geschwistern und Schwiegereltern danke ich am allermeisten, da sie es mir durch ihre unermüdliche Ermunterung erst ermöglicht haben, das Projekt „Dissertation“ zu bewältigen. Auch in scheinbar aussichtslosen Momenten habt ihr immer an mich geglaubt und mich unterstützt. Meine Dankbarkeit an Euch ist nicht in Worte zu fassen, ich werde sie Euch täglich entgegenbringen.



## Anhang

### **Anhang 1. Kieferorthopädische Behandlungsempfehlung**

Die Anwendung der ermittelten Umrechnungsformeln kann an folgendem Beispiel erläutert werden: Der Caninus, als der Zahn mit der mächtigsten Zahnwurzel, wird in der veterinärmedizinischen Kieferorthopädie sowohl bei einer bestehenden Fehlstellungen bewegt, als auch bei Fehlstellungen anderer Zähne als Verankerungspunkt genutzt. In beiden Fällen muss die Wurzeloberfläche ermittelt werden, um die auf den Zahn einwirkenden und somit die anwendbaren Kräfte genauer bestimmen zu können. Die Umrechnungsformel aus der Caninuskronenhöhe lautet

*Caninuswurzeloberfläche (cm<sup>2</sup>) = 3,2844 \* Caninuskronenhöhe – 0,438* (siehe Tab. 9).

Zur Ermittlung der Caninuskronenhöhe befindet sich der Patient bereits in narkotisiertem oder sediertem Zustand. Das Cingulum dient als Anfangspunkt und die Caninuskronenspitze als Endpunkt der Zahnkronenhöhenvermessung. Die Messung erfolgt am besten mit Hilfe einer Schieblehre. Die Tiefenmessstange wird an der lingualen Caninuskronenfläche am Gingivarand aufgesetzt, weil die Messung am lingualen Rand wesentlich einfacher durchzuführen ist als am labialen Rand. Zur genaueren Wertbestimmung werden jeweils für Oberkiefer und Unterkiefer die beiden Canini gemessen, um anschließend aus beiden Kronenhöhen den Mittelwert zu bestimmen. Mit Hilfe der Umrechnungsformel kann im nächsten Schritt die Wurzeloberfläche berechnet werden. Von der Caninuswurzeloberfläche müssen 7,68% als Sicherheitsfaktor subtrahiert werden. Damit wird sichergestellt, dass der Caninus in jedem Fall in seiner Position verändert wird, aber auf keinen Fall zu große Kräfte angewandt werden um die Hyalinisation zu vermeiden. Die kieferorthopädische Stellkraft ergibt sich aus der Caninuswurzeloberfläche multipliziert mit 0,25N.

Je nach Kraft-Wirkungs-Richtung muss die Kraft an den Incisiven, dem Reißzahn oder anderen bukkalen Strukturen verankert werden. Die Größe der Incisivenzahnwurzeloberfläche wird entweder aus der Caninuskronenhöhe errechnet, indem die Formel *Incisivenwurzeloberfläche (cm<sup>2</sup>) = 3,3903 \* Caninuskronenhöhe – 1* angewendet wird. Oder sie wird aus der Caninuswurzeloberfläche, mittels der Formel *Incisivenwurzeloberfläche (cm<sup>2</sup>) = 0,8267 \* Caninuswurzeloberfläche + 0,9417* berechnet. Zur praktischen Anwendung eignet sich die Formel zur Berechnung der Incisivenoberfläche aus der Caninuskronenhöhe besser als die Berechnung aus der Caninuswurzeloberfläche. Der Grund hierfür liegt im Sicherheitsfaktor. Bei der Berechnung aus der Caninuskronenhöhe entsteht ein Fehler von 11,77%, während bei der Berechnung aus der Caninuswurzeloberfläche der Fehler bei 14,24% liegt und zu diesem nochmals 7,68% Fehler aus der Berechnung der Caninuswurzeloberfläche hinzukommen. Der

## Anhang

Gesamtsicherheitsfaktor beläuft sich somit auf circa 22% da der Prozess zweistufig berechnet wird. Auch hier wird der Sicherheitsfaktor von der errechneten Zahnwurzeloberfläche subtrahiert. Durch diese Überlegung erreicht man, dass der Caninus definitiv bewegt wird, die Incisiven in ihrer physiologischen Position verbleiben und an keinen der beteiligten Zähne ungewollte Zahnverletzungen, bis hin zu Wurzelresorptionen, entstehen.

Soll der Caninus am Reißzahn verankert werden, wird folgende Formel verwendet:

$$\text{Reißzahnwurzeloberfläche (cm}^2\text{)} = 3,7604 * \text{Reißzahnkronenhöhe} + 1,1185.$$

Die Reißzahnkronenhöhermessung erfolgt analog zur Caninuskronenhöhermessung mit Hilfe der Schieblehre. Um den Reißzahn sicher nicht zu bewegen, ist der Sicherheitsfaktor von 15,28% zu subtrahieren. Reicht die so ermittelte Reißzahnwurzeloberfläche nicht aus, um die auf den Caninus anwendbare Kraft sicher zu verankern, muss der benachbarte Zahn, der M1 oder P4, mit in die Verankerung einbezogen werden. Hierzu muss die Formel

$\text{Summe der Wurzeloberfläche von P4 und M1 (cm}^2\text{)} = 4,225 * \text{Reißzahnkronenhöhe} + 3,232$  verwendet werden. Der einzukalkulierende Sicherheitsfaktor liegt bei 19,23%. Im Zweifelsfall sollten weitere Zähne in die Zahnverankerung mit einbezogen werden, da es keine zu große Verankerungsfläche gibt.

Um an den in der Therapie involvierten Zähnen eine ungewollte Hyalinisation zu vermeiden, ist von der möglichst kleinsten Wurzeloberfläche auszugehen. Nur so kann gewährleistet werden, dass die angewandten Kräfte nicht zu groß für die gewählten Zähne sind. So befindet sich auf jeder Seite der Kraftquelle eine Gruppe von Zähnen mit einer Gesamtwurzeloberfläche, die anzuwendende Kraft richtet sich immer nach der Gruppe mit der kleinsten Wurzeloberfläche.

Aus der berechneten Zahnwurzeloberfläche kann auch die auf jeden Zahn anzuwendende Kraft berechnet werden. Nach Schwarz liegt die maximale Kraft pro Quadratzentimeter Wurzeloberfläche bei 0,25N (Schwarz, 1961).

Zur besseren Handhabung der kieferorthopädischen Therapie wurde ein Arbeitsblatt erarbeitet (siehe Anhang 4). Aus diesem lassen sich nach Vermessen der Caninus- und der Reißzahnkronenhöhe automatisch die daraus resultierenden Zahnwurzeloberflächen, die Sicherheitsfaktoren, sowie die anwendbaren Kräfte in Newton ablesen. In diese Arbeitshilfe fließen die Erkenntnisse aus dem Wurzelquotienten nach Staudacher mit ein. Zudem sind in dieser Arbeitshilfe farblich differenzierte Zahnkombinationen in anschaulichen Kiefermodellen dargestellt, um den Therapeuten aufzuzeigen, welche Zähne miteinander

## Anhang

sicher kombiniert werden können. Diese Zahnkombinationen ergeben sich aus den in dieser Studie vermessenen Probanden.

Ist eine Zahnkombination nicht aufgezeigt, so muss der Therapeut lediglich die Zahnwurzeloberflächen der berechneten Zähne miteinander vergleichen und kann so auch die richtigen Zahnkombinationen erarbeiten.

**Tabelle 9: Gesamtübersicht zur Zahnwurzeloberflächenberechnung.**

Berechnung von	Umrechnungformel	Sicherheitsfaktor (%)
Caninuswurzel	<i>Caninuswurzeloberfläche (cm<sup>2</sup>) = 3,2844 * Caninuskronenhöhe – 0,438</i>	<b>7,68</b>
Reißzahnwurzel	<i>Reißzahnwurzeloberfläche (cm<sup>2</sup>) = 3,7604 * Reißzahnkronenhöhe + 1,1185</i>	<b>15,28</b>
Summe der Incisivenwurzel	<i>Incisivenwurzeloberfläche (cm<sup>2</sup>) = 3,3903 * Caninuskronenhöhe – 1</i>	<b>11,77</b>
Gesamtwurzel aus P4 und M1	<i>Summe der Wurzeloberfläche von P4 und M1 (cm<sup>2</sup>) = 4,225 * Reißzahnkronenhöhe + 3,232</i>	<b>19,23</b>

**Anhang 2. Ergebnisse der Zahnvermessung**

Tabelle 10: Vermessungsergebnisse der 28 vermessenen Probanden

Proband	OK li I1		OK li I2		OK li I3		Summe Incisivi OK li		OK li Caninuswurzeloberflaeche		OK li Caninuskronenhoehe		OK li P1		OK li P2		OK li P3	
	OLI1	OLI2	OLI1	OLI2	OLI3	OLI3	OLSI	OLCWO	OLCKH	OLP1	OLP2	OLP3	OLP1	OLP2	OLP3	OLP1	OLP2	OLP3
H1	1,4125	2,0897	2,4033				5,9055	6,2588	1,77	0,7756	1,7973	1,7389	0,7756	1,7973	1,7389	0,7756	1,7973	1,7389
H2	1,6267	1,7354	2,9848				6,3469	6,0933	1,96	1,1096	2,1089	2,713	1,1096	2,1089	2,713	1,1096	2,1089	2,713
H3	1,8558	2,3309	3,4477				7,6344	6,75	2,23	1,2958	2,292	3,52	1,2958	2,292	3,52	1,2958	2,292	3,52
H4	1,0776	1,38	2,1726				4,6302	5,0865	1,64	0,7025	1,4531	*	0,7025	1,4531	*	0,7025	1,4531	*
H5	1,2615	1,779	1,9786				5,0191	4,6135	1,48	0,7327	1,2387	1,3607	0,7327	1,2387	1,3607	0,7327	1,2387	1,3607
H6	1,3039	1,783	2,61				5,6969	5,8687	1,9	0,94	1,8813	2,2566	0,94	1,8813	2,2566	0,94	1,8813	2,2566
H7	1,8392	2,5026	3,569				7,9108	7,3952	2,2	1,2395	2,0895	2,7146	1,2395	2,0895	2,7146	1,2395	2,0895	2,7146
H8	1,4646	2,0223	2,8746				6,3615	6,5342	2,05	0,8578	1,5532	1,8513	0,8578	1,5532	1,8513	0,8578	1,5532	1,8513
H9	1,0577	1,3748	2,2328				4,6653	5,6811	1,9	0,7793	2,0232	2,4047	0,7793	2,0232	2,4047	0,7793	2,0232	2,4047
H10	0,9619	0,9135	1,6208				3,4962	3,728	1,31	0,5296	1,0803	1,0887	0,5296	1,0803	1,0887	0,5296	1,0803	1,0887
H11	1,3017	1,6018	2,2957				5,1992	5,1087	1,76	0,8802			0,8802			0,8802		
H12	1,411	1,9638	3,3562				6,731	6,5637	2	0,8019			0,8019			0,8019		
H13	1,4812	2,3787	3,2236				7,0835	6,7161	2,26	1,0156			1,0156			1,0156		
H14	1,3601	1,8895	2,6304				5,88	7,0854	2,3	1,0233			1,0233			1,0233		
H15								3,2933	1,28									
H16								4,4179	1,42									
H17								6,4798	2,15									
H18								5,6022	1,85									
H19								5,2308	1,79									
H20								6,9857	2,2									
H21								5,5724	1,78									
H22								5,9842	2,09									
H23								5,2314	1,6									
H24								2,2033	0,79									
H25								6,2751	2,07									
H26								4,9667	1,9									
H27								4,1484	1,95									
H28								2,1496	0,91									

Anhang

Proband	OK li Reisszahn (P4) Wurzeloberflaeche	OK li Reisszahn (P4) Kronenhoehe	OK li M1	OK li Summe Wurzeloberflaeche P4 und M1
	OLRWO	OLRKH	OLM1	OLSRM1
H1	4,8758	1,07	3,6479	8,5237
H2	5,3476	1,28	2,9875	8,3351
H3	7,7678	1,48	5,2822	13,05
H4	3,0728	0,91	1,368	4,4408
H5	2,5555	0,9	2,2056	4,7611
H6	5,384	1,19	2,9668	8,3508
H7	5,9358	0,92	2,0347	7,9705
H8	6,6564	1,25	2,8292	9,4856
H9	5,132	1,25	2,9298	8,0618
H10	*	*	1,495	*
H11	4,6715	1,03		
H12	5,4362	1,22		
H13	6,721	1,51		
H14	6,0553	1,32		
H15				
H16				
H17				
H18				
H19				
H20				
H21				
H22				
H23				
H24				
H25				
H26				
H27				
H28				

Anhang

Proband	OK li M2		OK re I1		OK re I2		OK re I3		Summe Incisivi OK re		OK re Caninuswurzeloberflaeche		OK re Caninuskronenhoehe		OK re P1	
	OLM2	ORI1	ORI2	ORI3	ORI3	ORSI	ORCWO	ORCKH	ORP1	ORP1	ORCKH	ORP1	ORCKH	ORP1		
H1	1,1825	1,364	1,7145	2,4948	5,5733	5,5733	5,9195	1,8	0,8489	1,8	0,8489					
H2	1,083	1,4836	1,8154	2,8549	6,1539	6,1539	6,1922	2	1,0623	2	1,0623					
H3	1,6447	1,5675	2,4487	3,7005	7,7167	7,7167	7,9337	2,15	1,3511	2,15	1,3511					
H4	0,4276	1,1338	1,4022	2,1804	4,7164	4,7164	5,096	1,49	0,6871	1,49	0,6871					
H5	0,8338	1,0794	1,2023	2,0371	4,3188	4,3188	4,8917	1,54	0,8035	1,54	0,8035					
H6	1,1054	1,3842	1,6555	2,7202	5,7599	5,7599	5,7648	1,74	0,9616	1,74	0,9616					
H7	*	0,8447	1,4237	3,4247	5,6931	5,6931	7,3589	2,19	1,5235	2,19	1,5235					
H8	0,6551	1,4553	1,8669	2,916	6,2382	6,2382	6,4088	2,1	0,7003	2,1	0,7003					
H9	0,6355	1,1616	1,4415	2,1978	4,8009	4,8009	5,6864	1,93	0,7881	1,93	0,7881					
H10	0,3547	0,7801	0,9688	1,4775	3,2264	3,2264	3,7029	1,23	0,5651	1,23	0,5651					
H11		1,0262	1,4989	2,0413	4,5664	4,5664	5,18	1,73	0,7902	1,73	0,7902					
H12		1,1256	1,5166	2,5	5,1422	5,1422	6,1032	1,91	0,9049	1,91	0,9049					
H13		1,7292	1,9659	3,0122	6,7073	6,7073	6,9867	2,2	1,1071	2,2	1,1071					
H14		1,1256	2,1286	2,9676	6,2218	6,2218	6,9161	2,24	1,16	2,24	1,16					
H15							3,2532	1,3		1,3						
H16							4,6	1,4		1,4						
H17							6,5627	2		2						
H18							5,1833	1,8		1,8						
H19							4,8699	1,58		1,58						
H20							6,9526	2,2		2,2						
H21							4,5966	1,7		1,7						
H22							5,5037	2,09		2,09						
H23							5,2632	1,68		1,68						
H24							2,3377	0,81		0,81						
H25							6,6134	2,06		2,06						
H26							5,4381	2,01		2,01						
H27							*	*		*						
H28							2,4037	1		1						

Anhang

Proband	OK re P2	OK re P3	OK re Reisszahn (P4) Wurzeloberfläche	OK re Reisszahn (P4) Kronenhöhe	OK re M1
	ORP2	ORP3	ORRWO	ORRKH	ORM1
H1	1,6188	1,8883	4,6726	1,13	2,9246
H2	2,0185	2,3482	5,5501	1,29	2,8423
H3	2,222	3,2904	7,6889	1,4	5,3652
H4	1,2213	1,1881	3,516	1,1	1,4054
H5	1,3053	1,3721	3,219	1	2,0386
H6	1,8632	2,7028	5,3397	1,19	3,4595
H7	2,1323	2,9495	7,8446	1,18	4,7568
H8	1,6672	1,7651	6,2314	1,24	3,1848
H9	1,6931	2,42	5,3303	1,18	3,3692
H10	0,9616	1,1986	3,1308	0,9	1,0369
H11			4,8489	1	
H12			5,2304	1,17	
H13			6,2333	1,38	
H14			4,9547	1,12	
H15					
H16					
H17					
H18					
H19					
H20					
H21					
H22					
H23					
H24					
H25					
H26					
H27					
H28					

Anhang

Proband	OK re Summe Wurzeloberfläche P4 und M1	OK re M2	UK li I1	UK li I2	UK li I3	Summe Incisivi UK li
	ORSRM1	ORM2	ULI1	ULI2	ULI33	ULSI
H1	7,5972	1,1487	1,2179	1,6269	1,8783	4,7231
H2	8,3924	1,0127	1,0825	1,3817	2,0015	4,4657
H3	13,0541	1,8974	1,2158	1,6337	2,4289	5,2784
H4	4,9214	0,6415	0,7918	1,1265	1,6662	3,5845
H5	5,2576	0,5748	0,581	0,8518	1,4076	2,8404
H6	8,7992	1,2425	0,8258	1,2213	1,6592	3,7063
H7	12,6014	1,4332	0,9175	1,7832	2,4269	5,1276
H8	9,4162	0,6176	1,2981	1,3823	2,012	4,6924
H9	8,6995	0,8574	0,9041	1,1237	1,6279	3,6557
H10	4,1677	*	0,6856	0,8098	1,1097	2,6051
H11			0,7594	1,1322	1,8648	3,7564
H12			0,6571	1,2944	1,6427	3,5942
H13			0,8036	1,3069	2,0709	4,1814
H14			1,096	1,4473	2,0441	4,5874
H15						
H16						
H17						
H18						
H19						
H20						
H21						
H22						
H23						
H24						
H25						
H26						
H27						
H28						

Anhang

Proband	UK li Caninus Wurzeloberflaeche	UK li Caninus Kronenhoehe	UK li P1	UK li P2	UK li P3	UK li P4	UK li Reisszahn (M1) Wurzeloberflaeche
	ULCWO	ULCKH	ULP1	ULP2	ULP3	ULP4	ULRWO
H1	5,8661	1,63	0,5519	1,4953	1,7047	2,2752	5,3536
H2	5,5069	1,73	0,7064	1,8022	2,3711	2,6629	5,9997
H3	5,5203	1,89	0,7583	*	2,9898	3,7659	8,546
H4	3,8556	1,46	0,4329	*	1,3679	1,8594	3,9477
H5	3,3155	1,1	0,5037	1,1888	1,3941	*	3,9917
H6	4,0527	1,85	0,6647	1,6667	2,1675	2,4959	6,3724
H7	5,4461	1,71	0,6228	1,8786	2,5021	3,2979	7,844
H8	5,0359	1,68	0,5999	1,1464	1,9875	2,1694	7,0202
H9	4,0398	1,52	0,5792	1,666	2,3165	2,4964	6,5729
H10	*	*	0,374	0,8452	1,2108	1,4683	3,2888
H11	3,6344	1,29	0,4895				5,0761
H12	5,0188	1,62	0,5523				6,0655
H13	5,1773	1,83	0,8109				7,5045
H14	5,7097	1,76	0,7349				6,6682
H15	2,8629	1,19					
H16	4,6667	1,32					
H17	6,2509	1,86					
H18	4,3135	1,47					
H19	4,8425	1,62					
H20	5,4827	1,93					
H21	4,1586	1,48					
H22	6,1175	1,88					
H23	4,7589	1,47					
H24	1,772	0,65					
H25	6,4433	1,98					
H26	5,6534	2					
H27	5,481	1,68					
H28	2,4875	0,91					

Anhang

Proband	UK li Reisszahn (M1) Kronenhoehe ULRKH	UK li Summe Reisszahnwurzeloberflaeche und P4	UK li M2		UK li M3		UK re I1		UK re I2	
			ULM2	ULM3	ULM3	ULM3	URI1	URI2		
H1	1,18		7,6288	1,2556	0,6215		1,0245	1,5191		
H2	1,3		8,6626	1,2725	0,4826		0,8913	1,3237		
H3	1,45		12,3119	1,7109	0,8213		1,2829	1,6883		
H4	0,88		5,8071	1,1086	0,1895		0,6906	1,038		
H5	1,24		*	0,8392	*		0,7267	0,8546		
H6	1,2		8,8683	1,7583	0,486		0,8945	1,2695		
H7	1,23		11,1419	2,4218	0,7056		*	*		
H8	1,32		9,1896	1,2748	0,436		1,0248	1,2399		
H9	1,17		9,0693	1,341	0,5027		0,7673	1,12		
H10	0,83		4,7571	0,7405	0,2946		0,6511	0,8158		
H11	1,11						0,7204	1,0328		
H12	1,3						0,9826	1,2449		
H13	1,61						1,1357	1,8175		
H14	1,46						1,1367	1,3386		
H15										
H16										
H17										
H18										
H19										
H20										
H21										
H22										
H23										
H24										
H25										
H26										
H27										
H28										

Anhang

Proband	UK re I3	Summe Incisivi UK re	UK re Caninus Wurzeloberflaeche	UK re Caninus Kronenhoehe	UK re P1	UK re P2	UK re P3	UK re P4
	URI3	URSI	URCWO	URCKH	URP1	URP2	URP3	URP4
H1	2,0026	4,5462	5,363	1,65	0,7116	1,4077	1,9199	2,0792
H2	1,818	4,033	4,2414	1,37	0,7161	1,6563	2,5478	2,4879
H3	2,6105	5,5817	7,1791	2,03	0,4793	2,1567	2,9288	3,7914
H4	1,5305	3,2591	5,2296	1,68	0,3439	*	1,468	2,042
H5	1,5718	3,1531	2,9915	1,1	0,4938	*	*	*
H6	1,8649	4,0289	3,6676	1,73	0,5904	1,7525	2,046	2,4362
H7	*	*	5,005	1,57	0,8877	1,828	2,5168	3,2211
H8	1,6048	3,8695	4,0255	1,22	0,5875	0,9086	1,6809	2,1661
H9	1,7852	3,6725	5,3857	1,72	0,6373	1,7376	2,2102	2,3424
H10	1,07	2,5369	*	*	0,3859	0,8307	1,1255	1,4626
H11	1,3669	3,1201	3,464	1,23	0,5511			
H12	1,8639	4,0914	4,9111	1,6	0,6372			
H13	1,9849	4,9381	4,5587	1,62	0,6693			
H14	1,9838	4,4591	5,9287	2,03	0,8287			
H15			2,5827	1,09				
H16			4,4448	1,35				
H17			6,3642	1,89				
H18			4,7905	1,54				
H19			4,4414	1,58				
H20			5,5125	1,93				
H21			4,1874	1,49				
H22			5,9279	1,91				
H23			4,6035	1,47				
H24			1,87	0,63				
H25			6,4701	1,95				
H26			5,4077	2				
H27			4,896	1,63				
H28			*	*				

Anhang

Proband	UK re Reisszahn (M1) Wurzeloberflaeche URRWO	UK re Reisszahn (M1) Kronenhoeh URRKH	UK re Summe Reisszahnwurzeloberflaeche und P4 URSRP4
H1	5,2831	1,28	7,3623
H2	6,0176	1,31	8,5055
H3	8,7359	1,46	12,5273
H4	4,0229	0,7	6,0649
H5	3,7887	1,04	*
H6	6,1042	1,11	8,5404
H7	7,7878	1,31	11,0089
H8	6,6241	1,23	8,7902
H9	5,8854	1,14	8,2278
H10	3,0558	0,85	4,5184
H11	5,0699	1,1	
H12	5,9467	1,29	
H13	6,6344	1,39	
H14	6,2898	1,39	
H15			
H16			
H17			
H18			
H19			
H20			
H21			
H22			
H23			
H24			
H25			
H26			
H27			
H28			

Anhang

Proband	UK re M2	UK re M3	Kopflänge	Gaumenlänge	Breite Atlas	Höhe Atlas	Gewicht kg
	URM2	URM3	KL	GL	BA	HA	Gew
H1	1,2886	0,5905	19,46	9,2	7,24	3,42	18
H2	1,4144	0,6012	21,63	10,37	8,09	3,26	18,4
H3	1,7914	0,8696	20,56	10,7	10,19	6,58	38
H4	1,2066	*	16,2	7,31	8,64	4,59	32,5
H5	0,549	*	16,8	8,02	6,59	3,2	12
H6	1,4905	0,4755	19,9	9,46	4,39	8,72	42,6
H7	1,9711	0,7329	22,97	10,71	8,88	4,61	33
H8	1,3292	0,3004	25,03	11,49	9,23	5,53	26
H9	1,3005	0,5278	21,36	10,36	8,4	5,15	37
H10	0,7982	0,36	15,07	7,66	5,44	3,09	6,2
H11							28
H12							26
H13							47
H14							42
H15							5
H16							23
H17							39
H18							23,5
H19							13,2
H20							38
H21							18,5
H22							18,5
H23							18
H24							9
H25							20
H26							43
H27							15
H28							8,5

\* = Zahnwurzel verändert oder nicht vorhanden

**Anhang 3. Ergebnisse der statistischen Analyse**

1. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLCKH, ULCKH, ORCKH, URCKH

abhängig: OLCWO, ULCWO, ORCWO, URCWO

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

Data: a3.df AIC BIC logLik deviance REMLdev

152.5 163.2 -72.24 139 144.5

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	0.081849	0.28609
Residual		0.163631	0.40451

Number of obs: 108, groups: Proband, 28

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept) -	<b>0.4387</b>	0.2651	- 1.655	0,16
unab	<b>3.2844</b>	0.1529	21.474	<0,0001

Correlation of Fixed Effects:

	(Intr)
unab	-0.968

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

## Anhang

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi Df	Pr(>Chisq)
fit1	6	150.01	166.11	-69.007			
fit2	7	151.93	170.71	-68.966	0.0804	1	<b>p value: 0.7768</b>

---

---

2. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLRKH, ULRKH, ORRKH, URRKH

abhängig: OLRWO, ULRWO, ORRWO, URRWO

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

Data: a3.df AIC BIC logLik deviance REMLdev

114 122.1 -53.02 106.1 106

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	0.89143	0.94416
Residual		0.19880	0.44587

Number of obs: 55, groups: Proband, 14

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept)	<b>1.1185</b>	0.8044	1.390	0,0006
unab	<b>3.7604</b>	0.6424	5.853	<0,0001

Correlation of Fixed Effects:

(Intr)

unab -0.947

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi Df	Pr(>Chisq)
fit1	6	89.26	101.30	-38.63			
fit2	7	90.60	104.65	-38.30	0.6597	1	<b>p value: 0.4167</b>

3. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLCKH, ORCKH, ULCKH, URCKH

abhängig: OLSI, ORSI, ULSI, URSI

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

	Data: a3.df	AIC	BIC	logLik	deviance	REMLdev
	122.9	130.8	-57.45	112.1	114.9	

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	0.077728	0.27880
	Residual	0.440643	0.66381

Number of obs: 53, groups: Proband, 14

Anhang

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept) -	<b>1.0002</b>	0.5955	- 1.68	0,0075
unab	<b>3.3903</b>	0.3329	10.18	<0,0001

Correlation of Fixed Effects:

(Intr)

unab -0.980

---

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi Df	Pr(>Chisq)
fit1	6	102.00	113.82	-44.998			
fit2	7	102.82	116.61	-44.410	1.1746	1	<b>p value: 0.2785</b>

---

4. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhaengig: OLCWO, ORCWO, ULCWO, URCWO

abhaengig: OLSI, ORSI, ULSI, URSI

-----Ergebnis von fit2:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Data:	a3.df	AIC	BIC	logLik	deviance	REMLdev
		104.5	118.2	-45.23	77.43	90.45	

Anhang

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	0.097922	0.31293
Residual		0.213976	0.46258

Number of obs: 53, groups: Proband, 14

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p-value (aus t-Verteilung mit df = 34 )
(Intercept)	<b>0.9417</b>	0.6699	1.406	0.17
unab	<b>0.8267</b>	0.1131	7.309	<0.0001

Correlation of Fixed Effects:

	(Intr) unab
unab	-0.978

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi Df	Pr(>Chisq)
fit1	6	93.409	105.23	-40.704			
fit2	7	91.435	105.23	-38.717	3.9737	1	<b>p value: 0.04622 *</b>

5. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLCKH, ORCKH, ULCKH, URCKH

abhängig: OLRWO, ORRWO, ULRWO, URRWO

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

Data: a3.df AIC BIC logLik deviance REMLdev

128.2 136.1 -60.1 119.8 120.2

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	2.87837	1.6966
Residual		0.20575	0.4536

Number of obs: 53, groups: Proband, 14

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept)	<b>7.5005</b>	0.6867	10.922	<0,0001
unab	- <b>1.1079</b>	0.2949	- 3.757	0,071

Correlation of Fixed Effects:

(Intr)

unab -0.745

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

## Anhang

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi	Df	Pr(>Chisq)
fit1	6	101.97	113.79	-44.986				
fit2	7	103.95	117.74	-44.973	0.0248		1	<b>p value: 0.8748</b>

---

---

6. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLCWO, ULCWO, ORCWO, URCWO

abhängig: OLRWO, ULRWO, ORRWO, URRWO

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

Data: a3.df AIC BIC logLik deviance REMLdev

126.6 134.5 -59.31 115.5 118.6

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	2.92756	1.71101
Residual		0.18298	0.42777

Number of obs: 53, groups: Proband, 14

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept)	<b>7.33684</b>	0.60079	12.212	<0,0001
unab	- <b>0.32891</b>	0.07193	-4.573	0,14

Correlation of Fixed Effects:

(Intr)

## Anhang

unab -0.640

---

---

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi Df	Pr(>Chisq)
fit1	6	103.06	114.88	-45.530			
fit2	7	105.03	118.82	-45.514	0.0326	1	<b>p value: 0.8566</b>

---

---

7. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLCKH, ORCKH, ULCKH, URCKH

abhängig: OLSRM1, ORSRM1, ULSRP4, URSRP4

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

Data:	a3.df	AIC	BIC	logLik	deviance	REMLdev
	122.4	128.6	-57.18	116.8	114.4	

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	6.5736	2.5639
Residual		0.6325	0.7953

Number of obs: 35, groups: Proband, 10

Fixed effects:

Anhang

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept)	<b>8.6105</b>	1.3904	6.193	0,0026
unab	<b>-0.2771</b>	0.6614	-0.419	0,51

Correlation of Fixed Effects:

(Intr)

unab -0.805

---

---

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi Df	Pr(>Chisq)	
fit1	6	127.33	136.66	-57.662				
fit2	7	129.04	139.93	-57.522	0.2796	1		<b>p value: 0.597</b>

---

---

8. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLCWO, ULCWO, ORCWO, URCWO

abhängig: OLSRM1, ORSRM1, ULSRP4, URSRP4

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

	Data:	a3.df	AIC	BIC	logLik	deviance	REMLdev
		124.9	131.1	-58.46	116.5	116.9	

Random effects:

Anhang

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	6.70505	2.58941
Residual		0.62246	0.78896

Number of obs: 35, groups: Proband, 10

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept)	<b>8.6930</b>	1.1943	7.278	0,0003
unab	<b>-0.1050</b>	0.1628	-0.645	0,76

Correlation of Fixed Effects:

(Intr)

unab -0.718

---

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

	Df	AIC	BIC	logLik	Chisq	Chi Df	Pr(>Chisq)
fit1	6	127.63	136.97	-57.817			
fit2	7	129.39	140.27	-57.693	0.2465	1	<b>p value: 0.6196</b>

---

## Anhang

9. Gruppe zusammengehörender Paarungen:

unabhängig: OLRKH, ULRKH, ORRKH, URRKH

abhängig: OLSRM1, ORSRM1, ULSRP4, URSRP4

-----Ergebnis von fit1:-----

Linear mixed model fit by REML

Formula: abh ~ unab + (1 | Proband)

Data: a3.df AIC BIC logLik deviance REMLdev

116.8 123.2 -54.39 112 108.8

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Proband	(Intercept)	3.76451	1.94023
Residual		0.52347	0.72351

Number of obs: 37, groups: Proband, 10

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value	p value
(Intercept)	<b>3.232</b>	1.627	1.986	0,07
unab	<b>4.225</b>	1.304	3.240	0,0052

Correlation of Fixed Effects:

(Intr)

unab -0.923

---

-----Ergebnis der ANOVA:-----

Data: a3.df

Models:

fit1: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband)

## Anhang

fit2: abh ~ unab + Kiefer + Seite + (1 | Proband) + unab:Kiefer

Df AIC BIC logLik Chisq Chi Df Pr(>Chisq)

fit1 6 123.63 133.29 -55.813

fit2 7 123.23 134.51 -54.616 2.3951 1

**p value: 0.1217**

---

---

# Anhang

## Anhang 4. Auszug aus dem erarbeiteten Arbeitsblatt



**Tierärztliche Klinik  
Dr. Staudacher**

Aus der Tierärztlichen Klinik für Kleintiere Dr. Staudacher in Aachen

und

dem Klinikum Veterinärmedizin - Klinik für Kleintiere Chirurgie  
am Fachbereich Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Giessen



Jakob Inden
Dr. Gerhard Staudacher
Prof. Dr. Dr. h.c. Martin Kramer

Bitte tragen sie hier Ihre Messergebnisse ein:

Oberkiefer Caninus:	#
Unterkiefer Caninus:	#
Oberkiefer Reißzahn:	#
Unterkiefer Reißzahn:	#

**Messung:** Die Messung sollte mit Hilfe einer Schieblehre erfolgen. Die Tiefenmessstange sollte hierzu an der lingualen Caninuskronenfläche am Gingivarand aufgesetzt werden, um so die exakte Kronenhöhe ablesen zu können.  
Zur genaueren Wertbestimmung können jeweils für Oberkiefer und Unterkiefer die beiden Canini gemessen werden, um anschließend aus beiden Kronenhöhen den Mittelwert zu bestimmen.

**WURZELOBERFLÄCHEN OBERKIEFER** MAXIMALE KRAFT in Newton

Incisiven ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>

Caninus ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>

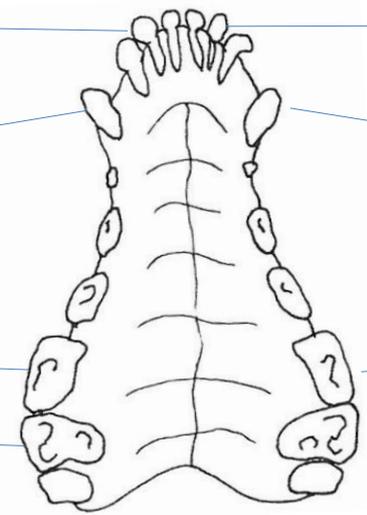
Reißzahn ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>

Summe aus Reißzahn  
und M1 ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>



##### Incisiven

##### Caninus

##### Reißzahn

##### Summe aus Reißzahn  
und M1

Reißzahn ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>

Summe aus Reißzahn  
und P4 ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>

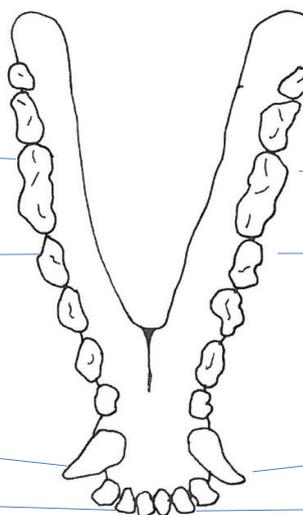
Caninus ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>

Incisiven ##### cm<sup>2</sup>

Fehler ##### cm<sup>2</sup>



##### Reißzahn

##### Summe aus Reißzahn  
und P4

##### Caninus

##### Incisiven

# Anhang



Aus der Tierärztlichen Klinik für Kleintiere Dr. Staudacher in Aachen

und

dem Klinikum Veterinärmedizin - Klinik für Kleintiere Chirurgie  
am Fachbereich Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Giessen



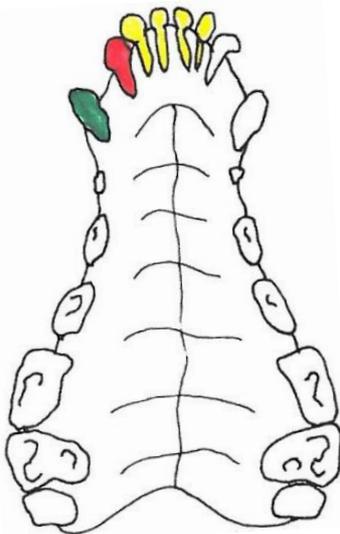
Jakob Inden

Dr. Gerhard Staudacher

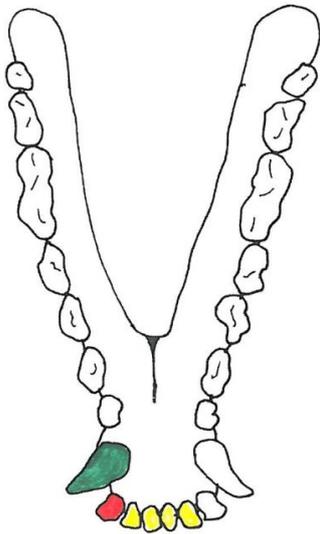
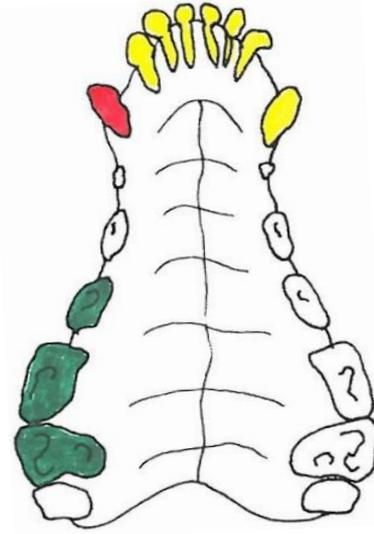
Prof. Dr. Dr. h.c. Martin Kramer

Empfehlung für eine sichere Verankerung des I3

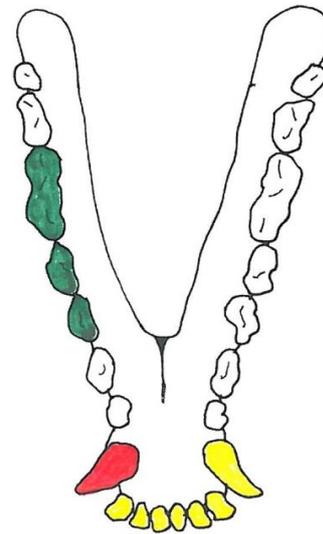
Empfehlung für eine sichere Verankerung des Caninus



Incisivenwurzeloberfläche: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche I1: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche I2: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche I3: ##### cm<sup>2</sup>  
 Caninuswurzeloberfläche: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche P3: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche P4: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche M1: ##### cm<sup>2</sup>  
 maximal anwendbare Kraft I3: ##### Newton  
 maximal anwendbare Kraft C: ##### Newton



Incisivenwurzeloberfläche: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche I1: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche I2: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche I3: ##### cm<sup>2</sup>  
 Caninuswurzeloberfläche: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche P3: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche P4: ##### cm<sup>2</sup>  
 Wurzeloberfläche M1: ##### cm<sup>2</sup>  
 maximal anwendbare Kraft I3: ##### Newton  
 maximal anwendbare Kraft C: ##### Newton



Fehlgestellter Zahn

2-fache Wurzeloberfläche

2-fache Wurzeloberfläche

Die Verankerungsempfehlungen entsprechen der 2-fachen Wurzeloberfläche des fehlgestellten Zahnes. Dies bedeutet, dass durch Anwendung der kieferorthopädischen Apparatur auf die farblich hinterlegten Zähne (Gelb und Grün) eine sichere Verankerung gewählt wird. So befindet sich auf jeder Seite der Kraftquelle eine Gruppe von Zähnen mit einer Gesamtwurzeloberfläche, die anzuwendende Kraft richtet sich immer nach der Gruppe mit der kleinsten Wurzeloberfläche.



*édition scientifique*  
**VVB LAUFERSWEILER VERLAG**

VVB LAUFERSWEILER VERLAG  
STAUFENBERGRING 15  
D-35396 GIESSEN

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

ISBN: 978-3-8359-6124-1



9 17 8 3 8 3 5 19 6 1 2 4 1 1

