

Aus dem Institut MESANTIS 3D DENTAL-RADIOLOGIE Berlin

DISSERTATION

Interradikuläres Knochenangebot für kieferorthopädische  
Minischrauben im Unterkieferalveolarknochen in digitalen  
Volumentomografien

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Christian Brauns

aus Breydin

Datum der Promotion: 09.09.2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kap.</b>		<b>Seite</b>
<b>1</b>	<b>Abstrakt .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Abstract.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>13</b>
3.1	Kieferorthopädische Verankerung von Minischrauben .....	13
3.2	Anatomische Verhältnisse im Unterkiefer .....	17
3.3	Digitale Volumentomografie in der Kieferorthopädie.....	18
<b>4</b>	<b>Fragestellung .....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>25</b>
5.1	Allgemeine Methodik .....	25
5.1.1	Patientengut.....	25
5.1.2	DVT-Aufnahmen .....	25
5.1.3	Auswertungssoftware und Befundungsmonitor .....	27
5.1.4	Allgemeine Messmethodik .....	28
5.1.5	Statistische Auswertung .....	29
5.1.6	Fehlerberechnung.....	30
5.2	Spezielle Methodik .....	30
5.2.1	Interradikuläres Knochenangebot von anterior nach posterior .....	30
5.2.2	Interradikuläres Knochenangebot von zervikal nach apikal .....	32
5.2.3	Prozentualer Anteil von Patienten mit mind. 3 mm oder 4 mm Knochenangebot .....	32
5.2.4	Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior .....	32
5.2.5	Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal .....	34
5.2.6	Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior .....	34
5.2.7	Dicke der vestibulären Kortikalis von zervikal nach apikal .....	34
5.2.8	Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior .....	34
5.2.9	Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal .....	34
5.2.10	Seitenvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale.....	35
5.2.11	Geschlechtervergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale.....	35
5.2.12	Altersabhängigkeit bezüglich der zu untersuchenden Merkmale .....	35

<b>Kap.</b>	<b>Seite</b>
<b>6</b>	<b>Ergebnisse .....36</b>
6.1	Interradikuläres Knochenangebot von anterior nach posterior .....36
6.2	Interradikuläres Knochenangebot von zervikal nach apikal .....38
6.3	Prozentualer Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm oder 4 mm Knochenangebot.....40
6.4	Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior .....44
6.5	Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal .....46
6.6	Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior .....49
6.7	Dicke der vestibulären Kortikalis von zervikal nach apikal .....51
6.8	Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior .....53
6.9	Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal .....56
6.10	Seitenvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale .....58
6.11	Geschlechtervergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale .....61
6.12	Altersabhängigkeit bezüglich der zu untersuchenden Merkmale .....64
6.13	Fehlerberechnung .....66
<b>7</b>	<b>Diskussion .....67</b>
7.1	Diskussion der Methoden.....67
7.1.1	Probanden.....67
7.1.2	Messmethoden .....68
7.2	Diskussion der Ergebnisse .....70
7.2.1	Interradikuläres Knochenangebot von anterior nach posterior .....70
7.2.2	Interradikuläres Knochenangebot Knochenangebot von zervikal nach apikal .....70
7.2.3	Prozentualer Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm oder 4 mm Knochenangebot.....72
7.2.4	Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior .....73
7.2.5	Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal .....76
7.2.6	Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior .....77
7.2.7	Dicke der vestibulären Kortikalis von zervikal nach apikal .....79
7.2.8	Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior .....80
7.2.9	Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal .....80
7.2.10	Seitenvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale .....82

<b>Kap.</b>		<b>Seite</b>
7.2.11	Geschlechtervergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale .....	83
7.2.12	Altersvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale .....	84
7.3	Schlussfolgerungen .....	85
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>101</b>
<b>10</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>102</b>
<b>11</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>103</b>

## Verzeichnis der Abbildungen

<b>Abb.</b>	<b>Seite</b>
Abb. 1: Aufbau einer kieferorthopädischen Minischraube .....	14
Abb. 2: Verankerungspin in situ .....	15
Abb. 3: Vergleich des Strahlenbündels von CT (fächerförmig) und DVT (konusförmig) .	19
Abb. 4: Festlegen des zu untersuchenden Bereiches mittels roter Markierungslinie .....	28
Abb. 5: Darstellung der vier farblich markierten Fensteransichten .....	29
Abb. 6: Vermessung der Interradikulärräume im Bildfenster links unten .....	31
Abb. 7: Vermessung der Alveolarfortsatzbreite und der Dicke der Kortikalis (Fenster oben links) mit Festlegung der türkisen Sagittallinie (Fenster oben rechts und unten links).....	33
Abb. 8: Vollbildschirm der Vermessung der Alveolarfortsatzbreite und der Kortikalis ....	33
Abb. 9: Interradikulärer Raum im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .	37
Abb. 10: Interradikulärer Raum im Abstand von 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, der Verlauf bei den Abständen 6 mm, 8 mm und 10 mm ist ähnlich .....	38
Abb. 11: Interradikulärer Raum zwischen 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der Verlauf ist vergleichbar mit den Zahnzwischenräumen 46-45 und 45-44 .....	39
Abb. 12: Interradikulärer Raum zwischen 44-43 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze.....	40
Abb. 13: Prozentualer Anteil mit einem interradiikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .....	41
Abb. 14: Prozentualer Anteil mit einem interradiikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .....	42
Abb. 15: Prozentualer Anteil mit einem interradiikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 6 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .....	42
Abb. 16: Prozentualer Anteil mit einem interradiikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 8 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .....	43
Abb. 17: Prozentualer Anteil mit einem interradiikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .....	43

<b>Abb.</b>	<b>Seite</b>
Abb. 18: Breite des Alveolarfortsatzes im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, der Verlauf bei den Abständen 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm ist vergleichbar.....	45
Abb. 19: Breite des Alveolarfortsatzes im Zahnzwischenraum 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der gleiche Verlauf findet sich beim Zahnzwischenraum 36-37 .....	47
Abb. 20: Breite des Alveolarfortsatzes im Zahnzwischenraum 46-45 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, beim Zahnzwischenraum 35-36 liegt der gleiche Verlauf vor.....	47
Abb. 21: Breite des Alveolarfortsatzes im Zahnzwischenraum 45-44 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der gleiche Verlauf findet sich bei den Zahnzwischenräumen 44-43, 33-34 und 34-35.....	48
Abb. 22: Vestibuläre Kortikalis im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, ein ähnlicher Verlauf liegt auch bei den Abständen 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm vor .....	50
Abb. 23: Vestibuläre Kortikalis im Zahnzwischenraum 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der gleiche Verlauf findet sich beim Zahnzwischenraum 36-37 .....	52
Abb. 24: Vestibuläre Kortikalis im Zahnzwischenraum 46-45 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, für die Zahnzwischenräume 45-44, 44-43, 33-34, 34-35 und 35-36 liegt ein vergleichbarer Verlauf vor.....	52
Abb. 25: Linguale Kortikalis im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .....	54
Abb. 26: Linguale Kortikalis im Abstand von 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze .....	55
Abb. 27: Linguale Kortikalis im Abstand von 6 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, bei den Abständen 8 mm und 10 mm ist der Verlauf ähnlich.....	55
Abb. 28: Linguale Kortikalis im Zahnzwischenraum 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, für die Zahnzwischenräume 46-45, 45-44, 34-35, 35-36 und 36-37 ist der Verlauf vergleichbar .....	57
Abb. 29: Linguale Kortikalis im Zahnzwischenraum 44-43 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, beim Zahnzwischenraum 33-34 ist der Verlauf vergleichbar.....	57

## Verzeichnis der Tabellen

<b>Tab.</b>		<b>Seite</b>
Tab. 1:	Technische Daten der vorhandenen DVT-Geräte. Abkürzungen: D=Durchmesser, H=Höhe, B=Breite, kV=Kilovolt, mA=Milliampere.....	26
Tab. 2:	Interradikuläres Knochenangebot in mm .....	36
Tab. 3:	Vergleich des interradikulären Knochenangebots von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test) .....	37
Tab. 4:	Vergleich des interradikulären Knochenangebots von zervikal nach apikal in verschiedenen Zahnzwischenräumen (p-Wert, verbundener t-Test) .....	39
Tab. 5:	Breite des Alveolarfortsatzes in mm .....	44
Tab. 6:	Vergleich der Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test) .....	45
Tab. 7:	Vergleich der Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal in verschiedenen Zahnzwischenräumen (p-Wert, verbundener t-Test) .....	46
Tab. 8:	Dicke der vestibulären Kortikalis mm .....	49
Tab. 9:	Vergleich der Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test) .....	50
Tab. 10:	Vergleich der Dicke der vestibulären Kortikalis von zervikal nach apikal in verschiedenen Zahnzwischenräumen (p-Wert, verbundener t-Test) .....	51
Tab. 11:	Dicke der lingualen Kortikalis mm .....	53
Tab. 12:	Vergleich der Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test) .....	54
Tab. 13:	Vergleich der Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal in verschiedenen Zahnzwischenräumen (p-Wert, verbundener t-Test) .....	56
Tab. 14:	Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte des interradikulären Knochenangebotes (p-Wert, verbundener t-Test) .....	58

<b>Tab.</b>	<b>Seite</b>
Tab. 15: Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte bzgl. der Breite des Alveolarfortsatzes (p-Wert, verbundener t-Test) .....	59
Tab. 16: Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte bzgl. der Dicke der vestibulären Kortikalis (p-Wert, verbundener t-Test).....	59
Tab. 17: Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte bzgl. der Dicke der lingualen Kortikalis (p-Wert, verbundener t-Test).....	60
Tab. 18: Vergleich des interradikulären Knochenangebots zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test) .....	61
Tab. 19: Vergleich der Breite des Alveolarfortsatzes zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test).....	62
Tab. 20: Vergleich der vestibulären Kortikalis zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test).....	62
Tab. 21: Vergleich der lingualen Kortikalis zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test).....	63
Tab. 22: Zusammenhang zwischen dem interradikulären Knochenangebot und dem Alter der Patienten (p-Wert, Spearman Rangkorrelation).....	64
Tab. 23: Zusammenhang zwischen der Breite des Alveolarfortsatzes und dem Alter der Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test).....	65
Tab. 24: Zusammenhang zwischen der vestibulären Kortikalis und dem Alter der Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test), <b>positive</b> , <b>negative</b> Korrelation.....	65
Tab. 25: Zusammenhang zwischen der lingualen Kortikalis und dem Alter der Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test) .....	66
Tab. 26: Ergebnisse des Methodenfehlers mittels Dahlberg-Formel .....	66
Tab. 27: Studien zum Platzangebot im Alveolarknochen im Unterkiefer in vivo .....	68
Tab. 28: Studien zum interradikulären Platzangebot im Alveolarknochen im Unterkiefer in vivo.....	71
Tab. 29: Studien zur Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer in vivo .....	75
Tab. 30: Studien zur Dicke der vestibulären Kortikalis im Unterkiefer in vivo .....	78
Tab. 31: Studien zur Dicke der lingualen Kortikalis im Unterkiefer in vivo .....	81



## 1 Abstrakt

Das Ziel der vorliegenden Studie lag in der Bestimmung des Platzangebotes für kieferorthopädische Minischrauben im Alveolarfortsatz des Unterkiefers. In die Studie wurden anonymisierte DICOM-Datensätze von 123 Patienten mit normalem Gebiss einbezogen. Es handelte sich um 56 (45,5 %) männliche und 67 (54,5 %) weibliche Patienten(-innen) im Alter zwischen 10 und 21 Jahren. Die Messungen wurden anhand digitaler Volumentomografiebilder durchgeführt, wobei die Auswertung mithilfe der Bildbearbeitungssoftware SimPlant 15.0 der Firma Materialise Dental erfolgte. Es wurde das interradiikuläre Knochenangebot, die Alveolarfortsatzbreite sowie die vestibuläre und linguale Kortikalis vermessen. Der Messbereich lag zwischen Eckzahn und zweitem Molaren, in jeweils 2 mm Schritten von der Schmelz-Zement-Grenze entfernt.

Nach Auswertung der Ergebnisse wurde festgestellt, dass das interradiikuläre Knochenangebot im Unterkiefer von anterior nach posterior und von zervikal nach apikal signifikant zunahm.

Nur bei einem geringen Teil der Interradikularräume lag der prozentuale Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm Knochenangebot im Unterkiefer über 70 %. Der prozentuale Anteil der Patienten mit mindestens 4 mm Knochenangebot im Unterkiefer lag in keinem Fall über 70 %.

Die Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer nahm von anterior nach posterior signifikant zu. Die größte Zunahme war in den Zahnzwischenräumen 45-46 vs. 46-47 bzw. 35-36 vs. 36-37 zu verzeichnen. Von zervikal nach apikal bestand ebenfalls eine signifikante Zunahme. Am deutlichsten war dabei der Anstieg im Vergleich der Abstände 2 mm vs. 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze.

Die Dicke der Kortikalis im Unterkiefer nahm von anterior nach posterior und von zervikal nach apikal zu.

Die Messungen zeigten, bis auf wenige Ausnahmen, keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Geschlecht der Patienten und der linken und rechten Unterkieferhälfte.

Zudem war die Wahl der Insertionsortes eingeschränkt. Da das interradiikuläre Platzangebot nach posterior und nach apikal hin zunahm, ist in den Bereichen zwischen den beiden Prämolaren und Molaren, 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze entfernt, mit dem größten Knochenangebot zu rechnen. Die Breite des Alveolarfortsatzes stellte sich als unproblematisch dar. Obwohl auch hier die Werte streuten, lag die Breite bei allen Patienten und an allen Stellen über 5 mm, was für gängige Minischrauben ausreichend ist.

Die zur Schraubeninsertion notwendige Ausdehnung der vestibulären und lingualen Kortikalis von mindestens 1 mm wurde nur bei wenigen Patienten und auch nur an wenigen Stellen unterschritten.

Nach den vorliegenden Ergebnissen sollte aufgrund der großen interindividuellen Variation vor dem Setzen einer kieferorthopädischen Minischraube eine eingehende projektionsfehlerfreie Diagnostik mit Hilfe eines strahlungsarmen DVTs erfolgen. Ein DVT mit einer effektiven Dosis von  $< 35 \mu\text{Sv}$  wäre derzeit die ALARA-konformste röntgenologische Bildgebung in der Kieferorthopädie.

## 2 Abstract

The present study for the measurement of alveolar bone in the mandible was carried out in the institute for 3D-dental radiological MESANTIS – Berlin and was submitted the medical faculty of the Charité. The purpose of this study was to determine the space available for orthodontic miniscrews. The study included 123 patients with normal dentition. It was 56 (45.5%) male and 67 (54.5%) female patients, 10-21 years of age. The measurements were performed with cone beam computed tomography, the evaluation was carried out with image processing software Simplant 15.0 (Materialise Dental). The interradicular bone, the width of the alveolar process and the thickness of the vestibular and lingual cortical bone were detected. The measuring range was between the canine and the second molar in 2 mm steps from the cemento-enamel-junction.

After the evaluation of the results was ascertained that the interradicular bone in the mandible decreases significantly from anterior to posterior and from cervical to apical.

Only in a small proportion of interradicular spaces the percentage of patients with at least 3 mm bone in the mandible lies above 70%. The percentage of patients with at least 4 mm bone in the mandible is actually in no case above 70%.

The width of the alveolar process in the mandible decreases significantly from anterior to posterior. The greatest increase is in the interdental spaces 45-46 vs. 46-47 or 35-36 vs. 36-37. From cervical to apical there is also a significant increase. Most obvious is the rise in the comparison of the distances 2 mm vs. 4 mm from the cemento-enamel junction.

The thickness of the cortical bone in the mandible increases from anterior to posterior and from cervical to apical.

The measurements showed, with a few exceptions, no significant differences between the gender of the patient and the left and right half of the mandible.

In addition, the choice of location for insertion is very limited. Since the interradicular space increases to posterior and to the apex, in the area between premolar and molar, 10 mm from the cemento enamel junction where enough bone would expect most likely. The width of the alveolar process turned out to be unproblematic. Although the values scatter, the width is in all patients and in all places above 5 mm, which is sufficient for common miniscrews.

The necessary thickness for miniscrew insertion of the vestibular and lingual cortical bone for at least 1 mm is below only in a few patients and that only in a few places.

Because the present results and by the individuality of each patient it is necessary to run an extensive diagnostic and use a DVT before an operative intervention with miniscrews. A DVT with an effective dose of  $< 35 \mu\text{Sv}$  would be the most ALARA-compliant radiological imaging in orthodontics.

## 3 Einleitung

### 3.1 Kieferorthopädische Verankerung von Minischrauben

In der Kieferorthopädie ist die Bewegung und Stellungsänderung von einzelnen Zähnen oder Zahngruppen elementarer Bestandteil der Behandlung. Um eine Stellungsänderung vorzunehmen sind Platz, Zeit, Kraft und Verankerung von entscheidender Bedeutung. Vor allem eine stabile skelettale Verankerung ist wichtig um Zähne zu bewegen. Seit Anfang der achtziger Jahre wurden Minischrauben bzw. Miniimplantate auf ihre Stabilität und Nutzbarkeit in der Kieferorthopädie untersucht (Creekmore und Eklund 1983, Gray et al. 1983). Da bei einem vollständig bezahnten Patienten die Verwendung von Implantaten aus Platzgründen nicht möglich ist, wurde die Entwicklung rein orthodontisch genutzter Verankerungselemente vorangetrieben. Seit über zehn Jahren werden kieferorthopädische Minischrauben konsequent in die Behandlung integriert und dienen vor allem der selektiven Zahnbewegung wie z. B. dem Mesialisieren und Distalisieren von Seitenzähnen, der Intrusion, dem Lückenschluss, der Zahnaufrichtung und der Kontrolle der Verankerung in jeglicher Dimension. Entscheidend für die erfolgreiche Behandlung mit Minischrauben sind der Insertionsort, die Dimensionen der Schraube (Miyawaki et al. 2003, Morarend et al. 2009), der Zeitpunkt (Manni et al. 2011), die Belastungsrichtung (El-Beialy et al. 2009) und die Knochendichte (Choi et al. 2009). Ebenso wichtig ist das Material und Design der Schraube, wobei Titanschrauben mit einer zylindrischen Form favorisiert werden, nur interradikulär sind konische Formen vorzuziehen (Carano et al. 2005). Diese weisen eine höhere Primärstabilität auf im Vergleich zu zylindrischen Schrauben (Florvaag et al. 2010). Alle Schraubenarten haben einen ähnlichen Aufbau. Sie bestehen aus einem Schaft mit Gewinde, dem transmukosalen Anteil und dem Schraubenkopf (Abb.1). Die Schaftlängen variieren je nach Hersteller zwischen 4 mm und 17 mm, wobei das Gewinde entweder selbstschneidend oder selbstbohrend sein kann. Der transmukosale Anteil stellt die Verbindung zur Mundhöhle dar und birgt somit die Gefahr des Eindringens von Mikroorganismen und der Entstehung einer Periimplantitis (Ludwig et al. 2007). Am Schraubenkopf werden die Kopplungselemente (Federn, elastische Ketten, Runddrähte, Vierkantdrähte) für die jeweilige Zahnbewegung befestigt. Dieser weist in den meisten Fällen einen Kreuzslot auf, denn nur so können Vierkantdrähte kontrolliert für eine dreidimensionale Bewegung verankert werden.



Abb. 1: Aufbau einer kieferorthopädischen Minischraube

Mittlerweile können Minischrauben mit einer Erfolgsrate von durchschnittlich 80 % (Kuroda et al. 2007a) bis 85 % (Viwattanatipa et al. 2009) inseriert werden. Wichtig hierbei ist die Art der Insertion. Brettin et al. (2008) verglichen monokortikal mit bikortikal inserierten Schrauben und stellten fest, dass bikortikale Schrauben hinsichtlich der Stabilität und der Widerstandskraft vorzuziehen sind. Ebenso ist die dreidimensional gesteuerte Implantation von Minischrauben dem herkömmlichen Prozedere hinsichtlich der Vermeidung von Wurzelbeschädigungen überlegen (Suzuki et al. 2008). Vor allem durch stereolithografische Bohrschablonen, die mit Hilfe von DVT-Datensätzen erstellt werden, können Schädigungen von Nachbarstrukturen bei Schraubeninsertion vermieden werden. (Qiu et al. 2012, Morea et al. 2011). Die Abweichungen zwischen den realen und den geplanten Insertionsorten lagen bei nur 0,21 mm (Bae et al. 2013) bis 0,42 mm (Liu et al. 2010). Weiterhin spielt der Insertionswinkel eine entscheidende Rolle, um Schraubenverluste zu vermeiden (Park et al. 2010), wobei ein Wurzelkontakt bei ca. 20 % der inserierten Schrauben möglich ist (Shinohara et al. 2013). Da kieferorthopädische Minischrauben fast ausschließlich in bezahnte Kieferabschnitte inseriert werden, ist die Kenntnis der umliegenden Strukturen und Platzverhältnisse von großer Bedeutung. Liou et al. (2004) stellten fest, dass Minischrauben in Abhängigkeit der kieferorthopädischen Kraft ihre Position verändern können. Bei einer anliegenden Kraft von 300 g können Positionsänderungen von bis zu 0,54 mm auftreten (Kokitsawat et al. 2008). Daher ist es entscheidend, dass der Schraubenkörper nicht in Kontakt mit den Zahnwurzeln kommt (Asscherickx et al. 2008, Chen et al. 2008a, Kuroda et al. 2007b), da dies zum Schraubenverlust führen kann. Wo ist eine Insertion also sinnvoll und sicher?



Abb. 2: Verankerungspin in situ

Einige Studien wurden durchgeführt, um Klarheit über einen optimalen Verankerungsort zu gewinnen bzw. Bereiche zu ermitteln, in denen durch ein ausreichendes Knochenangebot eine sichere Insertion möglich ist. Entscheidend sind dabei die Ausdehnung des Alveolarkamms mit Dicke der Kortikalis und das Platzangebot zwischen den Zahnwurzeln. Hinsichtlich dieser Parameter wurden unterschiedliche Ergebnisse in den aktuellen Studien ermittelt. So ergaben Untersuchungen der Kortikalis das größte Platzangebot mesial und distal des 1. Molaren (Deguchi et al. 2006) bzw. distal des zweiten Molaren (Lee et al. 2009) und eine Zunahme der buccalen Kortikalis von anterior nach posterior (Baumgaertel und Hans 2009, Farnsworth et al. 2011) mit einer Varianz von 1,59 mm bis 3,03 mm im Unterkiefer (Ono et al. 2008). Park und Cho (2009) sowie Monnerat et al. (2009) fanden heraus, dass die Kortikalisdicke von der Schmelz-Zement-Grenze zum Apex hin zunimmt. Hu et al. (2009) kamen zu der Erkenntnis, dass die Kortikalisdicke an den vorderen Zähnen lingual größer ist als buccal und an den hinteren Zähnen buccal größer als lingual, jedoch lingual als auch buccal im Molarenbereich am größten (Silvestrini et al. 2011). Fayed et al. (2010) ermittelten lingual zwischen Eckzahn und erstem Prämolare und buccal zwischen 1. und 2. Molar die größte Ausdehnung der Kortikalis. Allerdings kam es bei diesen Studien zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich der konkreten Messwerte. Die Mittelwerte differierten von 1,16 mm (Lee et al. 2009) über 1,9 mm (Deguchi et al. 2006) bis hin zu 2,23 mm (Silvestrini et al. 2011), 2,28 mm (Baumgaertel und Hans 2009), 2,33 mm (Monnerat et al. 2009) und 2,4 mm (Hu et al. 2009) am Beispiel der buccalen Kortikalis zwischen dem ersten und zweiten Molaren auf einer Höhe von 2mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze.

Bei der Untersuchung des interradikulären Platzangebotes wurden ebenfalls sehr unterschiedliche Werte festgestellt. So reicht das Platzangebot interradikulär zwischen erstem und

zweitem Molaren koronal von 2,75 mm Lee et al. (2009) bis zu 3,74 mm Monnerat et al. (2009). Viele Studien untersuchten auch nur einen der relevanten Parameter zur sicheren Therapie mit Minischrauben. Auch die Werte des maximalen Platzangebotes zwischen den Zähnen unterscheiden sich stark. Poggio et al. (2006) gaben auf einer Höhe von 11 mm apikalwärts der Schmelz-Zement-Grenze zwischen dem 1. und 2. Molaren einen Interradikularraum von 4,9 mm an, bei Monnerat et al. (2009) waren es im selben Bereich 6,2 mm. Lee et al. (2009) fanden als größtes Platzangebot den Bereich zwischen dem 1. und 2. Prämolaren 8 mm von der Schmelz-Zement-Grenze entfernt mit 4,1 mm. Kau et al (2010) ermittelten einen durchschnittlichen Abstand zwischen den Wurzeln im Unterkiefer von  $5,19/\pm 4,42$  mm, also stark differierende Werte zwischen einzelnen Patienten.

Bei den meisten Studien zum interradiikulären Platzangebot und zur Ausdehnung des Alveolarkamms wurden Fallzahlen von unter 30 Patienten erreicht (Deguchi et al. 2006, Hernández et al. 2008, Hu et al. 2009, Kim et al. 2006, Monnerat et al. 2009, Poggio et al. 2006, Silvestrini et al. 2011). Dabei führen vor allem Untersuchungen mit einer hohen Fallzahl zu statistisch hoch signifikanten Ergebnissen und damit zu verwertbaren Daten bezüglich der anatomischen Verhältnisse im Unterkiefer und daraus folgend zu einer höheren praktischen Relevanz im klinischen Alltag. Ebenso wurden für die meisten Versuche computertomografische Daten ausgewertet, teilweise wurden auch Vermessungen mittels Orthopantomogramm durchgeführt (Schnelle et al. 2004), wobei es gerade dabei aufgrund der Distorsionen und Vergrößerungsfaktoren zu wenig aussagekräftigen Ergebnissen kommt. Hingegen sind dreidimensionale bildgebende Verfahren mit hoher Genauigkeit (Horner et al. 2012) ohne Dimensionsverlust und der Darstellung in Originalgröße (Maret et al. 2010) zweidimensionalen Techniken überlegen. Daraus lässt sich ableiten, dass die exakte Vermessung benötigter Platzverhältnisse unter Verwendung genauester Messtechniken erfolgen sollte.

Um praxisrelevante Informationen zur sicheren Insertion von kieferorthopädischen Minischrauben zu erlangen, ist es notwendig Untersuchungen durchzuführen, die sich durch eine hohe Patientenzahl und eine größtmögliche Genauigkeit des Messverfahrens auszeichnen. Nur so lassen sich die teilweise erheblichen Differenzen in den Messergebnissen der schon vorhandenen Studien vermeiden und klare Angaben schaffen, um Minischrauben sicher zu inserieren.



### 3.2 Anatomische Verhältnisse im Unterkiefer

Zur verlustfreien und wirkungsvollen Behandlung mit Minischrauben und zur Beurteilung klinischer Verhältnisse sind die Strukturen und knöchernen Besonderheiten des Unterkiefers von entscheidender Bedeutung. Dieser besteht aus dem basalen Körper, der über die beiden Kiefernwinkel in den aufsteigenden Ast übergeht. Der Vorderrand des Astes läuft nach unten lateral in eine Leiste aus (Linea oblique), auf der Innenfläche befindet sich das Foramen mandibulae, welches N., A. und V. alveolaris inferior enthält. Diese laufen im Canalis mandibulae bis zum Foramen mentale. Die Lage des Mandibularkanals ist alters- und geschlechtsabhängig (Simonton et al. 2009) und hat im Bereich des zweiten Molaren den geringsten Abstand zu den Apices der Wurzeln (Kovisto et al. 2011) von durchschnittlich 3,7 mm (Denio et al. 1992). Der Unterkiefer bildet einen parabolischen Bogen, in dem die Osteone vom Kinn zum Gelenkfortsatz verlaufen. Der massive Basalbogen verjüngt sich nach oben zum Alveolarbogen (Waldeyer und Mayet 1993). Im vorderen Bereich an der Außenfläche des Unterkieferkörpers befindet sich gewöhnlicherweise zwischen 1. und 2. Prämolaren in der Mitte zwischen Basis und Alveolarrand das Foramen Mentale. Dort treten N., A. und V. mentalis aus dem Canalis mandibulae zur Haut aus. Die Kenntnis der Lage des Foramen mentale ist zur Vermeidung von Nervenverletzungen von großer Bedeutung, wobei die Lage stark variieren kann, vom Eckzahn bis zum ersten Molaren (Greenstein et al. 2006). Konventionelle röntgenologische Verfahren eignen sich aufgrund vieler falsch positiver und falsch negativer Einschätzungen nur bedingt zur Lokalisation des Foramen mentale und zur Bewertung der Ausdehnung des nach anterior verlaufenden Nervbogens (Greenstein et al. 2006). Nervenverletzungen sollten aufgrund einhergehender Verluste sensorischer Funktionen vermieden werden. Wie alle Knochen im menschlichen Körper besteht auch der Unterkieferknochen aus einer Substantia compacta, die als äußere Schicht den Knochen umgibt und einer Substantia spongiosa, die im Inneren ein schwammartiges Balkenwerk bildet. Die Alveolarfortsätze besitzen eine ausgesprochene Spongiosastruktur, die bei Zahnverlust einer Inaktivitätsatrophie unterliegen. Nach außen wird der Knochen bindegewebig vom Periost bedeckt. Dieses enthält Nerven und die für die Knochenernährung notwendigen Gefäße (Stratum osteogenicum), die über die Foramina nutricia in den Knochen eintreten. Das Periost ist über das Stratum fibrosum mit darin enthaltenen Kollagenfasern (Sharpey-Fasern) mit dem Knochen verbunden. Nach innen liegt das Endost der Substantia compacta an. Sowohl Endost als auch Periost haben die Fähigkeit Knochen neu zu bilden. Alle Knochen bestehen aus denselben Bestandteilen, den Knochenzellen und der Interzellulärsubstanz. Vorläuferzellen, Osteoblasten, Osteozyten und Osteoklasten bilden

die Knochenzellen und gehen auseinander hervor und sind für Knochenaufbau, Knochenwachstum und Knochenumbau verantwortlich. Die Interzellulärsubstanz besteht zu 50 % aus Mineralien (v. a. Phosphat und Kalzium), 25 % aus organischen Verbindungen und 25 % aus Hydratationswasser. Die im Knochen enthaltenen Mineralien sind entscheidend für die vorhandene Knochendichte, die wiederum ein Kriterium zur Auswahl eines geeigneten Insertionsortes von Minischrauben darstellt. Choi et al. (2009) stellten bei Vermessungen der Knochendichte fest, dass diese von posterior nach anterior zunimmt. Die Knochendichte schwankt zwischen 800-1580 Hounsfield Units (HU) im Bereich des Alveolarknochens und 1320-1560 HU im basalen Anteil des Unterkiefers (Park et al. 2008).

### **3.3 Digitale Volumetomografie in der Kieferorthopädie**

In der zahnärztlichen Diagnostik und Planung sind radiologische Verfahren zur bildgebenden Darstellung dentaler Strukturen aus der Praxis nicht mehr wegzudenken. Seit Mitte der 1970er Jahre ist die Panoramaschichtaufnahme Mittel der Wahl. Jedoch erforderten die immer komplexer werdenden Behandlungsmethoden sowohl in der Chirurgie als auch in der Kieferorthopädie die Möglichkeit einer dreidimensionalen Darstellung skelettaler Anteile des Ober- und Unterkiefers und des Mittelgesichts.

Seit Mozzo et al. (1998) erstmalig die digitale Volumetomografie nutzten, hat sich diese Technik der dreidimensionalen Bildgebung ständig weiterentwickelt. Vor allem die zur Bildberechnung angewandten Algorithmen und die Qualität der DVT-Scanner haben sich in den letzten Jahren weiter verbessert.

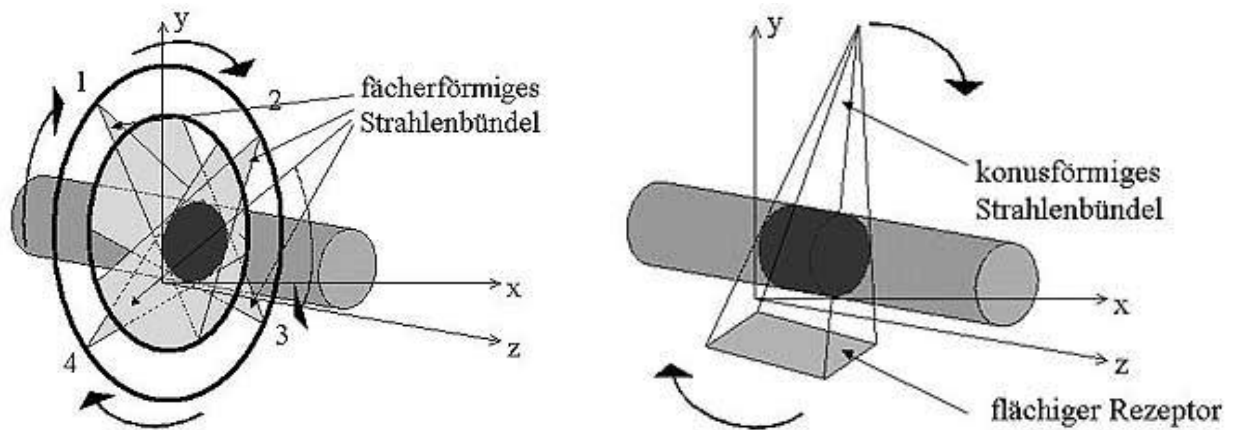


Abb. 3: Vergleich des Strahlenbündels von CT (fächerförmig) und DVT (konusförmig)

Ein grundsätzlicher Unterschied zur Computertomografie liegt darin, dass die erzeugte Strahlung nicht auf einem dünnen Strahlenfächer eingeleitet wird, sondern der gesamte Röntgenstrahl kegel- oder pyramidenförmig zur Bilderzeugung genutzt wird (Abb. 3). Die absorbierte Strahlung wird dann von einem zweidimensionalen Flächensensor erfasst und durch eine angeschlossene Rechereinheit verarbeitet. So wird zur Darstellung eines dreidimensionalen Bildes der Datensatz durch nur eine 360°-Rotation erstellt und nicht erst durch das Übereinanderlegen von Schichtaufnahmen in einer Sekundärrekonstruktion.

Bei der Aufnahme eines DVT's bewegen sich Röntgenquelle und Detektor auf einer Kreisbahn um das abzubildende Objekt herum und die vom Detektor aufgezeichneten zweidimensionalen Bilder werden gespeichert. Damit kann ein sphärisches oder zylindrisches Aufnahmevolumen in Abhängigkeit der Röntgenstrahlgeometrie erzeugt werden. Die Größe des Volumens wird als Field of View bezeichnet und unterscheidet sich hinsichtlich seiner Größe von Gerät zu Gerät. Das Field of View variiert von 3×4 cm bis hin zu 20×20 cm. Bei einem sehr kleinen Field of View ist eine OPG- oder Fernröntgenseiteneinstellung nicht möglich, da die notwendigen Informationen nicht erfasst werden.

Bei einem Umlauf der Röntgenröhre werden je nach Gerätetyp bis zu 720 Einzelbilder erstellt und mittels mathematischer Transformation aus zweidimensionalen Bildern ein dreidimensionaler Datensatz rekonstruiert. Da die erstellten Einzelbilder Fehler aufweisen können, können sich diese nach der errechneten 3D-Rekonstruktion als Auslöschungs- und Aushärtungsartefakte darstellen. Diese entstehen z. B. durch metallische Restaurationen im Strahlengang (Zhang et al. 2007, Schulze et al. 2011). Die benötigten Scanzeiten liegen zwischen 8 Sek. und 36 Sek., wobei

die Gefahr von Bewegungsartefakten mit längerer Scanzeit ansteigt (Holberg et al. 2005, Ens et al. 2010, Suomalainen et al. 2010). Die für die Bildberechnung benötigten Recheneinheiten benutzen bestimmte Algorithmen, wobei der sogenannte Feldkampalgorithmus der am häufigsten eingesetzt ist. Dabei wird der Kegelstrahl in seine fächerförmigen Strahlenflächen zurückgesetzt, um dann zweidimensionale Schichtabbildungen in ein dreidimensionales Konstrukt umzuwandeln.

Der Bildempfänger kann entweder ein Bildverstärkersystem sein, welches auf einer Vakuumröhrentechnik basiert (BABA) oder es handelt sich um neuere Flat Panel Detektoren, die eine verzerrungsfreiere Darstellung liefern. Die Funktionsweise dieses Bildverstärkers beruht darauf, dass Röntgenstrahlen in Elektronen konvertiert werden, die auf 30.000 Volt beschleunigt und auf einen weiteren Bildschirm abgebildet werden (Ritter et al. 2007). Dort werden die Elektronen in Lichtquanten umgewandelt.

Beim Flatpanel Detektor werden Röntgenstrahlen in Photonen oder bei direkt konvertierenden Systemen in Elektronen umgewandelt und dann über Photodioden an eine Auslesematrix weitergeleitet. Die Qualität der Aufnahme ist stark abhängig von der Qualität der Photodiode.

Die Bildqualität im Allgemeinen wird vor allem durch Kontrast, Schärfe und Rauschen bestimmt. Die Schärfe eines Bildes wird durch die Qualität der Übergänge unterschiedlich dichter Strukturen z. B. beim Übergang zwischen Zahn und Knochen bestimmt. Der Schärfeindruck ist abhängig von dem Kontrast, dem Auflösungsvermögen des Scans und dem Bildrauschen. Das Bildrauschen setzt sich zusammen aus dem Quantenrauschen und dem Systemrauschen, wobei das Quantenrauschen durch die Fluktuation der Röntgenstrahlen entsteht, die zu kleinen Abweichungen der Dichte der Quanten führt. Das Systemrauschen entsteht in dem Detektor durch den Signalverstärker und den Analog-Digital-Wandler. Der Rauschpegel eines DVT ist im Vergleich zu einem CT erhöht (Pauwels et al. 2012). Das Quantenrauschen wird bei steigender Dosis geringer und überwiegt bei niedriger Dosis. Das Bildrauschen führt dazu, dass kleinere Bildstrukturen schwieriger zu erkennen sind. Insgesamt nimmt das Rauschen bei digitalen Systemen umso mehr ab, je höher die verwendete Dosis ist (Ritter et al. 2007). Der Kontrast stellt die Dosis-, Helligkeits- und Intensitätsunterschiede in einem Bild dar. Ohne den Kontrast können Strukturen von ihrer Umgebung nicht unterschieden werden. Die Dichte der darzustellenden Strukturen, die Röntgenstrahlen sowie detektorspezifische Eigenschaften nehmen Einfluss auf den Kontrast.

Bei Aufnahmen mit einem DVT sollte darauf geachtet werden, dass ein maximaler Bildkontrast und ein maximales Auflösungsvermögen erzielt werden, sowie ein Kompromiss zwischen

Diagnostizierbarkeit und Strahlendosis erreicht werden kann. Daher sollte immer dem ALARA- (As Low As Reasonably Achievable-) Prinzip gefolgt werden, also geringstmögliche Strahlenbelastung für den Patienten, aber ausreichend hohe Bildqualität zur Klärung aller diagnostischen Fragen.

Die Strahlenbelastung eines DVTs ist im Vergleich zu einem CT deutlich geringer. Schulze et al. (2004) konnten mittels Alderson-Rando-Phantoms ermitteln, dass im CT zwei- bis dreimal höhere Strahlungswerte vorliegen als im DVT. Ebenso konnten Wörtche et al. (2006) und Mozzo et al. (1998) nachweisen, dass eine DVT-Aufnahme nur etwa einem Siebtel bis einem Zehntel bzw. einem Sechstel der Strahlendosis eines CT bedarf. Ludlow und Ivanovic (2008) gaben eine effektive Strahlendosis von 1,5 bis 12,3-fach geringer als beim CT an. Bezüglich der Strahlenbelastung hat die DVT also einen Vorteil gegenüber der Computertomografie, jedoch ist diese stark abhängig von technischen Parametern wie Röhrenspannung, Stromstärke und vor allem der Größe des Field of View. Auch bezogen auf die Ausnutzung der erzeugten Röntgenstrahlung liegen die Vorteile beim DVT. Bei der konusförmigen Strahlung wird ein sehr viel höherer Strahlenanteil genutzt als bei der fächerförmigen Strahlung des CT, wodurch auch die Effizienz höher zu bewerten ist als beim CT.

Verglichen mit dem OPG gaben Ludlow et al. (2006) ein Verhältnis der Strahlenexposition bei OPG:DVT:CT von 1:10:10017 an. Dieses Verhältnis verringert sich stetig durch eine Weiterentwicklung der auf dem Markt befindlichen DVT-Geräte. Ludlow et al. (2008) ermittelten eine effektive Dosis für konventionelle kieferorthopädische Röntgenbilder von 35,0  $\mu\text{Sv}$ . Grünheid et al. (2012) gaben eine effektive Dosis (digitales OPG 21,5  $\mu\text{Sv}$  und ein Fernröntgenseitenbild 4,5  $\mu\text{Sv}$ ) von 26  $\mu\text{Sv}$  an, für ein DVT (Scanzeit 8,9 Sekunden) 64,7-69,2  $\mu\text{Sv}$ . Weitere Untersuchungen ergaben eine effektive Dosis für ein DVT bei Aufnahme des gesamten Kopfes von 46 bzw. 47  $\mu\text{Sv}$  (Morant et al. 2013, Davies et al. 2010). Weiterhin konnte durch Reduktion der Umlaufzeiten des DVT-Scans auf bis zu 2 Sekunden (QuickScan+) zur Darstellung des Zahnbogens und der Kiefergelenke, eine Dosisreduktion auf 13 (Erwachsene) bzw. 9  $\mu\text{Sv}$  (Kinder) erreicht werden (Ludlow und Walker 2013). Die Strahlendosis bei einer Vollschädelaufnahme noch weiter zu reduzieren (12 – 15,9  $\mu\text{Sv}$ ), könnte mit der neuesten Gerätegeneration und einem Ultra Low Dose Modus erreicht werden. Die Größe der effektiven Dosis ist aber immer in Abhängigkeit zu sehen von der Größe des Field of View, der Bildauflösung, dem bestrahlten Organ, dem Alter des Patienten und dem Aufnahmewinkel (Morant et al. 2012, Schilling und Geibel 2013).

Die metrische Genauigkeit der digitalen Volumtomografie wurde vielfach mit der einer Computertomografie oder der Orthopantomografie verglichen. Goch (2008) vermaß den Abstand

zwischen dem Oberrand des Canalis mandibulae und dem Kieferkamm sowie den Unterrand des Sinus maxillaris und dem Kieferkamm. Zwischen den CT-Untersuchungen und den DVT-Untersuchungen ergaben sich für den Unterkiefer Abweichungen im Mittel von -0,25 mm und für den Oberkiefer von +0,18 mm. Die Werte zeigten also keine statistische Relevanz. Die Reduktion der Röhrenstromstärke bei den CT-Untersuchungen hatte keinen Einfluss auf die metrische Genauigkeit. Allerdings wurden hoch signifikante Unterschiede bei der Vermessung der Panoramaschichtaufnahmen festgestellt, dort betrug die Werte im Mittel 2,61 mm. Ähnliche Ergebnisse wurden in weiteren Studien festgestellt. So wurden Messstrecken direkt am Objekt mit denen eines digitalen Volumenscans verglichen. Marmulla et al. (2005) ermittelten Messabweichungen im Mittel zwischen +0,13 mm, Mozzo et al. (1998) ermittelten Werte von 0,8-2,2 %. Pinsky et al. (2006) ermittelten nach Vermessungen eines menschlichen Unterkiefers Abweichungen von +0,27 mm. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl CT als auch DVT sehr exakte Dimensionen wiedergeben und die Genauigkeit weit unter einem Millimeter liegt. Dies ist für die meisten diagnostischen und planerischen Fragestellungen ausreichend.

## 4 Fragestellung

In der Kieferorthopädie gewinnen Minischrauben in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung und werden häufig als Therapiemittel zur Bewegung von Zähnen und Zahngruppen eingesetzt. Entscheidend für die sichere Insertion von Minischrauben ist die genaue Kenntnis der zur Verfügung stehenden Platzverhältnisse und die daraus resultierende günstige Position im Kieferknochen. Daher bedarf es der genauen Analyse der anatomischen Verhältnisse, um daraus die geeignete Größe der zu setzenden Schraube hinsichtlich der Länge und des Durchmessers zu bestimmen. Wichtig hierbei sind vor allem die Dicke der Kortikalis und des Alveolarknochens und der Abstand der Wurzeln zueinander.

In den letzten Jahren wurden einige Studien über Platzverhältnisse im Kiefer und den damit verbundenen Möglichkeiten zur Insertion von Minischrauben durchgeführt. Die Ergebnisse differieren teilweise stark untereinander, es liegen oftmals nur Studien mit einer geringen Fallzahl vor, sodass die statistische Aussagekraft angezweifelt werden darf. Des Weiteren kommen teilweise bildgebende Verfahren zum Einsatz, die eine genaue Analyse der anatomischen Strukturen und Verhältnisse im Unterkiefer nicht zulassen.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch eine hohe und aussagekräftige Fallzahl statistisch relevante Ergebnisse zu liefern, um einen geeigneten Insertionsort für kieferorthopädische Minischrauben bezüglich des interradiikulären Abstandes, der Dicke der Kortikalis und der Breite des Alveolarkamms zu finden.

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stand insbesondere die Überprüfung folgender Hypothesen:

1. Das interradikuläre Knochenangebot nimmt im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zu.
2. Das interradikuläre Knochenangebot nimmt im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zu.
3. Der prozentuale Anteil von Patienten mit mindestens a) 3 mm oder b) 4 mm Knochenangebot im Unterkiefer liegt je nach Interradikulärraum zwischen 70 % und 100 %.
4. Die Breite des Alveolarfortsatzes nimmt im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zu.
5. Die Breite des Alveolarfortsatzes nimmt im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zu.

6. Die Dicke der vestibulären Kortikalis nimmt im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zu.
7. Die Dicke der vestibulären Kortikalis nimmt im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zu.
8. Die Dicke der lingualen Kortikalis nimmt im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zu.
9. Die Dicke der lingualen Kortikalis nimmt im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zu.
10. Bezüglich des interradikulären Knochenangebotes, der Breite des Alveolarfortsatzes sowie der Dicke der vestibulären und lingualen Kortikalis besteht zwischen linker und rechter Unterkieferhälfte kein signifikanter Unterschied.
11. Bezüglich des interradikulären Knochenangebotes, der Breite des Alveolarfortsatzes sowie der Dicke der vestibulären und lingualen Kortikalis besteht zwischen weiblichen und männlichen Patienten kein signifikanter Unterschied.
12. Bezüglich des interradikulären Knochenangebotes, der Breite des Alveolarfortsatzes sowie der Dicke der vestibulären und lingualen Kortikalis besteht keine Korrelation mit dem Alter der Patienten.



## 5 Methodik

### 5.1 Allgemeine Methodik

#### 5.1.1 Patientengut

Die für diese Studie ausgewählten Probanden wurden aus einem anonymisierten Datensatz ausgesucht. Insgesamt erfüllten 123 Patienten die Voraussetzungen, um die Vermessungen zur Überprüfung der Hypothesen durchzuführen.

Die Altersspanne lag zwischen 10 und 21 Jahren, der Altersmittelwert betrug  $15,2 \pm 5,4$  Jahre. Von den 123 Patienten waren 56 (45,5 %) männlich und 67 (54,5 %) weiblich.

#### 5.1.2 DVT-Aufnahmen

Sämtliche Datensätze für die vorliegende Studie stammten aus dem Langzeitarchiv des nationalen 3D-Röntgennetzwerkes MESANTIS<sup>®</sup> (Standorte: Aschaffenburg, Berlin, Hamburg, Heilbronn, Leonberg, Mayen, München und Wiesbaden). Für die Selektion der 123 Datensätze aus insgesamt mehr als 15.000 archivierten Datensätzen wurden vorab folgende Ausschlusskriterien festgelegt:

- Fehlende Zähne
- Vorhandene Syndrome
- Nicht vollständig durchgebrochene Zähne
- Nicht vollständig angelegtes Gebiss
- Karies mit Verlust einer durchgehenden Schmelzgrenze
- Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum
- Unscharfe DVT-Aufnahmen
- Stark angulierte Zähne
- Ausgeprägte periapikale Veränderungen
- Überlagerte Wurzeln
- Radiologisch erkennbare Entzündungen des Parodonts

Für jede DVT-Aufnahme lag eine rechtfertigende medizinische Indikation zur Anfertigung einer dentalen Volumentomographie vor, die unabhängig von der vorliegenden retrospektiven Arbeit war. Die jeweils individuelle rechtfertigende Indikation wurde von einem/r fachkundigen Zahnarzt/ärztin mit gültiger DVT-Fachkunde gestellt. Sämtliche Auswertungen dieser Arbeit wurden also an bereits vorhandenen DVT-Aufnahmen vorgenommen und es wurde nicht eine einzige DVT-Aufnahme wegen dieser Arbeit angefertigt.

Alle Aufnahmen wurden entweder mit dem DVT-Gerät „i-CAT classic“ (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA) oder der Sonderedition MESANTIS<sup>®</sup> *line* (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA) angefertigt. Details zu den technischen Angaben sind in Tabelle 1 dargestellt.

Beide DVT-Geräte generierten DICOM Datensätze, die mit Hilfe einer speziellen Auswertungssoftware für die weiteren Vermessungen verwendet werden konnten. Sämtliche Patienten wurden vertikal nach der Okklusionsebene im DVT-Gerät ausgerichtet. Die sagittale Orientierung richtete sich nach der Erfassung der Nasenspitze und der Referenzpunkte „Porion rechts und links“.

Tab. 1: Technische Daten der vorhandenen DVT-Geräte. Abkürzungen: D=Durchmesser, H=Höhe, B=Breite, kV=Kilovolt, mA=Milliampere

	<b>iCAT classic</b>	<b>MESANTIS<sup>®</sup> <i>line</i></b>
Bilddetektor	Flachfeld, amorphes Silizium (ablesbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)	Flachfeld, amorphes Silizium (erfassbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)
Voxelgröße	0,4, 0,3, 0,25 oder 0,2 mm	0,4, 0,3, 0,25, 0,2 oder 0,125 mm
Graustufen	12 Bit	14 Bit
Bilderfassung	Einzelrotation um 360° (max.)	Einzelrotation um 360° (max.)
Bilderfassungsdauer	40, 20 oder 10 s	26,9, 17,8, 14,7, 8,9 oder 4,9 s
Sichtfeld (Field of View)	16 cm x 13 cm (D × H)	16 cm × 13,5 cm (D × H)
Röntgenröhrenspannung	120 kV	120 kV
Stromstärke	3-8 mA	3-7 mA

### 5.1.3 Auswertungssoftware und Befundungsmonitor

Sämtliche Messungen wurden mit der Bildbearbeitungssoftware SimPlant 15.0 der Firma Materialise Dental, Leuven, Belgien, durchgeführt. Diese Software wird vor allem zur dreidimensionalen Planung einer computernavigierten Implantation und Visualisierung anatomischer Gegebenheiten verwendet.

Aus den DICOM-Datensätzen wurden anhand dieser Software 3D-Grafiken eines jeden Patienten erstellt. Dieser Datensatz bestand aus 512 Einzelbildern mit einer Pixelgröße von 0,2 mm und einem Field of View von 16 cm x 13,5 cm.

Die Tomographien wurden an einem Desktop PC mit dem Betriebssystem Windows 7 Professional ausgewertet. Der Monitor war ein EIZO RadiForce R31 (Fa. Avnet Technology Solutions GmbH, Nettetal, Germany). Dieser hatte eine Auflösung von 3 Megapixeln und  $1536 \times 2048$  Bildpunkten. Das Kontrastverhältnis betrug 400:1 und die Helligkeit/Leuchtdichte  $400 \text{ cd/m}^2$  (Candela/Quadratmeter). Die Farbwiedergabe wurde durch einen 10-Bit-Look-Up-Table (LUT) gesteuert. Diese Abbildungseigenschaften ermöglichten die Wiedergabe einer DICOM-konformen Graustufencharakteristik und die Einrichtung von DIN 6868-57-konformen Bildwiedergabesituationen für die Anwendungskategorie B. Für den Monitor erfolgte täglich eine Konstanzprüfung nach der Qualitätssicherungsrichtlinie ([radiforce.de/pool/spec/R31/2deR31.pdf](http://radiforce.de/pool/spec/R31/2deR31.pdf)). Die Vermessungen der Datensätze erfolgten bei einer Vergrößerung von 400 % und einem Betrachtungsabstand von 40 cm.

### 5.1.4 Allgemeine Messmethodik

Durch Festlegung des zu untersuchenden Gesichtsbereichs (Unterkiefer) konnte die Generierung des Datensatzes erfolgen (Abb 4.).

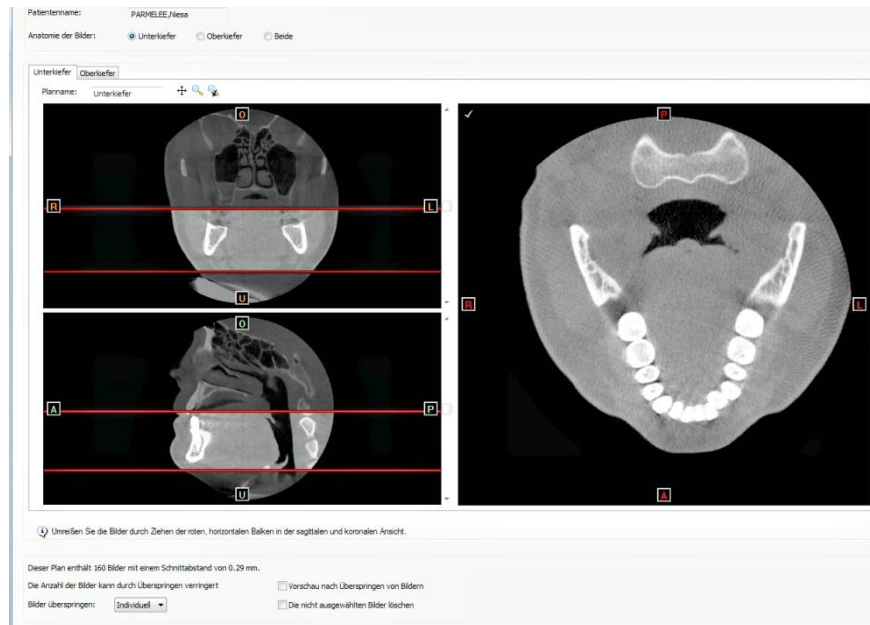


Abb. 4: Festlegen des zu untersuchenden Bereiches mittels roter Markierungslinie

Nach dem Öffnen des SimPlant-Projekts, zeigen sich standardmäßig vier Fensteransichten.

Die einzelnen Fensteransichten (drei 2D- und eine 3D-Ansicht) sind mit unterschiedlichen Farbcodes gekennzeichnet (Abb. 5). Dabei befindet sich oben links der zweidimensionale Querschnitt (türkis), oben rechts der zweidimensionale Axialschnitt (rot), unten links der zweidimensionale Panoramanschnitt (gelb) und unten rechts ein dreidimensionales Schädelmodell (grün). In jeder der drei zweidimensionalen Ansichten befinden sich farbige unterlegte Linien, die jeweils der Axial-, Querschnitt- und Panoramaansicht entsprechen, sodass in jedem Bild eine Orientierung in jeder Dimension möglich ist. Für diese Studie wurde die Möglichkeit genutzt, eine Panoramakurve zu legen und Abstände auf hundertstel Millimeter zu messen. Die Messungen wurden mit in der Software vorhandenen Längenmessinstrumenten durchgeführt.

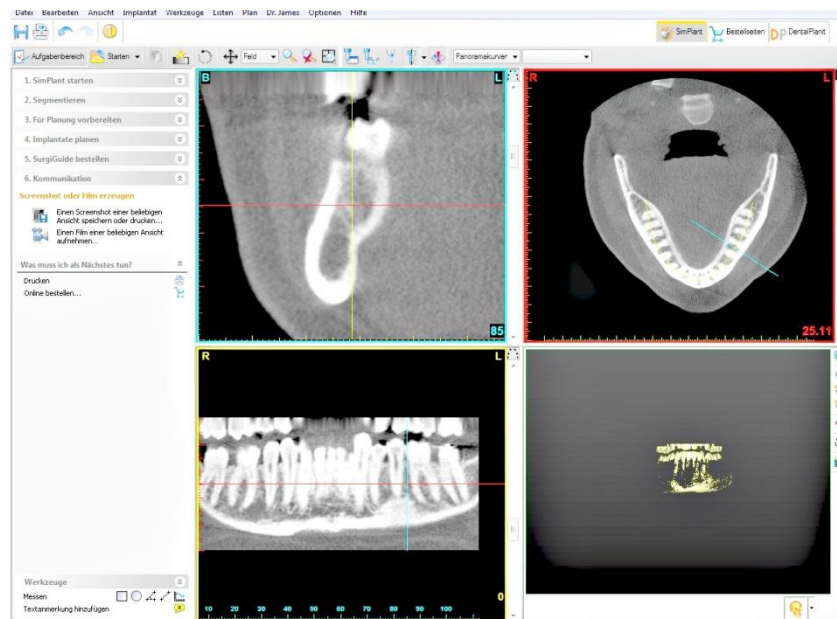


Abb. 5: Darstellung der vier farblich markierten Fensteransichten

### 5.1.5 Statistische Auswertung

Die Erfassung der Daten erfolgte mit dem Programm Excel 2000 (Microsoft). Die statistische Auswertung wurde mit WinStat 3.1 (Kalmia Company, USA) vorgenommen.

Zunächst wurde eine deskriptive Auswertung (Mittelwert, Standardabweichung) aller Variablen durchgeführt. Zusätzlich wurde der prozentuale Anteil der Patienten mit mehr als 3 mm bzw. 4 mm interradikulärem Knochenangebot ermittelt.

Für die Auswahl der statistischen Tests wurde zunächst mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test überprüft, ob die Variablen normalverteilt sind. Dies konnte bis auf die Variable Alter für alle Variablen bestätigt werden.

Bei den durchgeführten statistischen Testverfahren (unverbundener t-Test, verbundener t-Test und Spearman-Rangkorrelation) wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit in zwei Signifikanzniveaus angegeben ( $p < 0,05$  signifikant und  $p < 0,01$  hochsignifikant).

Durch den unverbundenen t-Test werden die Mittelwerte zweier unverbundener Stichproben derselben intervallskalierten Variablen auf Unterschiedlichkeit getestet. Intervallskaliert heißt, dass die Variable eine lineare Eigenschaft misst. Die Messwerte müssen normalverteilt sein und die Stichproben die gleiche Varianz aufweisen.

Bei allen Variablen wurde getestet, ob zwischen weiblichen und männlichen Patienten ein signifikanter Unterschied besteht.

Der verbundene t-Test wird bei einer Stichprobe durchgeführt, an der zwei Messungen unter verschiedenen Bedingungen vorgenommen wurden. Bei dem Test wird davon ausgegangen, dass die gültigen Differenzen der Variablenpaare normalverteilt sind.

Es wurde getestet ob

- das interradiikuläre Knochenangebot,
- die Breite des Alveolarfortsatzes,
- die Dicke der vestibulären und lingualen Kortikalis

sich unterscheidet bei

- den Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze von 2 mm vs. 4 mm, 4 mm vs. 6 mm, 6 mm vs. 8 mm und 8 mm vs. 10 mm,
- den Zahnzwischenräumen 44-43 vs. 45-44, 45-44 vs. 46-45, 46-45 vs. 47-46, 33-34 vs. 34-35, 34-35 vs. 35-36 und 35-36 vs. 36-37,
- der linken und der rechten Unterkieferhälfte 44-43 vs. 33-34, 45-44 vs. 34-35, 46-45 vs. 35-36 und 47-46 vs. 36-37.

Durch die Spearman-Rangkorrelation werden zwei Variablen auf Korrelation getestet. Voraussetzungen für die Verteilungsform bestehen nicht, die Variablen brauchen nur ordinalskaliert zu sein.

Es wurde getestet, ob eine Korrelation zwischen dem Alter (nicht normalverteilt) und allen anderen Variablen besteht.

### 5.1.6 Fehlerberechnung

Der Methodenfehler nach Dahlberg (1940) bezeichnet die Genauigkeit von Messungen und wird mit folgender Formel berechnet:  $MF = \sqrt{(\sum d^2 / 2n)}$ .  $\sum d^2$  entspricht der quadratischen Differenzen zweier Wiederholungsmessungen und n der Anzahl der Messungen. Bei einem relativen Wert  $< 1$  kann von einer ausreichenden Messgenauigkeit ausgegangen werden. Um diesen Wert zu bestimmen wurden innerhalb von 2 Monaten 8 DVT erneut komplett vermessen.

## 5.2 Spezielle Methodik

### 5.2.1 Interradiikuläres Knochenangebot von anterior nach posterior

Nachdem der DICOM-Datensatz erfolgreich in SimPlant eingelesen wurde, war es notwendig eine Panoramakurve im Axialschnitt anzulegen. Dabei wurde die Ebene gewählt, auf der die

Wurzeln der einzelnen Zähne den geringsten interradikulären Abstand zueinander hatten. Dieser wurde durch Durchscrollen der einzelnen Schichten und der sich damit verändernden Abstände der Wurzeln ermittelt. Ebenso wurde der Abstand der Wurzeln anhand der Panoramaansicht verglichen (rote horizontale Linie unten links in Abb. 5). Wicht der geringste interradikuläre Abstand einzelner Zähne voneinander in der Vertikalen ab, so wurde der Axialschnitt weiter nach apikal oder koronal verschoben und die Kurve dementsprechend weiter erstellt. Nachdem man auf diese Weise die Panoramaansicht erstellt hatte, wurde mit dem Vermessen der Interradikularräume begonnen. Dazu wurde zuerst die Schmelz-Zement-Grenze zweier benachbarter Zähne festgelegt. Differierte die Höhe der Schmelz-Zement-Grenze zueinander, wurde der Abstandswert halbiert und diese Höhe als Ausgangspunkt festgelegt. Von dort wurden in einem Abstand von 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm die interradikuläre Distanz der Zahngruppen Eckzahn - 1. Prämolare; 1. Prämolare - 2. Prämolare; 2. Prämolare - 1. Molare und 1. Molare - 2. Molare gemessen.

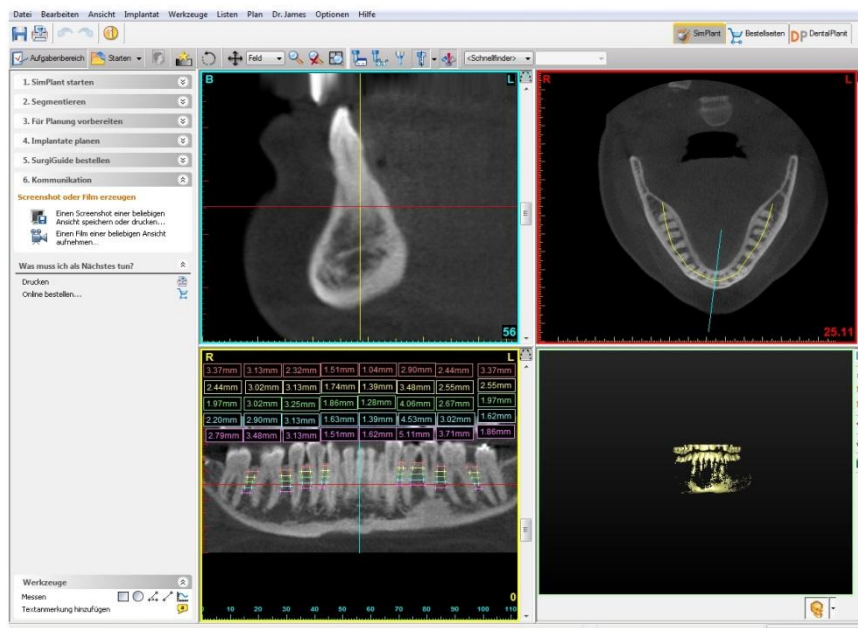


Abb. 6: Vermessung der Interradikularräume im Bildfenster links unten

Zum Vergleich der Messungen bezogen auf eine Veränderung in anterior-posteriorer Richtung, wurden auf jeder Höhe zur Schmelz-Zement-Grenze (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm) die einzelnen Zahnpaare einer Kieferhälfte miteinander verglichen, also 43-44 mit 44-45, 44-45 mit 45-46 und 45-46 mit 46-47 analog dazu die Zahnpaare im 3. Quadranten.

### **5.2.2 Interradikuläres Knochenangebot von zervikal nach apikal**

Zum Vergleich des interradiikulären Abstandes bezogen auf die Veränderungen in zervikal-apikaler Richtung, wurden die ermittelten Messwerte der einzelnen Höhen verglichen und zwar 2 mm mit 4 mm, 4 mm mit 6 mm, 6 mm mit 8 mm und 8 mm mit 10 mm. Dies erfolgte für jedes Zahnpaar.

### **5.2.3 Prozentualer Anteil von Patienten mit mind. 3 mm oder 4 mm Knochenangebot**

Der für ein sicheres Einheilen einer Minischraube benötigte zirkuläre Knochen muss mindestens 0,5 mm aufweisen, sodass der Abstand zwischen den Wurzeln in Abhängigkeit des verwendeten Schraubendurchmessers mindestens 3 mm betragen sollte. Deshalb wurde der prozentuale Anteil der Patienten mit mehr als 3 mm bzw. 4 mm Knochenangebot ermittelt.

### **5.2.4 Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior**

Zur Vermessung der Alveolarfortsatzbreite wurde die unter 5.1.4 beschriebene Panoramakurve festgelegt. Nach der Positionierung der türkisfarbenden Sagittallinie in der Axial- und Panoramaansicht genau auf der interradiikulären Mitte zweier benachbarter Zähne wurde damit der Sagittalschnitt festgelegt, in dem die Breite des Alveolarfortsatzes vermessen werden sollte (siehe Abb. 7 oben links).

Daraufhin wurde mittels roter Axiallinie die Höhe der Schmelz-Zement-Grenze bestimmt. Durch die an der linken Fensterseite dargestellte Skalierung, bei der ein Teilstrich 1 mm betrug, wurde in einem Abstand von 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm zur Schmelz-Zement-Grenze die Breite des Alveolarfortsatzes vermessen. Die Messungen erfolgten bei einer Vergrößerung von 400 %. Ließ sich der Sagittalschnitt nicht exakt mittig zwischen zwei Wurzeln platzieren, so wurde die Schnittebene gewählt, die der Mitte am nächsten kam.



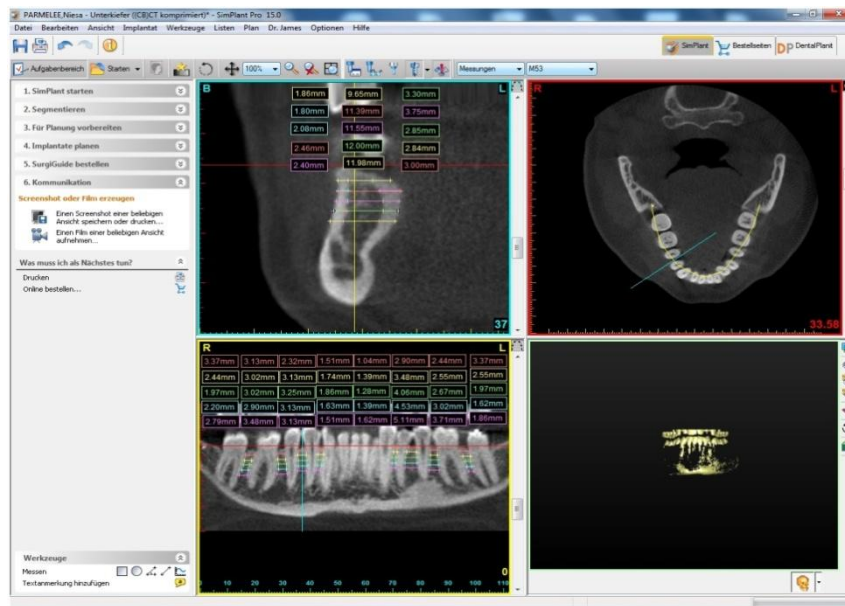


Abb. 7: Vermessung der Alveolarfortsatzbreite und der Dicke der Kortikalis (Fenster oben links) mit Festlegung der türkisen Sagittallinie (Fenster oben rechts und unten links)

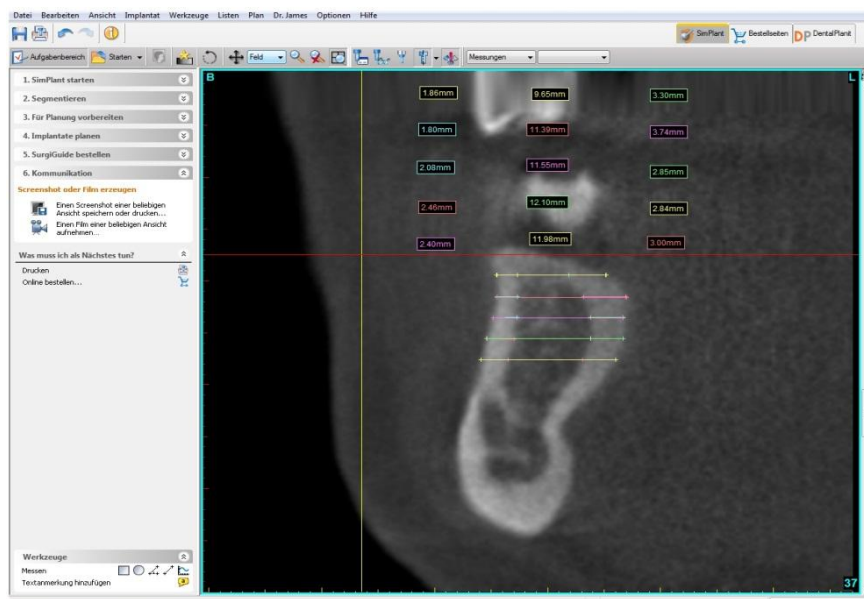


Abb. 8: Vollbildschirm der Vermessung der Alveolarfortsatzbreite und der Kortikalis

### 5.2.5 Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal

Zum Vergleich der Veränderung der Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal wurden die Messwerte bezogen auf die Abstände zur Schmelz-Zement-Grenze in Beziehung

gesetzt, also 2 mm Abstand zur Schmelz-Zement-Grenze mit 4 mm, 4 mm mit 6 mm, 6 mm mit 8 mm, 8 mm mit 10 mm.

### **5.2.6 Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior**

Ausgehend von der zu Beginn gelegten Panoramakurve und des ermittelten sagittalen Schnittbildes in der Mitte eines Zahnpaars wurde im gleichen Schnittbild wie bei der Breite des Alveolarfortsatzes, die Dicke der vestibulären Kortikalis vermessen. Diese Messung erfolgte ebenfalls 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze entfernt. Auf jeder Höhe wurden die Zahnpaare 43-44 mit 44-45, 44-45 mit 45-46 und 45-46 mit 46-47 und ebenso die Zahnpaare im 3. Quadranten miteinander verglichen, um so eine Veränderung von anterior nach posterior zu untersuchen.

### **5.2.7 Dicke der vestibulären Kortikalis von zervikal nach apikal**

Zum Vergleich der Veränderungen der vestibulären Kortikalis in zervikal-apikaler Richtung wurden die ermittelten Messwerte bezogen auf die einzelnen Abstände zur Schmelz-Zement-Grenze verglichen und zwar 2 mm mit 4 mm, 4 mm mit 6 mm, 6 mm mit 8 mm und 8 mm mit 10 mm. Dies erfolgte für jeden Interdentalraum.

### **5.2.8 Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior**

Analog zur Messung der vestibulären Kortikalis (siehe Kap. 5.2.6) wurde die linguale Kortikalis vermessen. Die Untersuchung der Messwerte bezogen auf die Veränderung von anterior nach posterior erfolgte analog zu Kapitel 5.2.6.

### **5.2.9 Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal**

Zum Vergleich der Veränderungen der lingualen Kortikalis in zervikal-apikaler Richtung wurde wie in Kapitel 5.2.7 vorgegangen.

### **5.2.10 Seitenvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale**

Um einen Unterschied zwischen der linken und rechten Unterkieferhälfte bezogen auf die zu untersuchenden Merkmale zu ermitteln, wurden die einzelnen Zahnpaare auf jeder Höhe zur Schmelz-Zement-Grenze miteinander verglichen. So wurde der interradikuläre Abstand, die

Breite des Alveolarfortsatzes und die Dicke der Kortikalis zwischen 33-34 verglichen mit 43-44 auf 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm Höhe zur Schmelz-Zement-Grenze. Analog dazu wurden alle anderen Zahnpaare gegenübergestellt.

#### **5.2.11 Geschlechtervergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale**

Zum Vergleich der Messwerte bezogen auf das Geschlecht wurden die Probanden in männliche (56) und weibliche (67) Patienten geteilt. Daraufhin wurde der Interradikularraum, die Breite des Alveolarfortsatzes und die Dicke der Kortikalis geschlechtsbezogen verglichen.

#### **5.2.12 Altersabhängigkeit bezüglich der zu untersuchenden Merkmale**

Das Alter der zu untersuchenden Probanden lag zwischen 10 und 21 Jahren, der Altersdurchschnitt betrug 15,2 Jahre. Der Interradikularraum, die Breite des Alveolarfortsatzes und die Dicke der Kortikalis wurden hinsichtlich einer Altersabhängigkeit untersucht.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Interradikuläres Knochenangebot von anterior nach posterior

Es wird das mittlere interradiikuläre Knochenangebot in den Zahnzwischenräumen 47-46, 46-45, 45-44 und 44-43 sowie 33-34, 34-35, 35-36 und 36-37 tabellarisch dargestellt (Tab. 2).

Tab. 2: Interradikuläres Knochenangebot in mm

Zahnzwischen- raum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
47-46	3,1±0,9	3,2±1,3	3,4±1,4	4,0±1,7	4,3±1,7
46-45	2,7±0,7	2,8±0,8	3,0±1,0	3,3±1,2	4,0±1,3
45-44	2,6±0,7	3,1±1,0	3,6±1,2	4,1±1,4	4,5±1,7
44-43	2,1±0,7	2,4±1,0	2,9±1,3	3,1±1,5	2,8±1,0
33-34	2,1±0,6	2,3±0,7	2,5±0,9	2,8±0,9	3,0±1,0
34-35	2,7±0,7	3,2±0,9	3,7±1,1	4,2±1,3	4,5±1,5
35-36	2,7±0,7	2,9±0,9	3,1±1,1	3,5±1,3	4,0±1,5
36-37	3,0±0,8	3,1±1,0	3,3±1,3	3,9±1,6	4,6±1,9

Bei einem Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze steigt das interradiikuläre Knochenangebot im Vergleich der Zahnzwischenräume 44-43 vs. 45-44 und 46-45 vs. 47-46 links sowie 33-34 vs. 34-35 und 35-36 vs. 36-37 rechts hochsignifikant ( $p < 0,01$ ) von anterior nach posterior an (Abb. 9).

Bei den übrigen Abständen 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm nimmt das interradiikuläre Knochenangebot im Vergleich der Zahnzwischenräume 44-43 vs. 45-44 links sowie 33-34 vs. 34-35 rechts hochsignifikant ( $p < 0,01$ ) zu, es fällt dann mit 45-44 vs. 46-45 links sowie 34-35 vs. 35-36 rechts wieder ab und steigt dann mit 46-45 vs. 47-46 links sowie 35-36 vs. 36-37 rechts abermals hochsignifikant ( $p < 0,01$ ) an. Es erfolgt nur eine exemplarische Darstellung für den Abstand 4 mm (Abb. 10).

Insgesamt nimmt das interradiikuläre Knochenangebot von anterior nach posterior zu, was die 1. These bestätigt (Tab. 3).

Tab. 3: Vergleich des intraradikulären Knochenangebots von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 45-44	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
45-44 vs. 46-45	0,297	0,00245	<0,0001	<0,0001	0,0027
46-45 vs. 47-46	<0,0001	0,00206	0,00211	0,000107	0,0644
33-34 vs. 34-35	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
34-35 vs. 35-36	0,607	0,00855	<0,0001	<0,0001	0,0194
35-36 vs. 36-37	0,000169	0,00811	0,0310	0,00324	0,00364

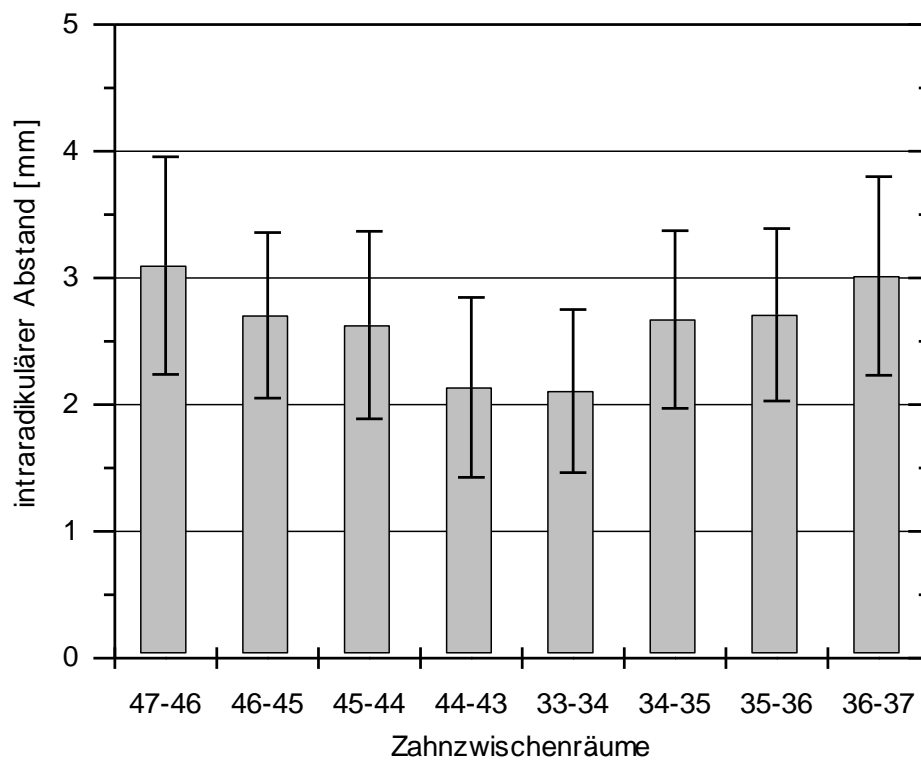


Abb. 9: Interradikulärer Raum im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

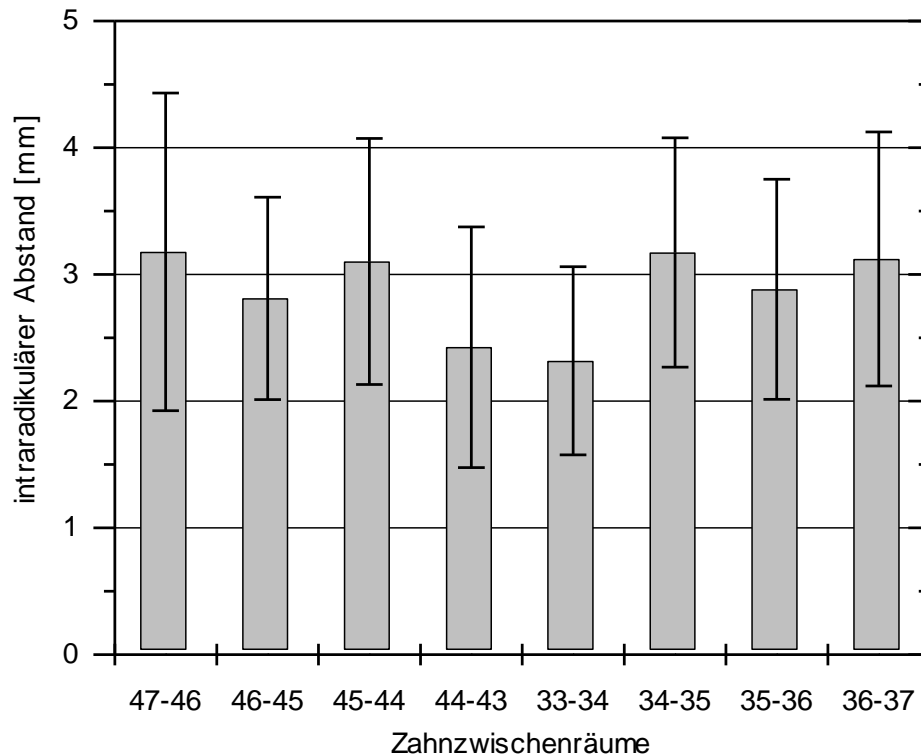


Abb. 10: Interradikulärer Raum im Abstand von 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, der Verlauf bei den Abständen 6 mm, 8 mm und 10 mm ist ähnlich

## 6.2 Interradikuläres Knochenangebot von zervikal nach apikal

Das mittlere interradikuläre Knochenangebot im Abstand von 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze wird in Tabelle 2 gezeigt.

Das interradikuläre Knochenangebot nimmt bei fast allen Zahnzwischenräumen 47-46, 46-45 und 45-44, 33-34, 34-35, 35-36 und 36-37 kontinuierlich von zervikal nach apikal zu. Der Verlauf wird exemplarisch für den Zahnzwischenraum 47-46 dargestellt (Abb. 11).

Nur beim Zahnzwischenraum 44-43 kommt es bis zu einem Abstand von 8 mm zu einer Zunahme, bis 10 mm fällt das interradikuläre Knochenangebot wieder ab (Abb. 12).

Somit liegt bei allen Zahnzwischenräumen mit Ausnahme des Zahnzwischenraums 44-43 im Abstand von 8 mm bis 10 mm ein Anstieg des interradikulären Knochenangebots von zervikal nach apikal vor. Dieser Anstieg ist nach nahezu allen Vergleichen hochsignifikant ( $p < 0,01$ ) womit die 2. These bestätigt wird (Tab. 4).

Tab. 4: Vergleich des interradikulären Knochenangebots von zervikal nach apikal in verschiedenen Zahnzwischenräumen (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Zahnzwischenraum							
	47-46	46-45	45-44	44-43	33-34	34-35	35-36	36-37
2 mm vs. 4 mm	0,136	0,00271	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0108
4 mm vs. 6 mm	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
6 mm vs. 8 mm	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
8mm vs. 10mm	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,00010	<0,0001	<0,0001

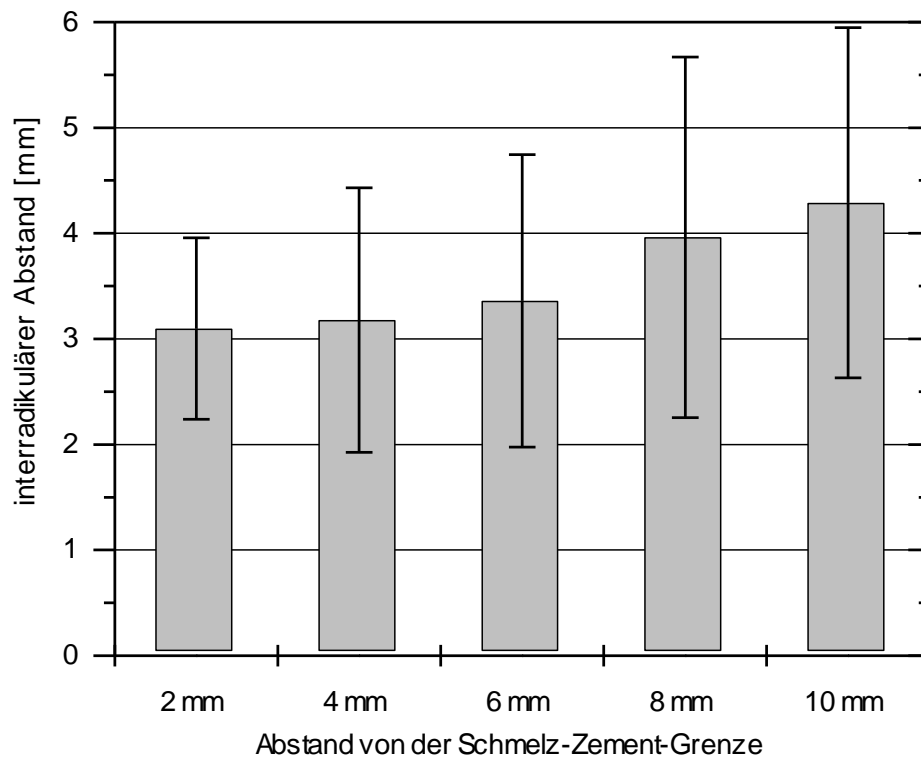


Abb. 11: Interradikulärer Raum zwischen 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der Verlauf ist vergleichbar mit den Zahnzwischenräumen 46-45 und 45-44

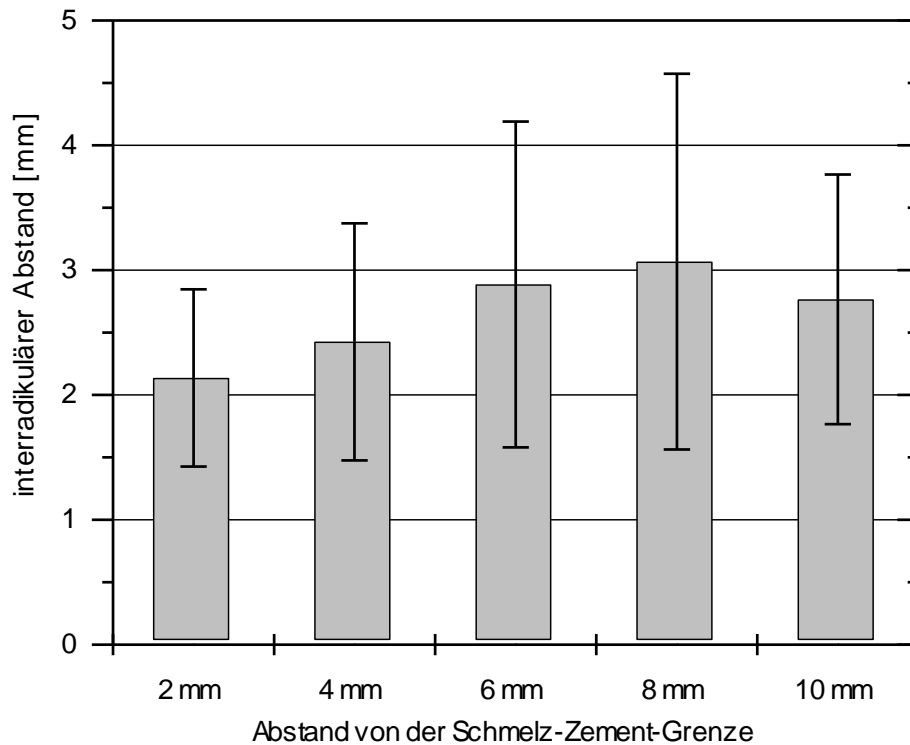


Abb. 12: Interradikulärer Raum zwischen 44-43 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze

### 6.3 Prozentualer Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm oder 4 mm Knochenangebot

Gezeigt wird der Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm oder 4 mm Knochenangebot in den Zahnzwischenräumen 47-46, 46-45, 45-44 und 44-43 sowie 33-34, 34-35, 35-36 und 36-37. In den einzelnen Abbildungen erfolgt die Darstellung für die Abstände 2 mm (Abb. 13), 4 mm (Abb. 14), 6 mm (Abb. 15), 8 mm (Abb. 16) und 10 mm (Abb. 17) von der Schmelz-Zement-Grenze.

Der prozentuale Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm Knochenangebot im Unterkiefer liegt bei einem Abstand von 2 mm oder 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze in keinem Zahnzwischenraum über 70 %. Bei einem Abstand von 6 mm oder 8 mm liegt er nur in den Zahnzwischenräumen 45-44 und 34-35 oberhalb von 70 %. Bei einem Abstand von 10 mm gilt dies für die Zahnzwischenräume 47-46, 46-45, 45-44, 34-35, 35-36 und 36-37. Die 3. These wird somit nur zum Teil bestätigt.



Der prozentuale Anteil von Patienten mit mindestens 4 mm Knochenangebot im Unterkiefer liegt in keinem Fall über 70 %. Somit bestätigt sich die 3. These nicht.

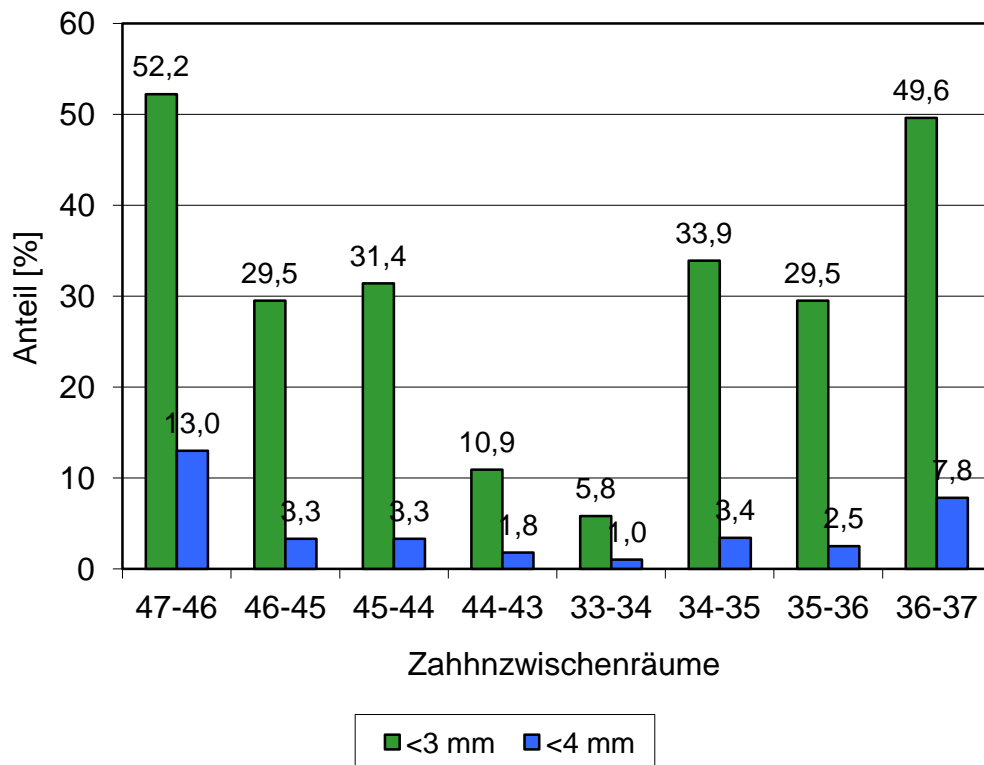


Abb. 13: Prozentualer Anteil mit einem interradikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

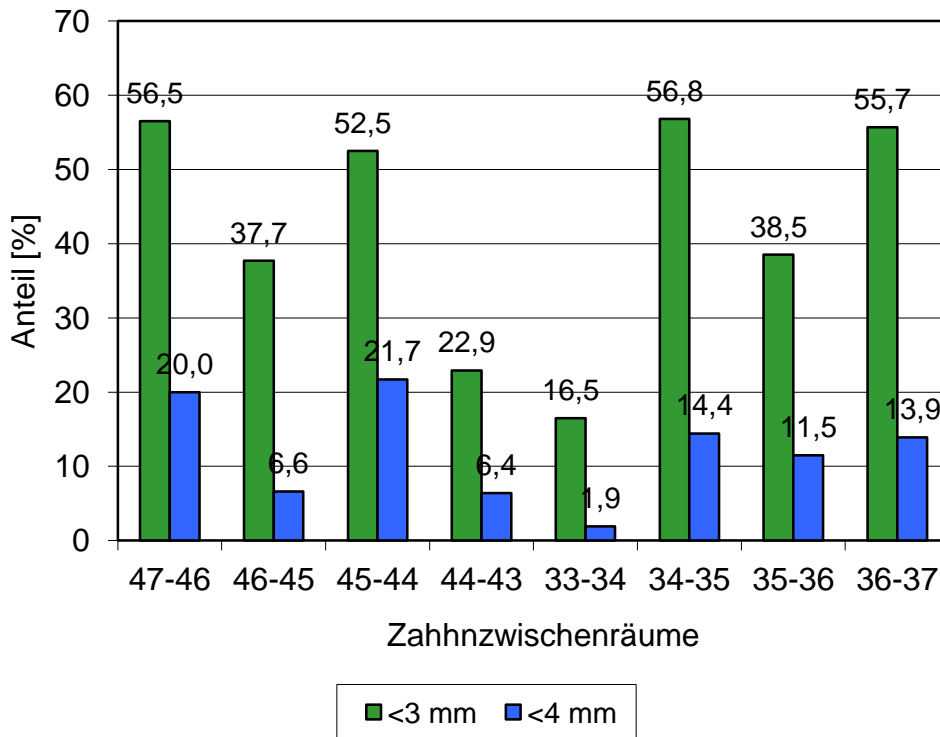


Abb. 14: Prozentualer Anteil mit einem interradiikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

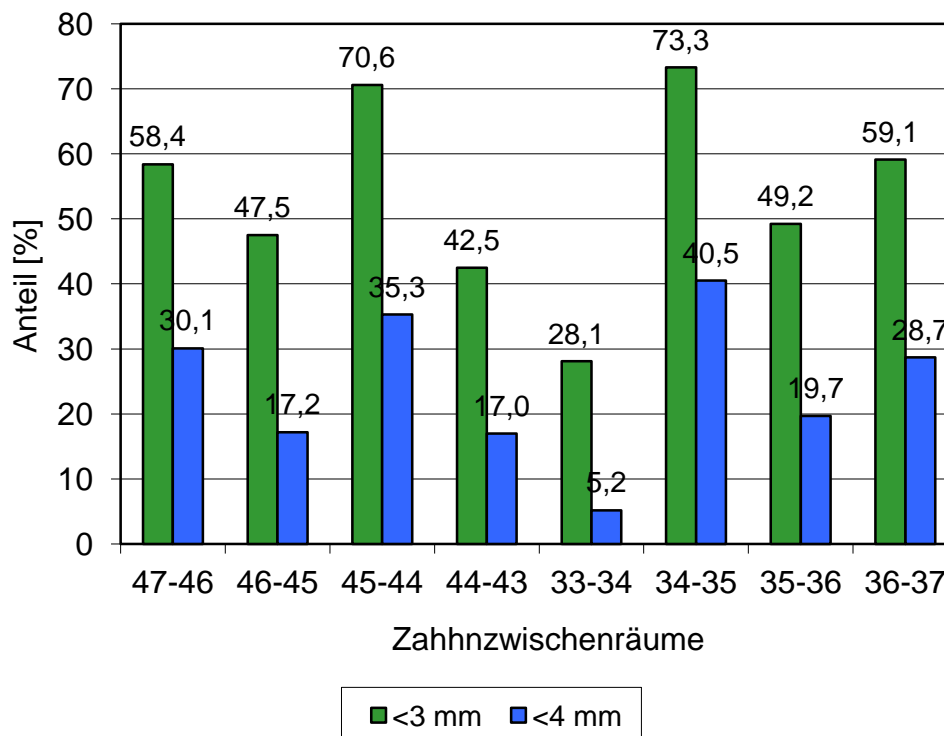


Abb. 15: Prozentualer Anteil mit einem interradiikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 6 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

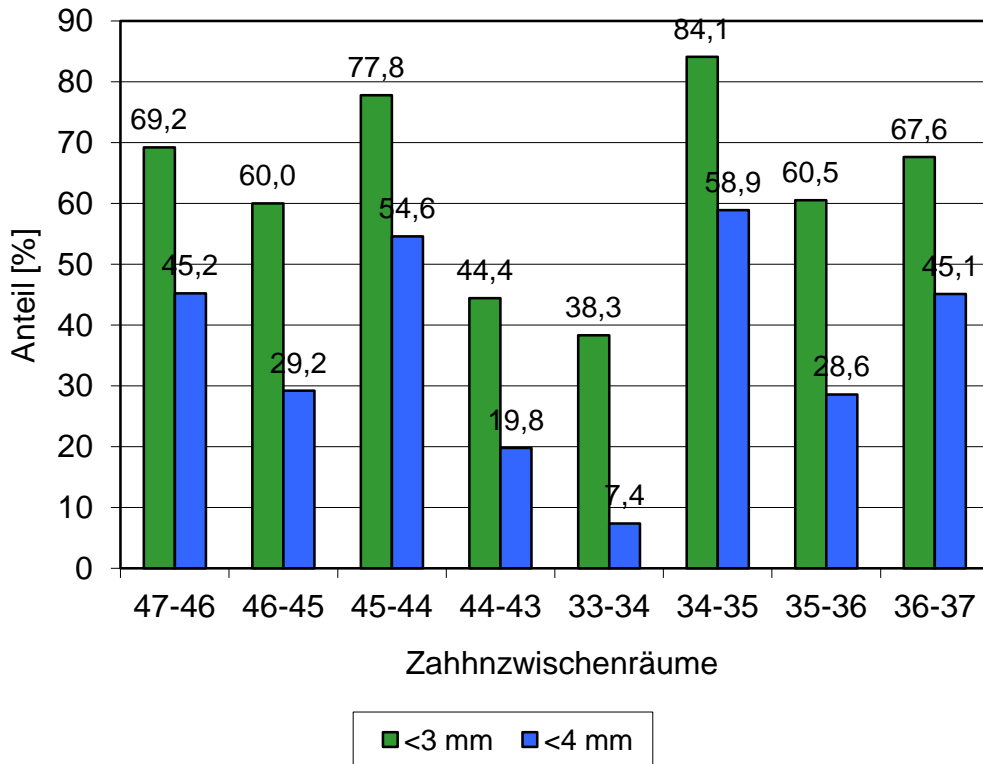


Abb. 16: Prozentualer Anteil mit einem interrädikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 8 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

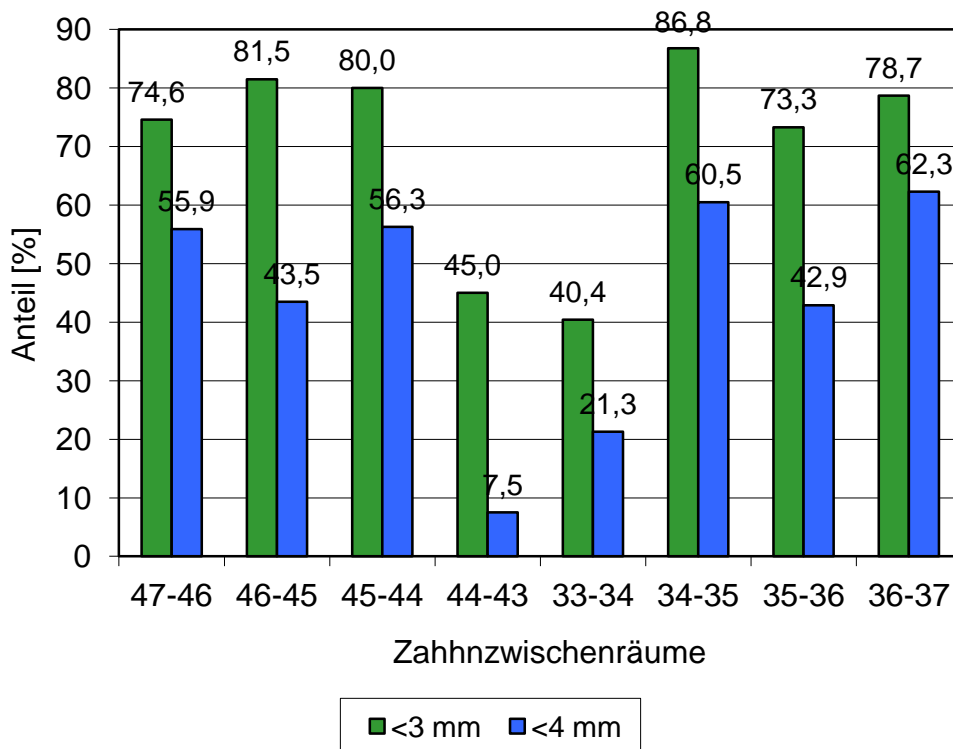


Abb. 17: Prozentualer Anteil mit einem interrädikulären Raum ab 3 mm bzw. 4 mm im Abstand von 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

#### 6.4 Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior

Es wird die mittlere Breite des Alveolarfortsatzes für die Zahnzwischenräume 47-46, 46-45, 45-44 und 44-43 sowie 33-34, 34-35, 35-36 und 36-37 tabellarisch aufgeführt (Tab. 5).

Tab. 5: Breite des Alveolarfortsatzes in mm

Zahnzwischen- raum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
47-46	12,0±2,0	13,3±1,9	13,9±1,9	14,0±1,9	13,5±1,9
46-45	10,3±1,2	11,0±1,6	11,5±1,8	11,8±1,9	11,8±1,9
45-44	9,0±1,4	9,7±1,7	10,2±1,8	10,5±1,9	10,7±1,9
44-43	9,0±1,6	9,7±1,7	9,9±1,8	10,1±1,9	10,3±2,0
33-34	8,9±1,7	9,6±1,7	9,9±1,8	10,1±1,8	10,2±2,0
34-35	8,7±1,5	9,5±1,8	10,0±1,9	10,4±1,8	10,6±1,8
35-36	10,0±1,4	10,8±1,6	11,4±1,8	11,7±1,8	11,7±1,9
36-37	12,1±2,0	13,4±2,1	14,0±2,0	14,1±1,9	13,6±2,0

Die Breite des Alveolarfortsatzes nimmt bei allen Abständen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze von anterior nach posterior kontinuierlich zu. Exemplarisch erfolgt die Darstellung für 2 mm (Abb. 18).

Die Zunahmen sind hochsignifikant ( $p < 0,01$ ) bis auf den Vergleich 44-43 vs. 45-44 und 33-34 vs. 34-35 in den Abständen 2 mm, 4 mm und 6 mm von der Schmelz-Zement-Grenze. Damit bestätigt sich die 4. These (Tab. 6).

Tab. 6: Vergleich der Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 45-44	0,783	0,742	0,0739	0,00126	0,0223
45-44 vs. 46-45	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
46-45 vs. 47-46	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
33-34 vs. 34-35	0,370	0,623	0,163	0,00619	0,00182
34-35 vs. 35-36	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
35-36 vs. 36-37	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

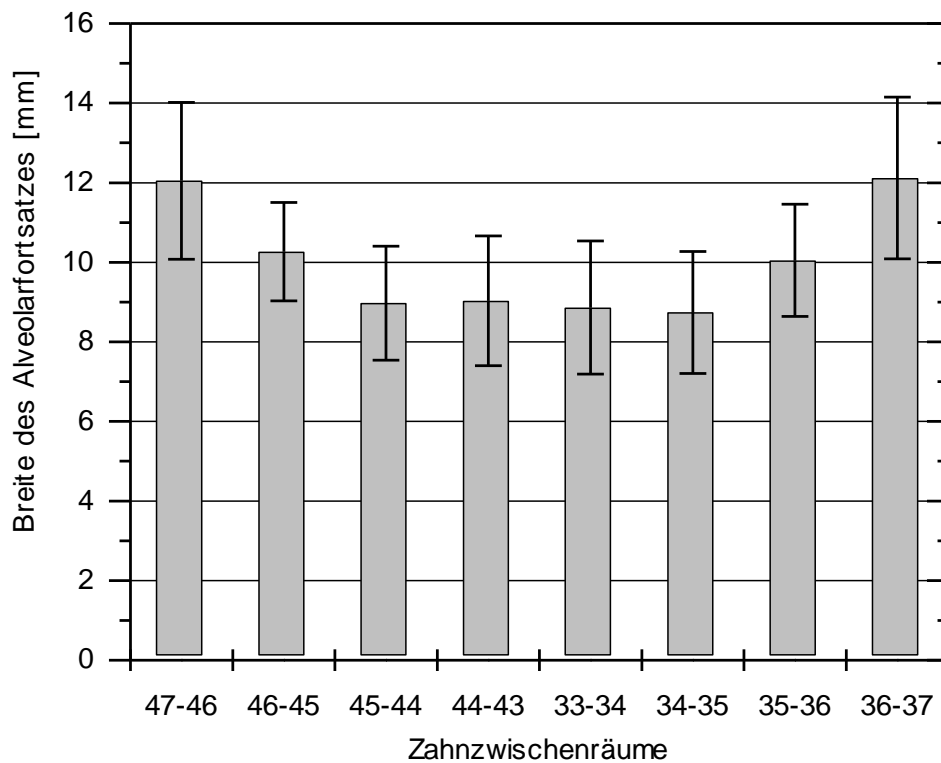


Abb. 18: Breite des Alveolarfortsatzes im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, der Verlauf bei den Abständen 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm ist vergleichbar

## 6.5 Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal

Tabellarisch aufgeführt wird die mittlere Breite des Alveolarfortsatzes für den Abstand von 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze (Tab. 5).

Bei den Zahnzwischenräumen 47-46 und 36-37 nimmt die mittlere Breite des Alveolarfortsatzes bis zum Abstand von 8 mm von der Schmelz-Zement-Grenze zu und fällt bis 10 mm ab. Exemplarisch wird nur der Zahnzwischenraum 47-46 dargestellt (Abb. 19).

Im Unterschied dazu sind bei den Zahnzwischenräumen 46-45 und 35-36 die Breite zwischen 8 mm und 10 mm konstant. Die Abbildung gibt exemplarisch den Zahnzwischenraum 46-45 an (Abb. 20).

Schließlich liegt bei den Zahnzwischenräumen 45-44, 44-43, 33-34 und 34-35 ein kontinuierlicher Anstieg vor. Die exemplarische Darstellung erfolgt für den Zahnzwischenraum 45-44 (Abb. 21).

Allgemein nimmt die Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer von zervikal nach apikal zu. Nur in den Zahnzwischenräumen 47-46 und 36-37 zeigt sich im Vergleich 8 mm vs. 10 mm wieder eine leichte Abnahme. Nach fast allen Vergleichen sind die Unterschiede hochsignifikant ( $p < 0,01$ ). Damit wird die 5. These insgesamt bestätigt (Tab. 7).

Tab. 7: Vergleich der Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal in verschiedenen Zahnzwischenräumen (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Zahnzwischenraum							
	47-46	46-45	45-44	44-43	33-34	34-35	35-36	36-37
2 mm vs. 4 mm	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
4 mm vs. 6 mm	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,00068	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
6 mm vs. 8 mm	0,510	<0,0001	<0,0001	0,00059	0,00012	<0,0001	<0,0001	0,227
8mm vs. 10mm	<0,0001	0,691	<0,0001	<0,0001	0,520	0,00071	0,0452	<0,0001

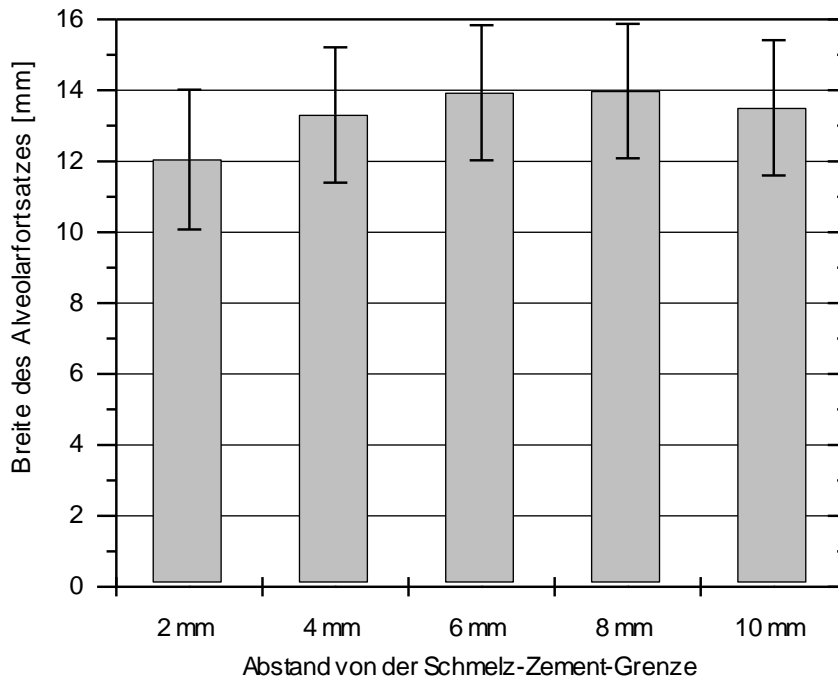


Abb. 19: Breite des Alveolarfortsatzes im Zahnzwischenraum 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der gleiche Verlauf findet sich beim Zahnzwischenraum 36-37

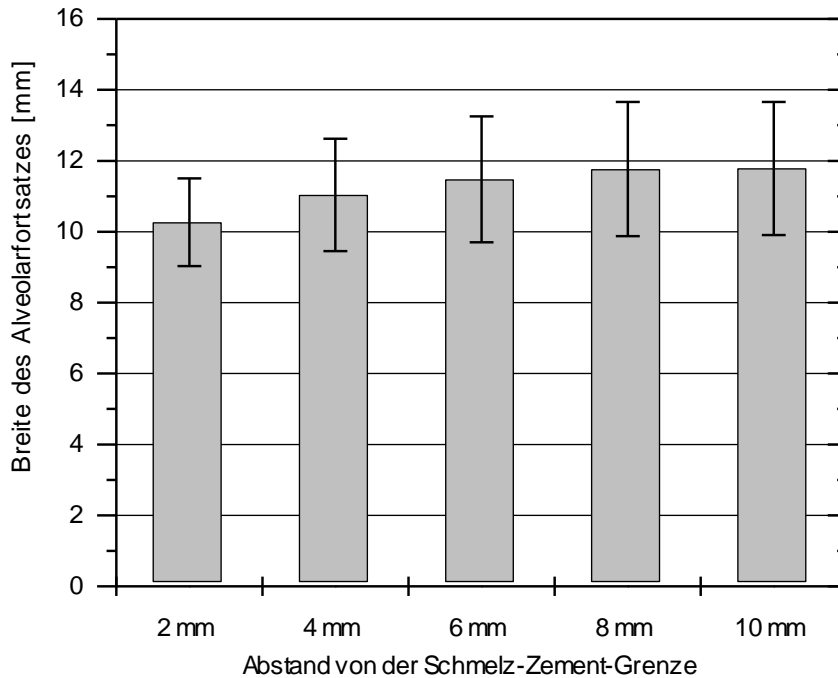


Abb. 20: Breite des Alveolarfortsatzes im Zahnzwischenraum 46-45 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, beim Zahnzwischenraum 35-36 liegt der gleiche Verlauf vor

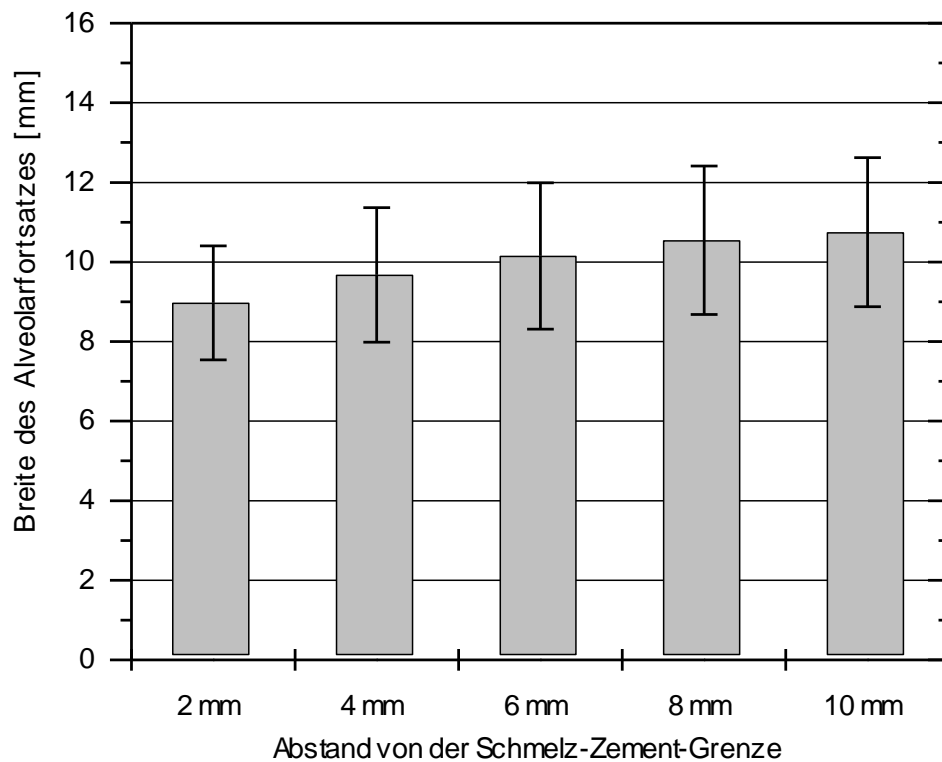


Abb. 21: Breite des Alveolarfortsatzes im Zahnzwischenraum 45-44 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der gleiche Verlauf findet sich bei den Zahnzwischenräumen 44-43, 33-34 und 34-35



## 6.6 Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior

Die Dicke der vestibulären Kortikalis wird für die Zahnzwischenräume 47-46, 46-45, 45-44 und 44-43 sowie 33-34, 34-35, 35-36 und 36-37 tabellarisch aufgeführt (Tab. 8).

Tab. 8: Dicke der vestibulären Kortikalis in mm

Zahnzwischen- raum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
47-46	2,3±0,8	2,6±0,7	2,7±0,7	2,8±0,6	2,8±0,5
46-45	1,8±0,7	1,9±0,5	2,1±0,5	2,2±0,5	2,3±0,5
45-44	1,6±0,4	1,6±0,4	1,8±0,4	2,0±0,5	2,1±0,4
44-43	1,5±0,4	1,5±0,4	1,6±0,5	1,7±0,4	1,8±0,5
33-34	1,3±0,4	1,3±0,3	1,4±0,3	1,5±0,4	1,7±0,5
34-35	1,5±0,5	1,6±0,4	1,7±0,4	1,9±0,4	2,0±0,4
35-36	1,7±0,6	1,8±0,5	1,9±0,5	2,1±0,4	2,2±0,4
36-37	2,4±0,9	2,6±0,7	2,8±0,7	2,8±0,5	2,8±0,5

Die Dicke der vestibulären Kortikalis nimmt bei allen Abständen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze von anterior nach posterior kontinuierlich zu. Exemplarisch erfolgt die Darstellung für den Abstand 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze (Abb. 22).

Die Zunahmen sind nach allen Vergleichen hochsignifikant ( $p < 0,01$ ) oder signifikant ( $p < 0,05$ ). Dies ist in Übereinstimmung mit der 6. These (Tab. 9).

Tab. 9: Vergleich der Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 45-44	0,0107	0,0486	0,00136	<0,0001	<0,0001
45-44 vs. 46-45	0,00124	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
46-45 vs. 47-46	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
33-34 vs. 34-35	0,00163	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
34-35 vs. 35-36	0,000469	0,000167	<0,0001	<0,0001	<0,0001
35-36 vs. 36-37	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

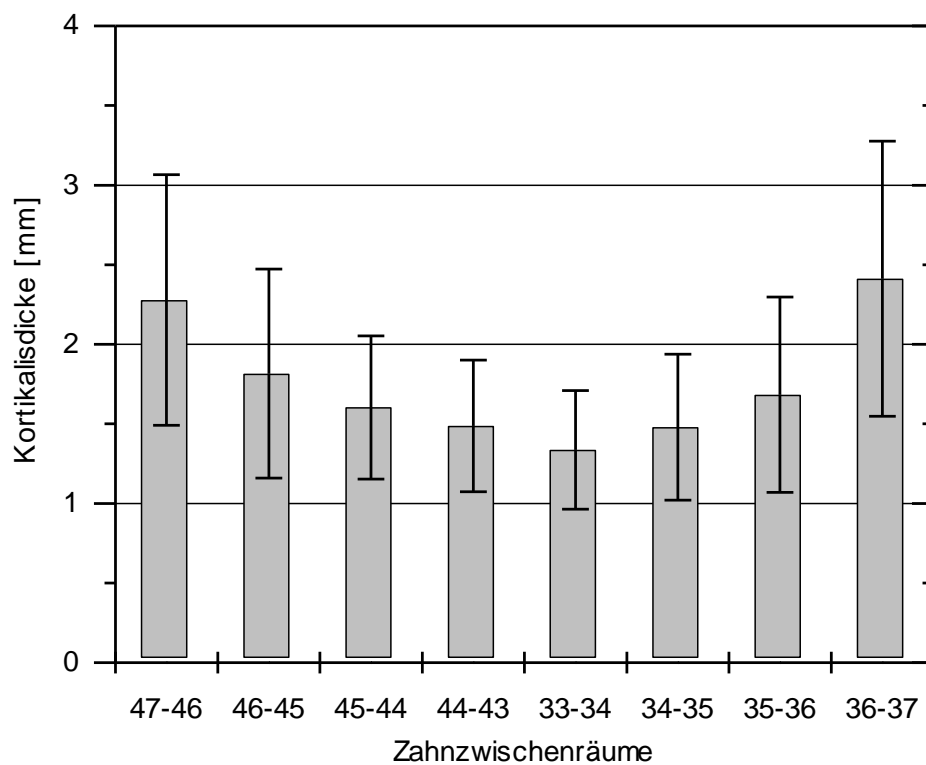


Abb. 22: Vestibuläre Kortikalis im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, ein ähnlicher Verlauf liegt auch bei den Abständen 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm vor



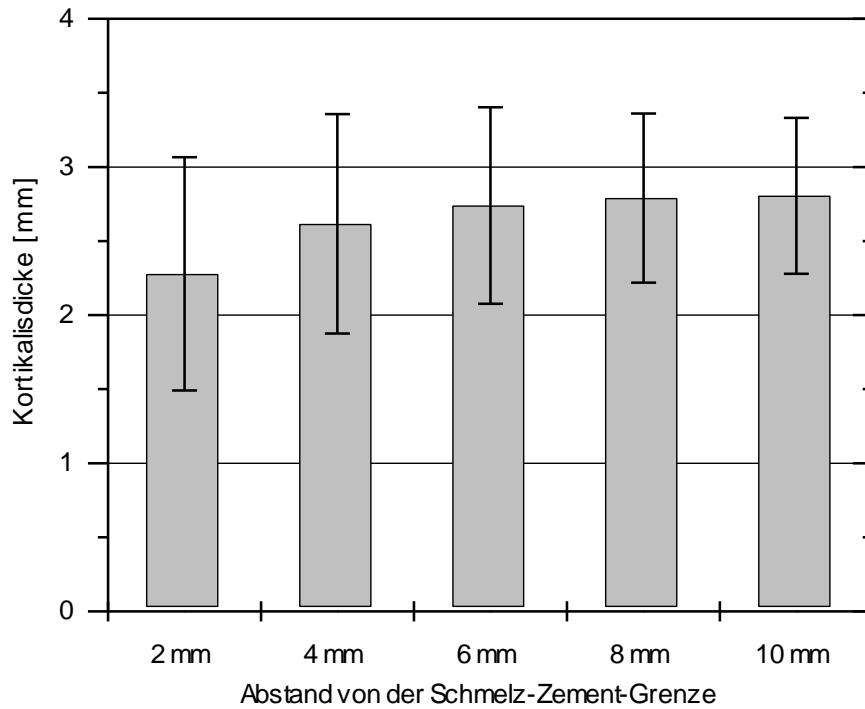


Abb. 23: Vestibuläre Kortikalis im Zahnzwischenraum 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, der gleiche Verlauf findet sich beim Zahnzwischenraum 36-37

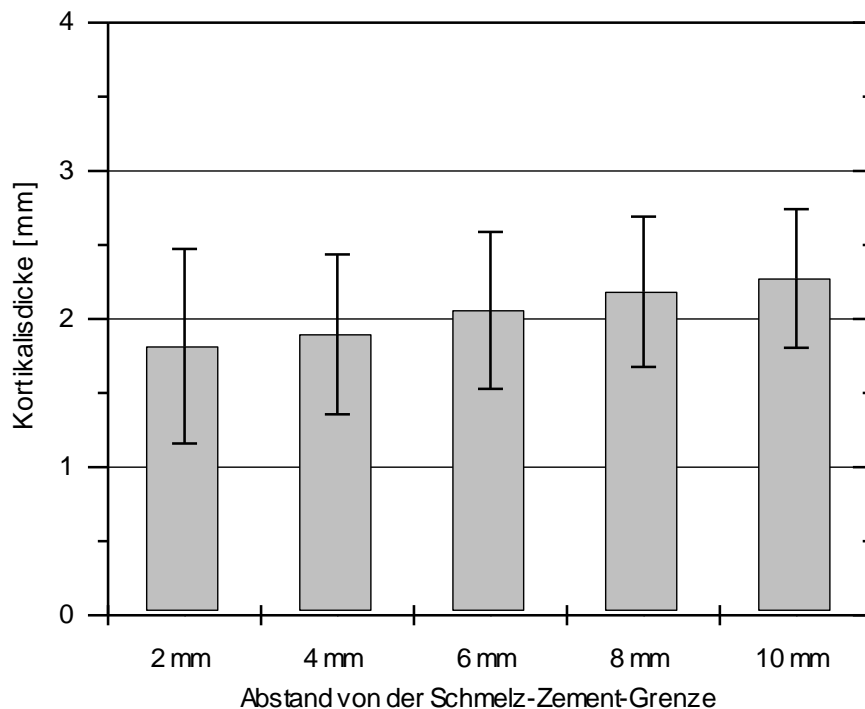


Abb. 24: Vestibuläre Kortikalis im Zahnzwischenraum 46-45 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, für die Zahnzwischenräume 45-44, 44-43, 33-34 34-35 und 35-36 liegt ein vergleichbarer Verlauf vor.

## 6.8 Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior

Die Dicke der lingualen Kortikalis wird für die Zahnzwischenräume 47-46, 46-45, 45-44 und 44-43 sowie 33-34, 34-35, 35-36 und 36-37 tabellarisch gezeigt (Tab. 11).

Tab. 11: Dicke der lingualen Kortikalis in mm

Zahnzwischen- raum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
47-46	1,8±0,5	2,0±0,4	2,3±0,4	2,4±0,5	2,3±0,5
46-45	1,9±0,5	2,2±0,5	2,3±0,5	2,4±0,5	2,4±0,5
45-44	2,1±0,7	2,5±0,7	2,6±0,5	2,6±0,5	2,6±0,5
44-43	2,3±0,8	2,3±0,6	2,3±0,5	2,3±0,5	2,4±0,5
33-34	2,2±0,7	2,4±0,7	2,4±0,6	2,3±0,5	2,3±0,5
34-35	2,1±0,8	2,4±0,8	2,5±0,6	2,5±0,5	2,5±0,4
35-36	1,8±0,5	2,0±0,5	2,2±0,5	2,3±0,5	2,3±0,5
36-37	1,8±0,5	2,0±0,4	2,2±0,4	2,4±0,5	2,4±0,6

Bei einem Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze nimmt die linguale Kortikalis von anterior nach posterior kontinuierlich ab (Abb. 25).

Bei einem Abstand von 4 mm findet sich nur im Vergleich der Zahnzwischenräume 45-44 vs. 46-45 und links sowie 34-35 vs. 35-36 rechts eine deutliche Abnahme (Abb. 26).

Schließlich wird bei den Abständen 6 mm, 8 mm und 10 mm im Vergleich der Zahnzwischenräume 44-43 vs. 45-44 links sowie 33-34 vs. 34-35 rechts zunächst eine Zunahme und im Vergleich von 45-44 vs. 46-45 links sowie 34-35 vs. 35-36 rechts wieder eine Abnahme festgestellt. Dargestellt wird dieser Verlauf exemplarisch für den Abstand 6 mm (Abb. 27).

Die meisten Vergleiche ergeben eine hohe Signifikanz ( $p < 0,01$ ). Die 8. These bestätigt sich nicht (Tab. 12).

Tab. 12: Vergleich der Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior bei verschiedenen Abständen von der Schmelz-Zement-Grenze (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 45-44	0,00306	0,0826	<0,0001	<0,0001	0,00451
45-44 vs. 46-45	0,00127	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
46-45 vs. 47-46	0,00808	0,000677	0,375	0,248	0,257
33-34 vs. 34-35	0,0281	<0,0001	0,00126	<0,0001	0,0277
34-35 vs. 35-36	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,000510
35-36 vs. 36-37	0,958	0,748	0,953	0,691	0,181

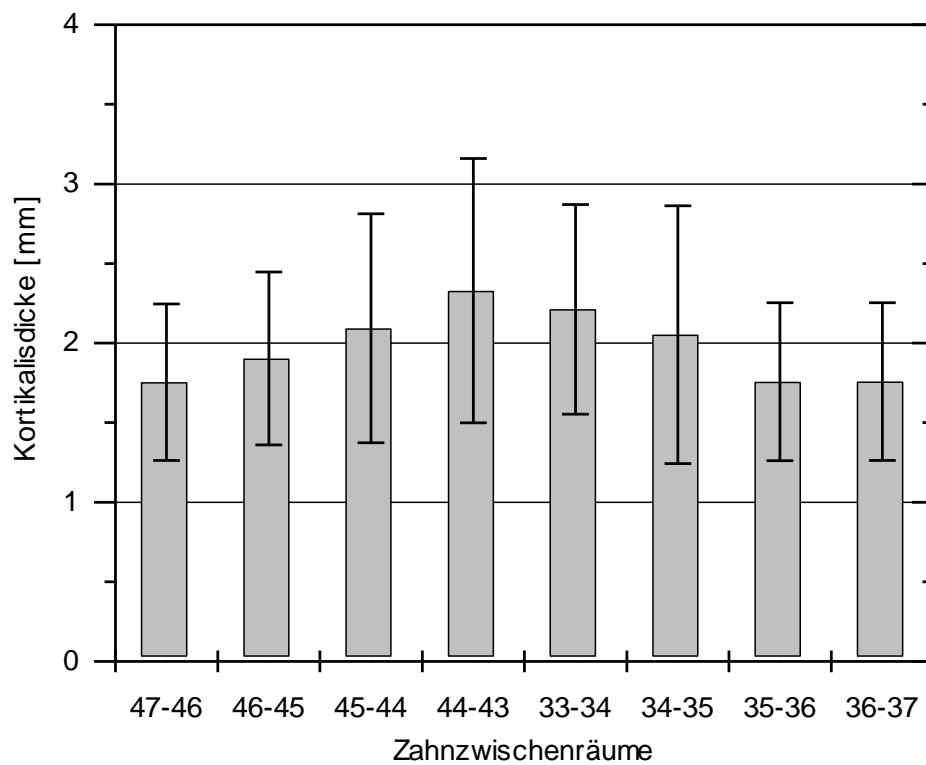


Abb. 25: Linguale Kortikalis im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

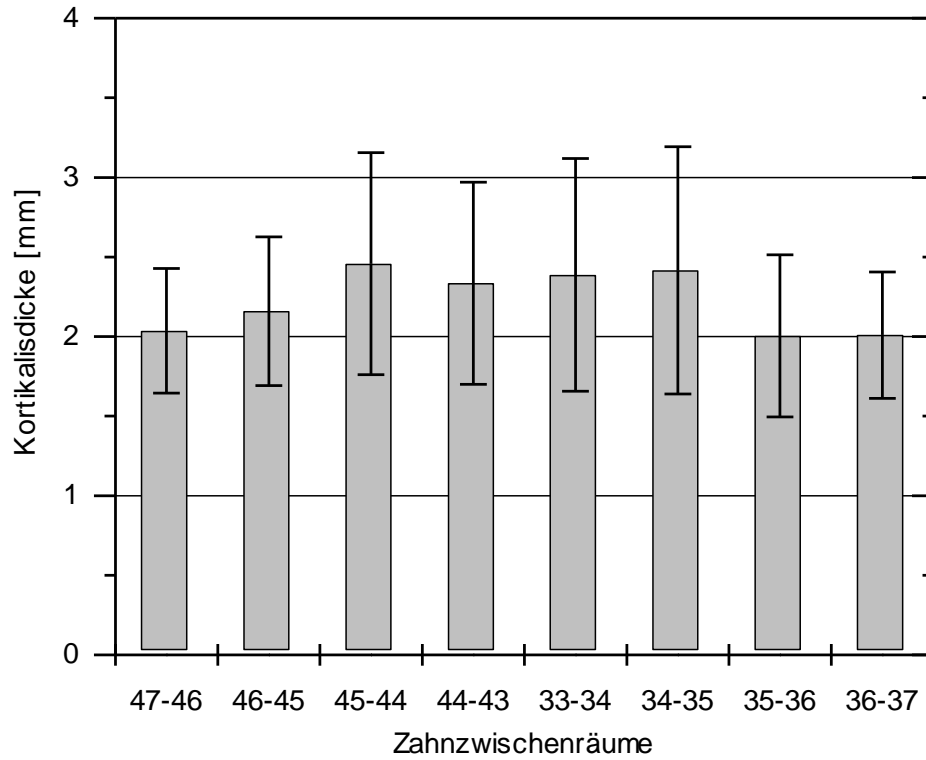


Abb. 26: Linguale Kortikalis im Abstand von 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze

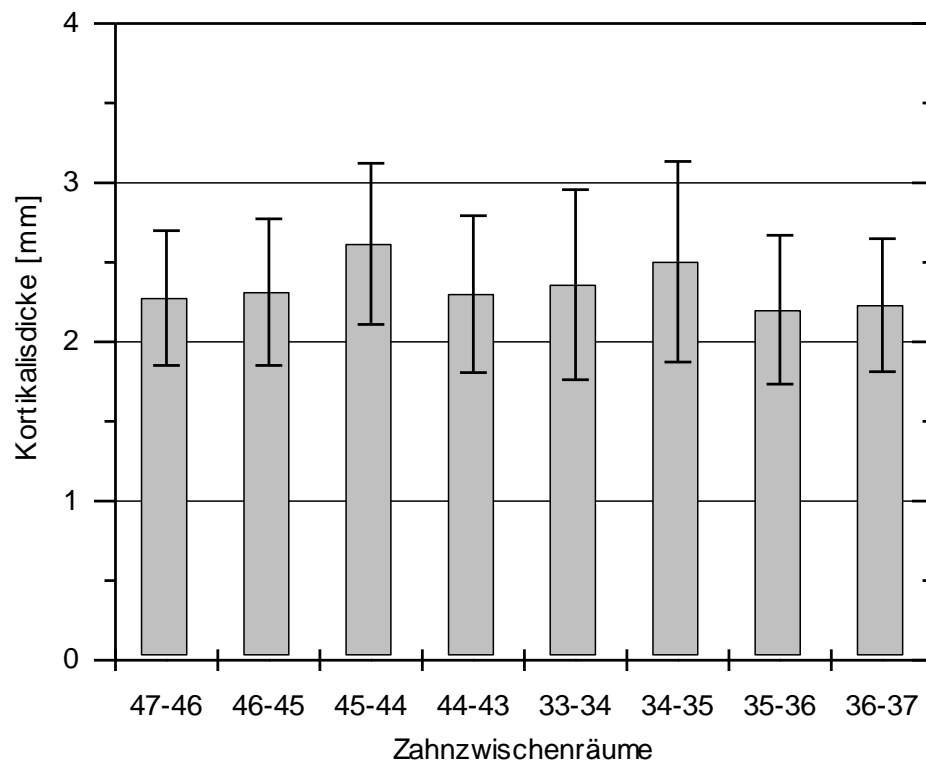


Abb. 27: Linguale Kortikalis im Abstand von 6 mm von der Schmelz-Zement-Grenze, bei den Abständen 8 mm und 10 mm ist der Verlauf ähnlich

## 6.9 Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal

Es wird die Dicke der lingualen Kortikalis für den Abstand von 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze tabellarisch gezeigt (Tab. 13).

Die Dicke der lingualen Kortikalis nimmt im Unterkiefer für den Zahnzwischenraum 47-46, 46-45, 45-44, 34-35, 35-36 und 36-37 zervikal nach apikal bis 8 mm zu. Im Vergleich der Abstände 8 mm vs. 10 mm kommt es wieder zu einer leichten Abnahme. Für den Zahnzwischenraum 47-46 erfolgt die grafische Darstellung in Abb. 28.

Bei den Zahnzwischenräumen 44-43 und 33-34 bleibt die Dicke der lingualen Kortikalis dagegen nahezu unverändert. Dies sei exemplarisch für den Zahnzwischenraum 44-43 gezeigt (Abb. 29).

Die meisten Vergleiche ergeben eine hohe Signifikanz ( $p < 0,01$ ). Damit kann die 9. These teilweise bestätigt werden (Tab. 13).

Tab. 13: Vergleich der Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal in verschiedenen Zahnzwischenräumen (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Zahnzwischenraum							
	47-46	46-45	45-44	44-43	33-34	34-35	35-36	36-37
2 mm vs. 4 mm	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,762	0,00029	<0,0001	<0,0001	<0,0001
4 mm vs. 6 mm	<0,0001	<0,0001	0,00019	0,384	0,504	0,0341	<0,0001	<0,0001
6 mm vs. 8 mm	0,00047	0,0717	0,588	0,592	0,164	0,713	0,0287	0,00012
8mm vs. 10mm	0,00976	0,473	0,0365	0,00085	0,317	0,145	0,315	0,832



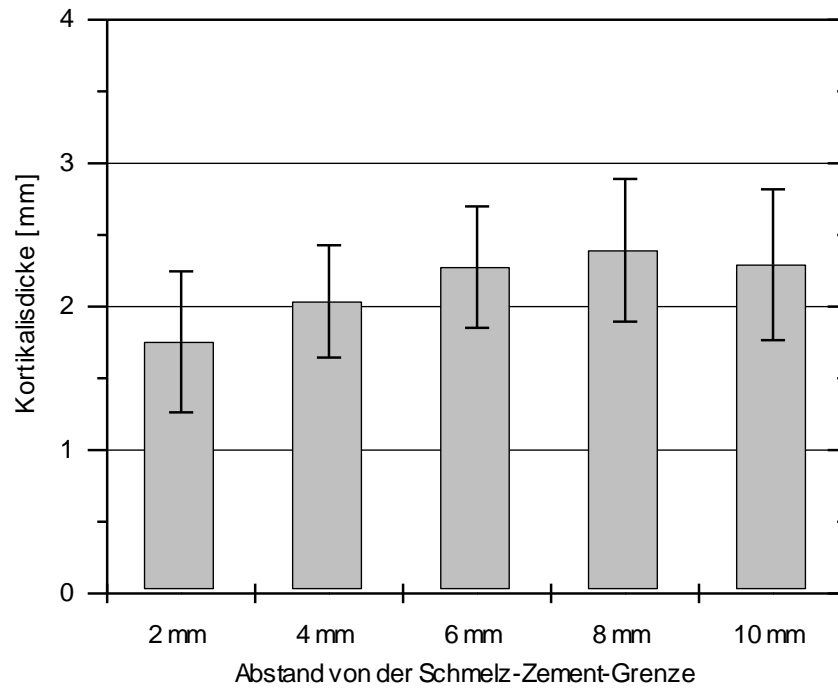


Abb. 28: Linguale Kortikalis im Zahnzwischenraum 47-46 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, für die Zahnzwischenräume 46-45, 45-44, 34-35, 35-36 und 36-37 ist der Verlauf vergleichbar

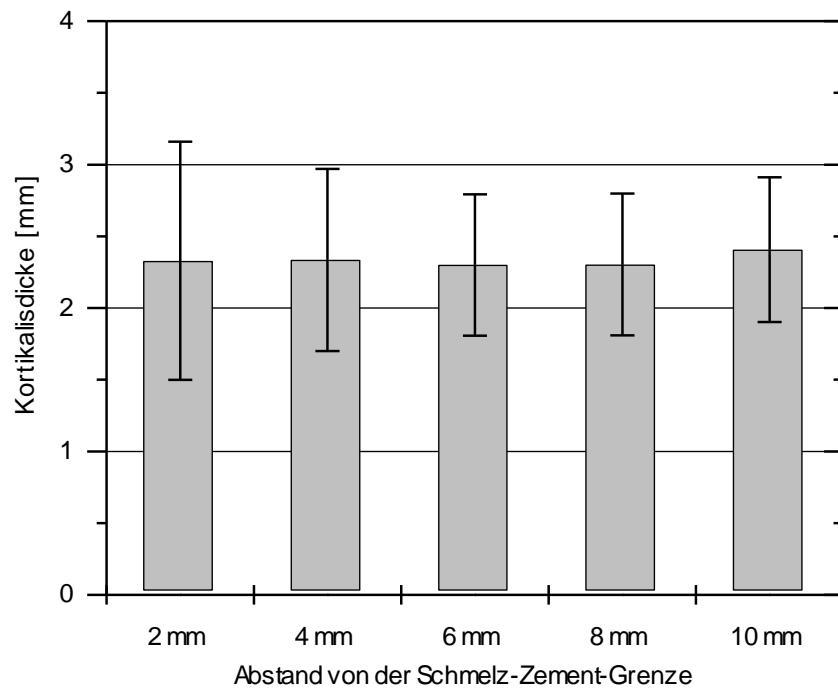


Abb. 29: Linguale Kortikalis im Zahnzwischenraum 44-43 in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze, beim Zahnzwischenraum 33-34 ist der Verlauf vergleichbar

## 6.10 Seitenvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale

Der Seitenvergleich ergibt sich aus den vorherigen Abbildungen:

- Mittleres interradikuläres Knochenangebot (Abb. 9 und Abb. 10).
- Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm oder 4 mm Knochenangebot (Abb. 13 bis Abb. 17).
- Mittlere Breite des Alveolarfortsatzes (Abb. 18).
- Dicke der vestibulären Kortikalis (Abb. 22).
- Dicke der lingualen Kortikalis (Abb. 25 bis Abb. 27).

Im Hinblick auf das interradikuläre Knochenangebot ergeben die Vergleiche bis auf eine Ausnahme zwischen linker und rechter Unterkieferhälfte keine signifikanten Unterschiede. Dies ist im Einklang mit der 10. These (Tab. 14).

Tab. 14: Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte des interradikulären Knochenangebotes (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 33-34	0,532	0,130	0,00111	0,129	0,869
45-44 vs. 34-35	0,533	0,471	0,277	0,682	0,737
46-45 vs. 35-36	0,937	0,434	0,159	0,408	0,838
47-46 vs. 36-37	0,235	0,620	0,613	0,843	0,319

Die Breite des Alveolarfortsatzes unterscheidet sich nach den meisten Vergleichen nicht zwischen linker und rechter Unterkieferhälfte. Nur bei drei Vergleichen findet sich eine Signifikanz ( $p < 0,05$ ). Die 10. These wird somit bestätigt (Tab. 15).

Tab. 15: Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte bzgl. der Breite des Alveolarfortsatzes (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 33-34	0,149	0,325	0,866	0,858	0,329
45-44 vs. 34-35	<b>0,0143</b>	0,161	0,164	0,127	0,082
46-45 vs. 35-36	<b>0,0102</b>	<b>0,0163</b>	0,118	0,166	0,659
47-46 vs. 36-37	0,655	0,447	0,622	0,382	0,322

Die vestibuläre Kortikalis ist in der linken Unterkieferhälfte im Vergleich 44-43 vs. 33-34, 45-44 vs. 34-35 und 46-45 vs. 35-36 signifikant ( $p < 0,05$ ) stärker ausgeprägt als in der rechten Unterkieferhälfte. Bezüglich 47-46 vs. 36-37 liegt kein signifikanter Seitenunterschied vor. Die 10. These kann somit nicht bestätigt werden (Tab. 16).

Tab. 16: Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte bzgl. der Dicke der vestibulären Kortikalis (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 33-34	<b>0,00355</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>0,00017</b>	<b>0,01518</b>
45-44 vs. 34-35	<b>0,00715</b>	0,251	<b>0,02919</b>	<b>0,03478</b>	<b>0,01407</b>
46-45 vs. 35-36	<b>0,01219</b>	<b>0,03943</b>	<b>0,0298</b>	<b>0,02457</b>	<b>0,03507</b>
47-46 vs. 36-37	0,140	0,838	0,953	0,618	0,481

Die linguale Kortikalis ist in der linken Unterkieferhälfte im Vergleich 45-44 vs. 34-35 und 46-45 vs. 35-36 häufig signifikant ( $p < 0,05$ ) stärker ausgeprägt als in der rechten Unterkieferhälfte. Auch hier wird die 10. These nicht bestätigt (Tab. 17).

Tab. 17: Vergleich der linken und der rechten Unterkieferhälfte bzgl. der Dicke der linguale Kortikalis (p-Wert, verbundener t-Test)

Vergleich	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
44-43 vs. 33-34	0,147	0,424	0,385	0,922	0,211
45-44 vs. 34-35	0,596	0,590	0,03383	0,00288	0,01078
46-45 vs. 35-36	0,00325	0,00026	0,0023	0,02675	0,04229
47-46 vs. 36-37	0,736	0,406	0,247	0,601	0,177

### 6.11 Geschlechtervergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale

Die männlichen und weiblichen Patienten unterscheiden sich nicht signifikant im Hinblick auf das interradikuläre Knochenangebot. Nur ein Vergleich ergibt eine Signifikanz. Dies bestätigt die 11. These (Tab. 18).

Tab. 18: Vergleich des interradikulären Knochenangebots zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test)

Vergleich, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
m vs. w, 47-46	0,327	0,346	0,964	0,794	0,948
m vs. w, 46-45	0,274	0,357	0,226	0,780	0,369
m vs. w, 45-44	0,366	0,668	0,940	0,800	0,716
m vs. w, 44-43	0,182	0,272	0,334	0,0552	0,337
m vs. w, 33-34	<b>0,0398</b>	0,124	0,100	0,988	0,771
m vs. w, 34-35	0,548	0,402	0,332	0,256	0,932
m vs. w, 35-36	0,975	0,659	0,846	0,978	0,418
m vs. w, 36-37	0,300	0,169	0,397	0,870	0,967

Der Alveolarfortsatz ist bei den männlichen Patienten an allen Stellen breiter als bei den weiblichen Patienten. Dieser Unterschied ist jedoch nur zum Teil signifikant. Eine Signifikanz wird umso eher festgestellt, je weiter anterior der Zahnzwischenraum gelegen ist und je weiter apikal die Schmelz-Zement-Grenze. Die 11. These bestätigt sich damit nicht (Tab. 19).

Tab. 19: Vergleich der Breite des Alveolarfortsatzes zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test)

Vergleich, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
m vs. w, 47-46	0,593	0,420	0,437	0,212	0,101
m vs. w, 46-45	0,188	0,161	0,0983	0,0596	0,0323
m vs. w, 45-44	0,334	0,138	0,0134	0,00168	0,00143
m vs. w, 44-43	0,00687	0,0135	0,00168	0,0014	0,00356
m vs. w, 33-34	0,107	0,0542	0,0157	0,0159	0,0203
m vs. w, 34-35	0,282	0,265	0,0466	0,00406	0,00497
m vs. w, 35-36	0,461	0,464	0,303	0,208	0,129
m vs. w, 36-37	0,559	0,549	0,348	0,212	0,0811

Die vestibulären Kortikalis ist bei den weiblichen Patienten an allen Stellen dicker als bei den männlichen Patienten. Allerdings erweist sich dieser Unterschied nur an wenigen Stellen als signifikant. Meist liegt eine Signifikanz beim Zahnzwischenraum 36-37 vor. Die 11 These wird somit nicht bestätigt (Tab. 20).

Tab. 20: Vergleich der vestibulären Kortikalis zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test)

Vergleich, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
m vs. w, 47-46	0,618	0,338	0,0668	0,164	0,691
m vs. w, 46-45	0,502	0,294	0,610	0,875	0,338
m vs. w, 45-44	0,304	0,368	0,724	0,749	0,758
m vs. w, 44-43	0,540	0,898	0,986	0,903	0,503
m vs. w, 33-34	0,424	0,203	0,268	0,235	0,192
m vs. w, 34-35	0,0179	0,556	0,728	0,484	0,580
m vs. w, 35-36	0,331	0,100	0,0831	0,236	0,95
m vs. w, 36-37	0,0654	0,0260	0,0125	0,0307	0,0795

Auch die linguale Kortikalis ist bei den weiblichen Patienten dicker als bei den männlichen Patienten. Dabei ist auch dieser Unterschied an den meisten Stellen nicht signifikant. Eine Signifikanz wird am ehesten anterior festgestellt. Auch hier liegt keine Bestätigung der 11. These vor (Tab. 21).

Tab. 21: Vergleich der lingualen Kortikalis zwischen männlichen und weiblichen Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test)

Vergleich, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
m vs. w, 47-46	0,907	0,415	0,495	0,303	0,457
m vs. w, 46-45	0,505	0,269	0,612	0,960	0,942
m vs. w, 45-44	0,0463	0,102	0,225	0,477	0,082
m vs. w, 44-43	0,0336	0,0557	0,0914	0,138	0,371
m vs. w, 33-34	0,00160	0,0225	0,0300	0,137	0,0873
m vs. w, 34-35	0,0181	0,00879	0,224	0,874	0,799
m vs. w, 35-36	0,321	0,134	0,748	0,667	0,230
m vs. w, 36-37	0,0893	0,0567	0,116	0,0262	0,0641

## 6.12 Altersabhängigkeit bezüglich der zu untersuchenden Merkmale

Es besteht eine negative Korrelation zwischen dem Alter der Patienten und dem interradikulären Knochenangebot. Dies bedeutet, dass das interradikuläre Knochenangebot mit zunehmendem Alter abnimmt. Signifikant ist die Korrelation für die Zahnzwischenräume 47-46, 46-45, 45-44, 34-35, 35-36 und 36-37. Dies ist im Widerspruch zur 12. These (Tab. 22).

Tab. 22: Zusammenhang zwischen dem interradikulären Knochenangebot und dem Alter der Patienten (p-Wert, Spearman Rangkorrelation)

Korrelation, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
Alter, 47-46	0,00075	0,00240	0,00322	0,000607	0,257
Alter, 46-45	0,000114	0,000633	0,00237	0,00200	0,00383
Alter, 45-44	0,0120	0,00104	0,00030	0,000789	0,00253
Alter, 44-43	0,467	0,144	0,0678	0,0727	0,0881
Alter, 33-34	0,249	0,422	0,459	0,194	0,0511
Alter, 34-35	0,0628	0,00655	0,00225	0,0013	0,00148
Alter, 35-36	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,00012	0,00017
Alter, 36-37	0,0737	0,0212	0,00664	0,00167	0,244

Es besteht eine negative Korrelation zwischen dem Alter der Patienten und der Breite des Alveolarfortsatzes. Der Alveolarfortsatz wird mit zunehmendem Alter schmaler. An fast allen Stellen ist die Korrelation für die Zahnzwischenräume 47-46, 46-45, 45-44, 34-35, 35-36 und 36-37 signifikant. Für die Zahnzwischenräume 44-43 und 33-34 ist die Korrelation nur sehr schwach ausgeprägt und nicht signifikant. Insgesamt kann die 12. These nicht bestätigt werden.



Tab. 23: Zusammenhang zwischen der Breite des Alveolarfortsatzes und dem Alter der Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test)

Vergleich, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
Alter, 47-46	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,167
Alter, 46-45	0,00065	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Alter, 45-44	0,00198	0,00092	0,00238	0,00453	0,00965
Alter, 44-43	0,185	0,191	0,179	0,210	0,177
Alter, 33-34	0,133	0,171	0,239	0,298	0,206
Alter, 34-35	0,0242	0,0592	0,060	0,0507	0,0567
Alter, 35-36	0,0319	0,00369	0,00035	<0,0001	0,00010
Alter, 36-37	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0082	0,306

Die vestibuläre Kortikalis korreliert bei den Zahnzwischenräumen 33-34 und 34-35 signifikant positiv mit dem Alter. Bei den Zahnzwischenräumen 47-46 und 36-37 besteht dagegen eine signifikant negative Korrelation mit dem Alter (Tab. 24).

Tab. 24: Zusammenhang zwischen der vestibulären Kortikalis und dem Alter der Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test), positive, negative Korrelation

Vergleich, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
Alter, 47-46	0,00585	0,000104	0,0107	0,179	0,305
Alter, 46-45	0,421	0,0970	0,106	0,116	0,152
Alter, 45-44	0,152	0,0336	0,0781	0,0752	0,0276
Alter, 44-43	0,45192	0,106	0,228	0,197	0,0283
Alter, 33-34	0,184	0,00419	0,00639	0,0104	0,00592
Alter, 34-35	0,00136	0,000220	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Alter, 35-36	0,0450	0,0473	0,176	0,289	0,272
Alter, 36-37	0,00639	0,00994	0,0380	0,0236	0,173

Die linguale Kortikalis korreliert bei dem Zahnzwischenraum 35-36 signifikant positiv mit dem Alter. Die 12. These kann insgesamt nicht bestätigt werden (Tab. 25).

Tab. 25: Zusammenhang zwischen der linguale Kortikalis und dem Alter der Patienten (p-Wert, unverbundener t-Test)

Vergleich, Zwischenraum	Abstand von der Schmelz-Zement-Grenze				
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
Alter, 47-46	0,486	0,319	0,453	0,407	0,0335
Alter, 46-45	0,345	0,130	0,250	0,237	0,199
Alter, 45-44	0,207	0,427	0,274	0,408	0,426
Alter, 44-43	0,462	0,340	0,193	0,186	0,108
Alter, 33-34	0,485	0,134	0,118	0,0803	0,0151
Alter, 34-35	0,0778	0,0417	0,0209	0,268	0,203
Alter, 35-36	0,0935	0,000965	0,00489	0,0237	0,0222
Alter, 36-37	0,177	0,326	0,480	0,449	0,104

### 6.13 Fehlerberechnung

Nach erneuter Vermessung unter gleichen Bedingungen von 8 zufällig ausgewählten DVT-Datensätzen ergaben sich nach Berechnung mittels Dahlberg-Formel die in Tab. 26 aufgeführten Werte. Da alle Werte unter 1 lagen, konnte bei den durchgeführten Messungen von einer ausreichenden Genauigkeit des Messverfahrens ausgegangen werden.

Tab. 26: Ergebnisse des Methodenfehlers mittels Dahlberg-Formel

Interradikulärer Abstand	Breite Alveolarfortsatz	Vestibuläre Kortikalis	Linguale Kortikalis
0,26	0,15	0,34	0,42

## 7 Diskussion

### 7.1 Diskussion der Methoden

#### 7.1.1 Probanden

An der vorliegenden Studie zum Platzangebot im Alveolarknochen im Unterkiefer nahmen 123 Patienten teil. Dies war im Vergleich mit der Literatur eine außerordentlich hohe Zahl. Dagegen waren die Fallzahlen in den meisten veröffentlichten Studien zum interradikulären Platzangebot und zur Ausdehnung des Alveolarkamms weitaus geringer (Tab. 27). Deren Aussagekraft ist entsprechend eingeschränkt, da nur Untersuchungen mit einer hohen Fallzahl zu statistisch validen Ergebnissen führen. Eine hohe Fallzahl stellt eine der Grundvoraussetzungen dar, um gesicherte Daten zu den anatomischen Verhältnissen im Unterkiefer zu gewinnen. Damit können praxisrelevante Hinweise zur sicheren Insertion von kieferorthopädischen Minischrauben erlangt werden. Zu beachten ist aber, dass das mittlere Knochenangebot bei Fehlstellungen abweicht (Baysal et al. 2013, Chaimanee et al. 2011, Horner et al. 2012), die hier bestimmten Werte also nicht für alle Patienten gleichermaßen verwendet werden können.

Zu den Studien an Lebenden kommen noch einige Studien an Leichen (Baumgaertel 2009, 2011, Baumgaertel und Hans 2009, Hu et al. 2009, Kim et al. 2006, Monnerat et al. 2009). Diese Studien wurden nicht berücksichtigt, da totes Gewebe Schrumpfungsvorgängen unterliegt (Lim et al. 2007, Zhao et al. 2013). Hinzu kommt, dass die praktische Anwendung von Minischrauben bei Lebenden nach vorheriger radiologischer Untersuchung erfolgt. Die Studien an Lebenden sind daher eindeutig näher an der Realität und die so erhaltenen Daten eher praktisch verwertbar. In der eigenen Studie war das Geschlechterverhältnis fast ausgeglichen, mit einem Anteil von 45,5 % männlichen und 54,5 % weiblichen Patienten. Die Altersspanne lag zwischen 10 und 21 Jahren, es handelte sich überwiegend um Jugendliche, woraus sich ein Altersmittelwert von  $15,2 \pm 5,4$  Jahren ergibt. Auch nach den meisten Studien war das Geschlechterverhältnis ausgewogen (Tab. 27).

Tab. 27: Studien zum Platzangebot im Alveolarknochen im Unterkiefer in vivo

Autoren	Anz.	männlich	weiblich	Alter [Jahre]	Methode
Deguchi et al. (2006)	10	5 (50 %)	5 (50 %)	22,3	CT
Farnsworth et al. (2011)	52	26 (50 %)	26 (50 %)	11-45	DVT
Fayed et al. (2010)	100	46 (46 %)	54 (54 %)	20 (13-27)	DVT
Hernández et al. (2008)	21	14 (67 %)	7 (33 %)	17-21	CT
Kim und Park (2012)	30	15 (50 %)	15 (50 %)	26,4±4,0	CT
Lee et al. (2009)	49	24 (49 %)	25 (51 %)	27,8±7,3	CT
Lim et al. (2008)	28	14 (50 %)	14 (50 %)	27,3 (23-35)	CT
Lim et al. (2009)	28	14 (50 %)	14 (50 %)	27,3 (23-35)	CT
Ono et al. (2008)	43	11 (26 %)	32 (74 %)	24,0±8,2 (13-48)	DVT
Pan et al. (2013)	40	20 (50 %)	20 (50 %)	16-32	DVT
Park und Cho (2009)	60	30 (50 %)	30 (50 %)	27,1	DVT
Park et al. (2010)	25	14 (56 %)	11 (44 %)	25,6 (18-32)	DVT
Poggio et al. (2006)	25			20-40	DVT
Präger et al. (2013)	51	27 (53 %)	24 (47 %)	24,0±8,1 (16-52)	MSCT
Silvestrini Biavati et al. (2011)	25	10 (40 %)	15 (60 %)	18-58	MSCT
Swasty et al. (2009)	113	44 (39 %)	69 (61 %)	10-65	DVT
Zhao et al. (2013)	32	16 (50 %)	16 (50 %)	30,1 (21-44)	DVT
Eigene Studie	123	56 (46 %)	67 (54 %)	15,2±5,4 (10-21)	DVT

### 7.1.2 Messmethoden

Die eigenen Messungen wurden mithilfe der digitalen Volumentomografie (DVT) (engl.: cone beam computed tomography (CBCT)) durchgeführt. Die DVT zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit aus (Damstra et al. 2010, Sherrard et al. 2010) mit gleichzeitig exzellenter Qualität der dargestellten Hartgewebe aus (Carrafiello et al. 2010). Für lineare Messstrecken lagen die relativen Fehler bei 2,3 % und 4,7 %, entsprechend einer möglichen Ungenauigkeit von 0,23 mm bzw. 0,47 mm auf einer Strecke von 10 mm (Suomalainen et al. 2008). Mit einem Multi-Slice-CT (MSCT) wird zwar eine noch etwas höhere Dimensionstreue (Liang et al. 2010) und Auflösung (Kyriakou et al. 2011) erreicht, auf der anderen Seite bestehen jedoch höhere Kosten und eine höhere Strahlenexposition als bei der DVT (Carrafiello et al. 2010, Loubele et al. 2008).

Die DVT-Diagnostik ist dann indiziert, wenn ihr gesundheitlicher Nutzen gegenüber dem Strahlenrisiko überwiegt und andere bildgebende Verfahren mit geringerer Strahlenbelastung für diese Diagnostik nicht ausreichend sind (Schulz 2014). Gerade bei Kindern muss der diagnostische Nutzen gegen die Strahlenbelastung abgewogen werden (Shin et al. 2014). Es gibt derzeit noch keine prospektiven Studien darüber, ob niedrige Strahlendosen von weniger als 100 mSv zu einem erhöhten Krebsrisiko führen (Lee et al. 2015). Grundsätzlich ist eine Indikation für die DVT-Diagnostik umso eher gegeben, je geringer die Strahlendosis und damit das Risiko ist. Es wurde festgestellt, dass über die Wahl der Parameter ein großes Potenzial zur Dosisreduktion bei nur minimalem Verlust an Bildqualität besteht (Pauwels et al. 2014a). Eine beträchtliche Dosisreduktion kann auch über eine Einschränkung des Sichtfelds (Field of View) erreicht werden (Pauwels et al. 2014b). Eine Reduktion der Strahlendosis könnte auch mit der neuesten Gerätegeneration und einem Ultra Low Dose Modus erreicht werden. Tatsächlich bestehen bei verschiedenen Geräten sehr starke Unterschiede in der Strahlendosis. So wurden bei 14 verschiedenen DVT-Geräten effektive Strahlendosen zwischen 19  $\mu$ Sv und 368  $\mu$ Sv (Pauwels et al. 2012) ermittelt. Diese großen Schwankungsbereiche lassen sich auch in anderen Studien finden, so dass eine Verallgemeinerung bzgl. der Strahlenbelastung nicht zulässig ist. Vielmehr ist eine individuelle Abhängigkeit von der Größe des Abbildungsvolumens, der gewählten Einstellungen (Protokolle), dem Untersuchungsgebiet und dem Gerät an sich gegeben. Aus Gründen des Strahlenschutzes sollte der Aufnahmebereich auf diagnoserelevante anatomische Strukturen begrenzt werden. Die Geräteeinstellungen sollten nach Möglichkeit so gewählt werden, dass die Strahlenbelastung für den Patienten möglichst gering ist. Dies gilt insbesondere für DVT-Aufnahmen bei jugendlichen Patienten, die besonders strahlensensibel reagieren (Hofmann et al. 2014).

Die Durchführung der Messungen erfolgte mit der Bildbearbeitungssoftware SimPlant 15.0 der Firma Materialise Dental. Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Programms konnte bereits bestätigt werden (Kim et al. 2008, Damstra et al. 2010).

Alle Messungen wurden vom gleichen Untersucher vorgenommen, um individuelle Messabweichungen zu vermeiden. Mittels Dahlberg-Formel wurde eine ausreichende Messgenauigkeit (relativer Wert  $< 1$ ) ermittelt. Dafür wurden 8 Patienten nach 2 Monaten unter gleichen Bedingungen erneut vermessen. Die relativen Werte für die Kortikalis waren etwas höher (0,34/0,42) als für den Interradikularraum und die Alveolarfortsatzbreite. Dies lag an leichten Überlagerungen benachbarter Wurzeln in die Schnittebene aufgrund des Verlaufs des Unterkiefers. Bei allen Messungen wurde die Schmelz-Zement-Grenze als Referenzebene genommen, da im Gegensatz zum crestalen Knochen keine Beeinflussung durch Parodontitiden vorliegt und so

klinisch reproduzierbarere Ergebnisse zu erwarten sind. Wenn die Schmelz-Zement-Grenzen benachbarter Zähne nicht auf einer Höhe lagen, wurde die Differenz bis zu einem maximalen Höhenunterschied von 1 mm halbiert und als Referenzebene definiert. Daraus ergeben sich Abweichungen der Messebenen in koronoapikaler Richtung zur Schmelz-Zement-Grenze von maximal 0,5 mm.

## **7.2 Diskussion der Ergebnisse**

### **7.2.1 Interradikuläres Knochenangebot von anterior nach posterior**

Die erste These dieser Studie, nach der das interradikuläre Knochenangebot im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zunimmt, konnte bestätigt werden. Die Zunahme betraf vor allem die Zahnzwischenräume 44-43 vs. 45-44 bzw. 33-34 vs. 34-35.

Das niedrigste Knochenangebot lag in den Zahnzwischenräumen zwischen Eckzahn und 1. Prämolare (44-43 bzw. 33-34) im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze mit  $2,1 \pm 0,7$  mm (0,6-4,7 mm) vor. In den Zahnzwischenräumen zwischen den beiden Prämolaren (45-44 bzw. 34-35) im Abstand von 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze war das Knochenangebot mit  $4,5 \pm 1,6$  mm (1,5-8,0 mm) am größten.

Die Zunahme des interradikulären Knochenangebots von anterior nach posterior zeigte sich auch in allen Studien zum Platzangebot im Alveolarknochen im Unterkiefer in vivo. Auch hier lag der größte Sprung in den Zahnzwischenräumen 44-43 vs. 45-44 bzw. 33-34 vs. 34-35 vor (Tab. 28). Nahezu alle Werte lagen in der gleichen Größenordnung. Lediglich Hernández et al. (2008) ermittelten bei den Zahnzwischenräumen 5-6 und 6-7 etwas größere Werte (Tab.28).

Nach den eigenen Ergebnissen streuten die Werte in einem weiten Bereich. Dies deckt sich auch mit der Literatur, so war die Standardabweichung als Maß für die Streuung vergleichbar (Tab.28). Dies bedeutet, dass selbst bei einem Mittelwert, der deutlich über dem geforderten Platzbedarf liegt, es immer noch zahlreiche Patienten gibt, bei denen der Platz an der jeweiligen Lokalisation nicht ausreicht (siehe Kap. 7.2.3). Aufgrund dieser interindividuellen Variabilität ist eine präoperative Bestimmung der Platzverhältnisse notwendig. Dieser Standpunkt wird auch von anderen Autoren vertreten (Martinelli et al. 2010).

### **7.2.2 Interradikuläres Knochenangebot von zervikal nach apikal**

Auch die zweite These dieser Studie, nach der das interradikuläre Knochenangebot im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zunimmt, wurde bestätigt.

Diese Zunahme fand sich in allen Studien zum Platzangebot im Alveolarknochen im Unterkiefer in vivo und lag auch in der gleichen Größenordnung (Tab.28).

Tab. 28: Studien zum interradikulären Platzangebot im Alveolarknochen im Unterkiefer in vivo

Zahn-zwischenraum	Höhe [mm]	Fayed et al. (2010)	Hernández et al. (2008)	Lee et al. (2009)	Pan et al. (2013)	Park und Cho (2009)	Park et al. (2010)	Poggio et al. (2006)	Silvestrini Biavati et al. (2011)	Eigene Studie
3-4	2	3,1±1,0	2,5±1,0	1,9±0,6	2,5±0,5			2,7±0,7		2,1±0,7
	4	3,2±1,0		2,4±0,1	2,8±0,6					2,4±0,9
	6	3,2±1,0	3,0±1,4	2,8±0,8	2,9±0,7	2,1±0,7		2,8±0,9	2,8±1,0	2,7±1,1
	8		3,5±2,1	2,9±0,8		2,4±0,8		3,0±1,0	3,3±1,0	2,9±1,3
	10					2,7±1,0		3,5±1,2	4,1±0,8	2,9±1,0
4-5	2	3,9±1,0	3,0±0,5	2,5±0,5	3,3±0,7			3,2±0,6		2,6±0,7
	4	4,5±1,3		3,4±0,6	3,9±0,8					3,1±1,0
	6	5,0±1,3	2,8±0,6	4,0±0,7	4,2±1,0	2,9±0,8		3,7±0,8	3,3±1,0	3,6±1,2
	8		3,3±0,8	4,1±0,8		3,4±1,0		4,3±0,9	3,8±1,1	4,1±1,4
	10					3,9±1,2		4,9±1,0	4,0±1,3	4,5±1,6
5-6	2	4,3±1,2	3,3±0,9	2,6±0,6	3,6±0,7		3,0±0,5	3,0±0,8		2,7±0,8
	4	4,6±1,4		3,3±0,7	4,1±1,0					2,8±0,8
	6	5,0±1,7	4,0±1,0	3,6±0,8	4,3±1,2	2,8±0,8	3,2±0,7	2,9±0,8	2,7±0,7	3,0±1,0
	8		5,3±1,5	4,0±0,8		3,1±0,9	3,8±0,9	3,1±0,9	3,3±1,0	3,4±1,4
	10					3,6±1,1		3,9±1,3	3,6±0,8	4,0±1,3
6-7	2	4,2±1,8	4,8±1,5	2,8±0,6	3,9±0,9		3,2±0,8	3,2±0,7		3,1±0,9
	4	3,9±1,8		3,3±0,9	4,2±1,1		3,6±1,2			3,2±1,1
	6	4,6±1,9	4,3±1,8	3,5±1,1	4,5±1,2	2,9±0,8		3,0±0,9	3,0±1,1	3,4±1,4
	8		5,5±2,3	4,0±1,4		3,2±0,9	4,1±1,3	3,5±1,3	3,5±1,4	3,9±1,6
	10					3,8±1,3		4,7±1,9	3,9±1,4	4,4±1,8

Fayed et al. (2010): Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

Hernández et al. (2008): Höhen 3 mm, 6 mm, 9 mm, Mittel rechte und linke Seite

Lee et al. (2009): Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm

Pan et al. (2013): Höhen 2 mm, 4 mm, 5 mm, Mittel rechte und linke Seite, männlich und weiblich

Park und Cho (2009): Höhen 5 mm, 7 mm, 9 mm, Mittel rechte und linke Seite

Park et al. (2010): Höhen 2-3 mm, 5-6 mm, 8-9 mm

Poggio et al. (2006): Höhen 2 mm, 5 mm, 8 mm, 11 mm

Silvestrini Biavati et al. (2011): Höhen 5 mm, 8 mm, 11 mm, Mittel rechte und linke Seite

Eigene Studie: Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

### **7.2.3 Prozentualer Anteil der Patienten mit mindestens 3 mm oder 4 mm Knochenangebot**

Die dritte These, nach der der prozentuale Anteil von Patienten mit a) mindestens 3 mm Knochenangebot im Unterkiefer je nach Interradikulärraum zwischen 70 % und 100 % liegt, konnte nur zu einem geringen Teil bestätigt werden. Nur bei einem Abstand von 6 mm oder 8 mm lag er in den Zahnzwischenräumen 45-44 und 34-35, und bei einem Abstand von 10 mm in den Zahnzwischenräumen 47-46, 46-45, 45-44, 34-35, 35-36 und 36-37 oberhalb von 70 %. Der prozentuale Anteil von Patienten mit b) mindestens 4 mm Knochenangebot im Unterkiefer lag sogar in keinem Fall über 70 %.

Ein ausreichendes interradiikuläres Platzangebot bzw. eine rein intraossäre Platzierung der Minischrauben stellt einen der wichtigsten Faktoren für eine klinisch erfolgreiche Insertion dar (Müller-Hartwich et al. 2006). So ist die Erfolgsrate bei Minischrauben, die keinerlei Kontakt zur Wurzel und dem umgebenden Parodont aufweisen, signifikant größer. Umgekehrt führt eine punktförmige Perforation durch die Schraubenspitze oder Berührung der Wurzel zu einer signifikant geringeren Erfolgsquote (Kuroda et al. 2007b). Minischrauben sollten daher ohne Kontakt zu wichtigen Strukturen wie Nerven, Gefäßen oder Zahnwurzeln eingebracht werden, da diese ansonsten geschädigt werden können und es zu Schraubenverlust kommen kann (Präger et al. 2013).

Der für die Insertion geforderte Platz ist vor allem von der Schraubendimension abhängig. Die Schraubenstärke kann allerdings nicht beliebig reduziert werden, da sonst die Knochenanlagerungsfläche vermindert wird und das Frakturrisiko sowie die Verlustrate steigen (Präger et al. 2006). Die Schraubenstärke hat einen signifikanten Einfluss auf die Primärstabilität (Tsaousidis und Bauss 2008) und die Stärke der Verankerung (Morarend et al. 2009). Entsprechend wurde bei Schrauben mit einem Durchmesser von 1,0 mm eine höhere Verlustrate beobachtet als bei solchen mit größerem Durchmesser (Miyawaki et al. 2003).



Bei einer Parodontalspaltbreite von 0,25 mm, einer Schraubenstärke von 1,5 mm und einer Mindestknochenstärke von 0,1 mm auf beiden Seiten errechnet sich ein interradiikulärer Mindestabstand von 2,2 mm. Da Ungenauigkeiten bei der Schraubenplatzierung nie ganz ausgeschlossen werden können, sollte der Abstand aber eher größer sein (Präger et al. 2006). Ein Sicherheitsabstand sollte auch deshalb eingehalten werden, um das Risiko für Verletzungen des Parodonts, Lockerungen der Schrauben durch Beweglichkeit der Zähne und Behinderungen von Zahnbewegungen zu vermeiden (Müller-Hartwich et al. 2006). Anhand von klinischen Erfahrungen wurde ein Sicherheitsabstand von 1,0 mm um die Schraube vorgeschlagen, so dass sich bei einer Schraubenstärke von 1,5 mm ein Platzbedarf von 3,5 mm ergibt (Poggio et al. 2006). In einer weiteren Studie wurde sogar ein Sicherheitsabstand von 2,0 mm empfohlen, da die Schrauben unter Belastung durch Resorptionsvorgänge nicht stationär bleiben (Liou et al. 2004).

Geht man von einem in der Literatur genannten Platzbedarf von mindestens 4 mm aus, führt dies dazu, dass die Insertion bei vielen Patienten überhaupt nicht möglich ist. Zudem ist die Wahl der Lokalisation sehr eingeschränkt. So ist bei einem Abstand von 8 mm von der Schmelz-Zement-Grenze die Insertion nur in den Zahnzwischenräumen 45-44 bzw. 34-35 bei mehr als der Hälfte der Patienten möglich. Bei einem Abstand von 10 mm kommen noch die Zahnzwischenräume 47-46 bzw. 36-37 hinzu, bei denen eine Insertion bei mehr als 50% der Patienten möglich ist. Wird mit einem Platzbedarf von 3 mm gerechnet, bestehen einerseits mehr Möglichkeiten der Insertion. Auf der anderen Seite muss bei unzureichendem Sicherheitsabstand mit den oben aufgeführten nachteiligen Folgen gerechnet werden.

#### **7.2.4 Breite des Alveolarfortsatzes von anterior nach posterior**

In Übereinstimmung mit der vierten These nahm die Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zu. Am stärksten war die Zunahme in den Zahnzwischenräumen 46-45 vs. 47-46 bzw. 35-36 vs. 36-37.

Die niedrigsten Werte fanden sich in den Zahnzwischenräumen zwischen Eckzahn und 2. Prämolare (44-43, 45-44 bzw. 33-34, 34-35) im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze mit ca.  $8,9 \pm 1,6$  mm (5,5-14,0 mm) vor. In den Zahnzwischenräumen zwischen den beiden Molaren (47-46 bzw. 36-37) im Abstand von 8 mm von der Schmelz-Zement-Grenze lag die höchste Breite mit  $14,0 \pm 1,9$  mm (9,9-18,5 mm) vor.

Die Zunahme des interradikulären Knochenangebots von anterior nach posterior zeigte sich auch in allen Studien, in denen die Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer in vivo bestimmt wurde. Allerdings stellte sich dort die Zunahme in den Zahnzwischenräumen 45-44 vs. 46-45 bzw. 34-35 vs. 35-36 am stärksten dar (Tab. 29).

Die meisten Werte lagen in der gleichen Größenordnung. Wie schon beim interradikulären Knochenangebot fanden Hernández et al. (2008) bei den Zahnzwischenräumen 5-6 und 6-7 größere Werte (Tab. 29).

Tab. 29: Studien zur Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer in vivo

Zahn-zwischenraum	Höhe [mm]	Fayed et al. (2010)	Hernández et al. (2008)	Poggio et al. (2006)	Silvestrini Biavati et al. (2011)	Eigene Studie
3-4	2	8,2±1,2	9,0±1,7	6,8±1,0		9,0±1,6
	4	8,9±1,4		8,1±1,0		8,3±1,8
	6	9,2±1,4	10,0±1,9		9,9±1,8	
	8		12,5±2,1		8,3±1,3	9,0±1,5
	10			8,4±1,9	9,5±1,8	10,3±2,0
4-5	2	8,6±1,5	11,5±1,7	7,2±0,8		8,9±1,5
	4	9,3±1,4		8,2±1,0		8,7±1,6
	6	9,8±1,5	12,5±1,8		10,1±1,8	
	8		14,0±1,9		8,8±1,2	9,5±1,5
	10			9,3±1,4	9,8±1,8	10,7±1,8
5-6	2	10,1±1,4	15,0±1,2	8,9±0,8		10,2±1,3
	4	10,8±1,4		9,7±0,9		9,9±1,4
	6	11,5±1,3	15,5±1,5		11,4±1,8	
	8		15,0±1,8		10,4±1,0	10,8±1,6
	10			10,6±1,3	11,3±1,7	11,8±1,9
6-7	2	12,3±1,5	14,5±1,5	10,4±1,0		12,0±2,0
	4	13,1±1,8		12,5±1,2		11,7±1,4
	6	13,5±1,8	16,0±1,6		14,0±1,9	
	8		16,5±1,6		13,4±1,5	13,4±2,0
	10			13,4±2,0	13,7±2,2	13,6±2,0

Fayed et al. (2010): Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

Hernández et al. (2008): Höhen 3 mm, 6 mm, 9 mm, Mittel rechte und linke Seite

Poggio et al. (2006): Höhen 2 mm, 5 mm, 8 mm, 11 mm

Silvestrini Biavati et al. (2011): Höhen 5 mm, 8 mm, 11 mm, Mittel rechte und linke Seite

Eigene Studie: Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

Die Werte streuten nach den eigenen Ergebnissen in einem weiten Bereich. Dies deckt sich auch mit der Literatur, erkennbar an der vergleichbaren Standardabweichung (Tab. 29). Dies ist aber für die Praxis unproblematisch, da auch die geringste gefundene Breite des Alveolarfortsatzes von 5,5 mm für gängige Minischrauben ausreichend ist (Präger et al. 2006).

Der Zusammenhang zwischen den Abmessungen der Schrauben und der Erfolgsrate ist noch nicht eindeutig geklärt. In einer Studie wurde gezeigt, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Schraubenlänge (5 mm, 10 mm vs. 15 mm) und dem Schraubendurchmesser (1,2 mm vs. 2,0 mm) mit der Erfolgsrate besteht, was aber auch an der kleinen Fallzahl gelegen haben kann (Park et al. 2006). In einer anderen Studie wurde dagegen ein Zusammenhang zwischen der Schraubenlänge (7 mm, 9 mm vs. 11 mm) und der Misserfolgsrate ermittelt (Tsaousidis und Bauss 2008). Ebenfalls konnten für längere Minischrauben (7 mm vs. 9 mm) größere Primärstabilitäten (Chatzianni et al. 2011) ermittelt werden, wobei eine Anfangsmobilität der Schraube eine geringere Erfolgsrate aufweist (Park et al. 2006). In der Literatur wurde eine minimale Insertionstiefe von 5-6 mm vorgeschlagen um eine ausreichende knöcherne Abstützung zu gewährleisten (Berens et al. 2006, Kuroda et al. 2007, Tseng et al. 2006).

### **7.2.5 Breite des Alveolarfortsatzes von zervikal nach apikal**

Auch die fünfte These dieser Studie, nach der auch die Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zunimmt, wurde bestätigt. Am deutlichsten war dabei die Zunahme im Vergleich der Abstände 2 mm vs. 4 mm von der Schmelz-Zement-Grenze. Diese Zunahme wurde in allen Studien gefunden, in denen die Breite des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer in vivo bestimmt wurde. Die Zunahme lag nach allen Studien in der gleichen Größenordnung, so nahm die Breite bei den Abständen 2 mm bis 10 mm jeweils um etwa 1-2 mm zu (Tab. 29).

### 7.2.6 Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior

Die sechste These, nach der die Dicke der vestibulären Kortikalis im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zunimmt, konnte bestätigt werden. Besonders deutlich war die Zunahme in den Zahnzwischenräumen 46-45 vs. 47-46 bzw. 35-36 vs. 36-37.

Die vestibuläre Kortikalis wies die geringste Stärke in den Zahnzwischenräumen zwischen Eckzahn und 1. Prämolare (44-43 bzw. 33-34) im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze mit ca.  $1,4 \pm 0,4$  mm (0,7-3,1 mm) auf. In den Zahnzwischenräumen zwischen den beiden Molaren (47-46 bzw. 36-37) im Abstand von 10 mm von der Schmelz-Zement-Grenze war sie am dicksten mit  $2,8 \pm 0,5$  mm (1,5-4,2 mm).

Die Zunahme der Dicke der vestibulären Kortikalis von anterior nach posterior zeigte sich auch in allen Studien. Auch hier wurde die stärkste Zunahme in den Zahnzwischenräumen 46-45 vs. 47-46 bzw. 35-36 vs. 36-37 festgestellt (Tab.30).

Zwischen der eigenen Studie und der Literatur bestanden nur sehr geringe Abweichungen der Werte (Tab.30).

Wie schon beim interradikulären Knochenangebot und der Breite des Alveolarfortsatzes festgestellt wurde, streuten die Werte in einem gewissen Bereich. Dabei war die Standardabweichung mit der Literatur vergleichbar (Tab.30).

Bei der Beurteilung des Knochenangebots ist die Kortikalisstärke besonders wichtig, da diese entscheidend zum Schrauben-Knochen-Kontakt beiträgt (Präger et al. 2013). Dieser ist in der Kortikalis stärker als im spongiosen Knochen (Deguchi et al. 2003, Huja et al. 2005). Dabei ist der Schraubenhalt direkt von der Dicke der Kortikalis abhängig (Heibel et al. 2001, Stahl et al. 2009, Struckhoff et al. 2006). Entsprechend ist die Beweglichkeit der Schrauben bei dicker Kortikalis geringer (Kim et al. 2005).

Tab. 30: Studien zur Dicke der vestibulären Kortikalis im Unterkiefer in vivo

Zahn-zwischenraum	Höhe [mm]	Fayed et al. (2010)	Ono et al. (2008)	Park und Cho (2009)	Silvestrini Biavati et al. (2011)	Zhao et al. (2013)	Eigene Studie
3-4	2	1,2±0,3				2,0±0,8	1,4±0,4
	4	1,3±0,3		1,3±0,2	1,4±0,7	1,9±0,6	1,4±0,4
	6	1,4±0,5				1,9±0,5	1,5±0,4
	8			1,3±0,2	1,7±0,6	1,9±0,5	1,6±0,4
	10			1,4±0,2	1,9±0,4	1,9±0,4	1,7±0,5
4-5	2	1,3±0,4				2,1±0,6	1,5±0,4
	4	1,5±0,4		1,5±0,3	1,7±0,6	2,0±0,5	1,6±0,4
	6	1,7±0,4				2,1±0,6	1,8±0,4
	8			1,7±0,4	1,9±0,4	2,1±0,6	1,9±0,5
	10			1,9±0,4	2,0±0,4	2,1±0,5	2,1±0,4
5-6	2	1,6±0,5	1,7±0,6			2,5±0,8	1,7±0,7
	4	1,8±0,5	1,8±0,4	1,7±0,4	1,7±0,4	2,5±0,7	1,8±0,5
	6	2,0±0,5	1,9±0,4			2,4±0,6	2,0±0,5
	8		2,1±0,4	1,9±0,5	1,8±0,7	2,7±0,7	2,1±0,5
	10		2,3±0,4	2,2±0,6	2,2±0,4	2,5±0,7	2,2±0,5
6-7	2	2,1±0,4	2,1±0,5			2,7±1,0	2,4±0,8
	4	2,2±0,4	2,3±0,5	2,2±0,6	2,1±0,8	3,3±1,1	2,6±0,7
	6	2,4±0,5	2,6±0,5			3,3±1,0	2,7±0,7
	8		2,9±0,6	2,6±0,6	2,8±0,7	3,4±0,8	2,8±0,6
	10		3,1±0,6	2,9±0,6	2,8±0,5	3,4±0,8	2,8±0,5

Fayed et al. (2010): Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

Ono et al. (2008): Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm

Park und Cho (2009): Höhen 5 mm, 7 mm, 9 mm, Mittel rechte und linke Seite

Silvestrini Biavati et al. (2011): Höhen 5 mm, 8 mm, 11 mm, Mittel rechte und linke Seite

Eigene Studie: Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

Auch der klinische Erfolg von Minischrauben ist von der Kortikalisstärke abhängig (Motoyoshi et al. 2007). Eine dickere Kortikalis führt zu einer besseren Spannungsverteilung im Alveolarknochen. Der trabekuläre Knochen wird weniger stark belastet und eine durch Überbelastung induzierte periimplantäre Knochenresorption vermieden. Eine Dicke unter 1 mm führt zu einer verstärkten trabekulären Knochenresorption und damit erhöhten Verlustrate der Minischraube. Daher wird eine Mindestdicke der Kortikalis von 1 mm empfohlen (Motoyoshi et al. 2009). Bezüglich dieser Empfehlung ist das Einbringen einer Minischraube unproblematisch, da dieser Wert nach den eigenen Ergebnissen nur bei wenigen Patienten und das auch nur an wenigen Stellen unterschritten wurde.

Für den klinischen Erfolg einer Schraubeninsertion ist es wichtig, dass die einwirkenden Kräfte auf den Knochen übertragen werden. Da die Kortikalisstärke im apikalen Bereich höher ist, ist die Stabilität der Schrauben umso größer, je weiter apikal sie inseriert werden (Präger et al. 2006).

Dabei kommt dem Insertionswinkel eine wichtige Bedeutung zu. Bei senkrecht eingebrachten Miniimplantaten ( $90^\circ$ ) ist der Kontakt mit der Kortikalis am geringsten und erhöht sich mit der Abnahme des Winkels (da Costa Sebec 2015, Deguchi et al. 2006, Lim et al. 2008, 2009, Meira et al. 2013). Letztlich hängt die Primärstabilität vom Insertionswinkel ab. Bei einem Vergleich der Winkel  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  und  $90^\circ$  wurde bei einem Winkel von  $60-70^\circ$  die größte Primärstabilität festgestellt (Wilmes et al. 2008). Der Vergleich der Winkel von  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $70^\circ$  und  $90^\circ$  ergab ebenfalls die größte Primärstabilität bei einem Winkel von  $50-70^\circ$  (Zhao et al. 2011). Dagegen ergab der Vergleich der Winkel  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $90^\circ$  bei einem geringeren Winkel von  $45^\circ$  die höchste Primärstabilität (Meira et al. 2013).

### **7.2.7 Dicke der vestibulären Kortikalis von zervikal nach apikal**

Auch die siebte These dieser Studie, nach der auch die Dicke der vestibulären Kortikalis im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zunimmt, wurde bestätigt. Dieses Ergebnis fand sich auch in der Literatur. Dabei war die Zunahme moderat. So nahm die Dicke bei den Abständen 2 mm bis 10 mm jeweils um ca. 0-1 mm zu (Tab.30).

### **7.2.8 Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior**

Die achte These dieser Studie, nach der die Dicke der lingualen Kortikalis im Unterkiefer von anterior nach posterior signifikant zunimmt, konnte nicht bestätigt werden.

Die linguale Kortikalis wies die geringste Stärke in den Zahnzwischenräumen zwischen den beiden Molaren (47-46 bzw. 36-37) im Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze mit ca.  $1,8 \pm 0,5$  mm (1,0-5,8 mm) auf. In den Zahnzwischenräumen zwischen den beiden Prämolaren (45-44 bzw. 34-35) im Abstand von 8 mm von der Schmelz-Zement-Grenze war sie am dicksten mit  $2,6 \pm 0,5$  mm (1,2-4,7 mm).

In der Studie von Silvestrini Biavati et al. (2011) wurde ebenfalls keine Zunahme der Dicke der lingualen Kortikalis von anterior nach posterior festgestellt. Allerdings waren die eigenen Werte etwas größer (Tab.31).

Auch die Dicke der lingualen Kortikalis wies eine Streuung der Werte auf. Dabei war die Standardabweichung mit der Studie von Silvestrini Biavati et al. (2011) vergleichbar (Tab.31).

### **7.2.9 Dicke der lingualen Kortikalis von zervikal nach apikal**

Die neunte These, nach der die Dicke der lingualen Kortikalis im Unterkiefer von zervikal nach apikal signifikant zunimmt, konnte nur teilweise bestätigt werden. So galt die These für alle Zahnzwischenräumen außer 44-43 und 33-34 und zwar nur bis 8 mm. In den Studien von Fayed et al. (2010) und Silvestrini Biavati et al. (2011) wurde für alle Zahnzwischenräume eine Zunahme festgestellt (Tab.31).



Tab. 31: Studien zur Dicke der lingualen Kortikalis im Unterkiefer in vivo

Zahn-zwischenraum	Höhe [mm]	Fayed et al. (2010)	Silvestrini Biavati et al.	Eigene Studie
3-4	2	2,1±0,7		2,3±0,8
	4	2,4±0,6	1,7±0,5	2,3±0,6
	6	2,5±0,5		2,3±0,5
	8		2,1±0,7	2,3±0,5
	10		2,2±0,4	2,4±0,5
4-5	2	1,9±0,6		2,1±0,7
	4	2,4±0,6	2,0±0,6	2,5±0,7
	6	2,5±0,5		2,6±0,5
	8		2,0±0,4	2,6±0,5
	10		2,2±0,4	2,6±0,5
5-6	2	1,9±0,6		1,9±0,5
	4	2,2±0,5	1,9±0,6	2,2±0,5
	6	2,4±0,4		2,3±0,5
	8		2,0±0,4	2,4±0,5
	10		2,1±0,5	2,4±0,5
6-7	2	2,1±0,4		1,8±0,5
	4	2,2±0,4	1,8±0,5	2,0±0,4
	6	2,4±0,5		2,3±0,4
	8		1,9±0,7	2,4±0,5
	10		2,4±0,9	2,3±0,5

Fayed et al. (2010): Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

Silvestrini Biavati et al. (2011): Höhen 5 mm, 8 mm, 11 mm, Mittel rechte und linke Seite

Eigene Studie: Höhen 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, Mittel rechte und linke Seite

### 7.2.10 Seitenvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale

#### Interradikuläres Knochenangebot:

In Übereinstimmung mit der zehnten These bestehen im Hinblick auf das interradi­kuläre Knochenangebot keine signifikanten Unterschiede zwischen linker und rechter Unterkieferhälfte.

Es finden sich zwar Studien, in denen das interradi­kuläre Knochenangebot auf der linken und rechten Unterkieferhälfte bestimmt wurde, allerdings fehlen die Signifikanzberechnungen (Fayed et al. 2010, Hernández et al. 2008, Pan et al. 2013, Park und Cho 2009, Silvestrini Biavati et al. 2011).

#### Breite des Alveolarfortsatzes:

Ebenfalls in Übereinstimmung mit der zehnten These unterscheidet sich die Breite des Alveolarfortsatzes nach den meisten Vergleichen nicht zwischen linker und rechter Unterkieferhälfte.

Auch hierzu fehlen in der Literatur die Signifikanzberechnungen (Fayed et al. 2010, Hernández et al. 2008, Lim et al. 2008, Silvestrini Biavati et al. 2011).

#### Dicke der vestibulären Kortikalis:

Im Gegensatz zur Annahme der zehnten These ist die vestibuläre Kortikalis an einigen Stellen in der linken Unterkieferhälfte signifikant stärker ausgeprägt als in der rechten Unterkieferhälfte.

Im Widerspruch zu den eigenen Ergebnissen wurde in verschiedenen Studien kein signifikanter Unterschied zwischen der rechten und linken Seite ermittelt (Deguchi et al. 2006, Ono et al. 2008, Präger et al. 2013, Zhao et al. 2013).

#### Dicke der lingualen Kortikalis:

Für die linguale Kortikalis gilt das Gleiche wie für die vestibuläre Kortikalis, an einigen Stellen ist diese in der linken Unterkieferhälfte signifikant stärker ausgeprägt als in der rechten Unterkieferhälfte.

In drei Studien wurde zwar die linguale Kortikalis auf der linken und rechten Unterkieferhälfte bestimmt, es fehlen aber die Signifikanzberechnungen (Fayed et al. 2010, Kim und Park 2012, Silvestrini Biavati et al. 2011).

#### Erfolgsrate:

Die Erfolgsrate bei Minischrauben ist zwar nicht das Thema dieser Studie, da diese aber unter anderem auch von der Dicke der Kortikalis abhängig ist (siehe Kap. 7.2.6), wird kurz darauf eingegangen. In einer Studie zeigte sich eine signifikant höhere Erfolgsrate bei Minischrauben

auf der linken Seite (Park et al. 2006). Nach drei Studien hatte dagegen die Seite keinen signifikanten Einfluss auf die Erfolgsrate (Lee et al. 2010, Min et al. 2012, Moon et al. 2008).

Die dickere linksseitige Kortikalis nach der eigenen Studie würde für eine höhere Erfolgsrate auf der linken Seite sprechen. Allerdings fanden sich in mehreren Studien keine Seitenunterschiede in der Dicke der Kortikalis. Dies erklärt, dass in drei von vier Studien keine signifikanten Unterschiede der Erfolgsrate gefunden wurden.

### **7.2.11 Geschlechtervergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale**

#### Interradikuläres Knochenangebot:

In Übereinstimmung mit der elften These besteht zwischen den männlichen und weiblichen Patienten kein signifikanter Unterschied im Hinblick auf das interradiikuläre Knochenangebot.

In zwei Studien wurde ebenfalls kein signifikanter Unterschied gefunden (Fayed et al. 2010, Pan et al. 2013).

#### Breite des Alveolarfortsatzes:

Im Gegensatz zur elften These ist der Alveolarfortsatz bei den männlichen Patienten an allen Stellen breiter als bei den weiblichen Patienten, zum Teil ist dieser Unterschied signifikant.

Nach einer Studie war die Breite bei männlichen Personen im posterioren Bereich bei einem Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze signifikant höher (Fayed et al. 2010).

#### Dicke der vestibulären Kortikalis:

Die vestibuläre Kortikalis ist im Gegensatz zur elften These bei den weiblichen Patienten an allen Stellen dicker als bei den männlichen Patienten, allerdings ist dieser Unterschied nur an wenigen Stellen signifikant.

In mehreren Studien wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den männlichen und weiblichen Patienten ermittelt (Deguchi et al. 2006, Farnsworth et al. 2011, Fayed et al. 2010, Lim et al. 2008, 2009, Ono et al. 2008, Präger et al. 2013, Zhao et al. 2013). Nur nach einer Studie war die vestibuläre Kortikalis bei Männern signifikant dicker (Cassetta et al. 2013).

### Dicke der lingualen Kortikalis:

Auch die linguale Kortikalis ist bei den weiblichen Patienten dicker als bei den männlichen Patienten, auch hier ist dieser Unterschied nur an wenigen Stellen signifikant.

Nach einer Studie war die linguale Kortikalis bei den männlichen Patienten an einigen Stellen signifikant dicker als bei den weiblichen Patienten, also gegensätzlich zu den eigenen Ergebnissen (Kim und Park 2012). Eine andere Studie zeigte dagegen keinen signifikanten Unterschied (Fayed et al. 2010).

### Erfolgsrate:

In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass das Geschlecht keinen Einfluss auf die Erfolgsrate hat (Chen et al. 2008b, Lee et al. 2010, Min et al. 2012, Miyawaki et al. 2003, Moon et al. 2008, Park et al. 2006). Dies ist im Einklang mit der Feststellung, dass zwischen den männlichen und weiblichen Patienten überwiegend keine signifikanten Unterschiede in der Dicke der Kortikalis gefunden wurden.

## **7.2.12 Altersvergleich bezüglich der zu untersuchenden Merkmale**

### Interradikuläres Knochenangebot:

Im Widerspruch zur zwölften These besteht eine negative Korrelation zwischen dem Alter der Patienten und dem interradikulären Knochenangebot, dieses nimmt mit zunehmendem Alter ab.

Eine Studie ergab keinen signifikanten Unterschied (Fayed et al. 2010).

### Breite des Alveolarfortsatzes:

Ebenfalls im Widerspruch zur zwölften These liegt eine negative Korrelation zwischen dem Alter der Patienten und der Breite des Alveolarfortsatzes vor.

Eine Studie ergab keinen signifikanten Unterschied (Fayed et al. 2010).

### Dicke der vestibulären Kortikalis:

Die vestibuläre Kortikalis korreliert bei den Zahnzwischenräumen 33-34 und 34-35 signifikant positiv und bei den Zahnzwischenräumen 47-46 und 36-37 signifikant negativ mit dem Alter.

In der Literatur wurde in einigen Studien ein Zusammenhang gefunden. So war die Kortikalis bei Erwachsenen (20-45 Jahre) signifikant dicker als bei Jugendlichen (14-16 Jahre) (Farnsworth et al. 2011). Der Vergleich zwischen Erwachsenen (19-50 Jahre) und Jugendlichen (12-18 Jahre) erbrachte das gleiche Ergebnis (Cassetta et al. 2013). Ein ähnlicher Vergleich zwischen Erwachsenen (ab 20 Jahre) und Jugendlichen (bis 19 Jahre) ergab einen signifikanten Unterschied zwischen 2. Prämolaren und 1. Molaren (Ono et al. 2008). Schließlich wurden in

einer Studie verschiedene Altersklassen miteinander verglichen (10-19 Jahre, 20-29 Jahre, 30-39 Jahre, 40-49 Jahre, 50-59 Jahre, 60-65 Jahre). Die höchsten Werte wurden in der Altersklasse 40-49 Jahre ermittelt (Swasty et al. 2009). In zwei Studien wurde keine Altersabhängigkeit festgestellt (Deguchi et al. 2006, Fayed et al. 2010).

#### Dicke der lingualen Kortikalis:

Die linguale Kortikalis korreliert bei dem Zahnzwischenraum 35-36 signifikant positiv mit dem Alter.

Der Vergleich zwischen Erwachsenen (19-27 Jahre) und Jugendlichen (13-18 Jahre) ergab einen signifikanten Unterschied im posterioren Bereich bei einem Abstand von 2 mm von der Schmelz-Zement-Grenze (Fayed et al. 2010).

#### Erfolgsrate:

In einer Studie wurde ein Zusammenhang zwischen dem Alter und der Erfolgsrate ermittelt (Lee et al. 2010). In den meisten Studien wurde dagegen kein Einfluss des Alters festgestellt (Chen et al. 2008b, Min et al. 2012, Miyawaki et al. 2003, Moon et al. 2008, Park et al. 2006). Da die Ergebnisse zur Altersabhängigkeit der Dicke der Kortikalis inkonsistent sind, können hieraus auch keine Folgerungen zu einer möglichen Altersabhängigkeit der Erfolgsrate gezogen werden.

### **7.3 Schlussfolgerungen**

Minischrauben werden sehr häufig in der Kieferorthopädie zur zeitweisen skelettalen Verankerung eingesetzt, um durch solide Befestigung kieferorthopädischer Apparaturen Zahnbewegungen zu ermöglichen. Entsprechend ist es von großem praktischem Interesse, einen geeigneten Insertionsort für Minischrauben zu finden. Hierzu wurde in der vorliegenden Studie das Knochenangebot im Unterkiefer ermittelt. Auch ist eine genaue Kenntnis der knöchernen Strukturen für eine erfolgreiche Implantation entscheidend.

Im Hinblick auf das interradikuläre Platzangebot streuen die Werte der Patienten in einem weiten Bereich. Dabei besteht bei der Mehrheit der Patienten ein knappes interradikuläres Platzangebot. Ob dieses für eine Insertion ausreichend ist, hängt vom Platzbedarf ab. Dieser ergibt sich wiederum aus Schraubenstärke und Sicherheitsabstand zu angrenzenden Strukturen. In der Literatur wird allgemein ein Platzbedarf von mindestens 4 mm genannt. Dies würde aber dazu führen, dass die Insertion bei vielen Patienten nicht möglich wäre. Durch Reduktion des Sicherheitsabstandes könnte auch ein geringerer interradikulärer Raum von 3 mm als

ausreichend betrachtet werden. In diesem Fall wäre bei der Mehrheit der Patienten ein ausreichendes Knochenangebot vorhanden.

Unabhängig von der Festlegung des Platzbedarfes ist auch die Wahl der Lokalisation eingeschränkt. Da das interradiäre Platzangebot von anterior nach posterior und von zervikal nach apikal zunimmt, wären demnach die Zahnzwischenräume der endständigen Molaren in apikaler Richtung am ehesten zum Einbringen einer Minischraube geeignet.

Die gemessene Breite des Alveolarfortsatzes lässt eine unproblematische Schraubeninsertion zu. Obwohl auch hier die Werte streuen, liegen sie bei allen Patienten und an allen Stellen über 5 mm, was für gängige Minischrauben ausreichend ist. Dabei nimmt das Knochenangebot von anterior nach posterior und von zervikal nach apikal zu. Da es Hinweise dafür gibt, dass die Schraubenlänge mit der Primärstabilität und der Erfolgsrate korreliert, ist es dennoch sinnvoll, je nach verfügbarem Knochenangebot eine möglichst lange Minischraube zu wählen.

Auch die ermittelte Dicke der vestibulären Kortikalis erwies sich für eine kieferorthopädische Schraubentherapie als geeignet. Die Erfolgsrate hängt von der Dicke ab, wobei bereits 1 mm als notwendig betrachtet wird. Dieser Wert wurde nur bei wenigen Patienten und auch nur an wenigen Stellen unterschritten. Die Dicke nahm von anterior nach posterior und zervikal nach apikal zu, was bei der Wahl des Insertionsorts zu berücksichtigen ist.

Die Dicke der lingualen Kortikalis ist ebenfalls unproblematisch, da eine Dicke von 1 mm nur sehr selten unterschritten wurde.

Der Vergleich der rechten und linken Seite sowie der männlichen und weiblichen Patienten ergab keine oder höchstens geringfügige Unterschiede im Platzangebot. Das Gleiche zeigte sich bei der Bestimmung der Altersabhängigkeit. Bei der Insertion von Minischrauben können damit Seite, Geschlecht und Alter außer Acht gelassen werden.

In der Praxis müssen allerdings die großen interindividuellen Unterschiede beachtet werden. Entsprechend ist eine präoperative Diagnostik des Platzangebotes unerlässlich. Dabei ist die DVT besonders geeignet. Sie ermöglicht eine strahlungsreduzierte, dreidimensionale Darstellung knöcherner Strukturen und damit die präzise Bestimmung behandlungsrelevanter Parameter.

Zum Einsatz der DVT existieren einige Leitlinien. In diesen wird allerdings das Gebiet der Kieferorthopädie vernachlässigt. Lediglich in der Leitlinie der European Commission (evidence-based-guidelines) wird auf den Einsatz der DVT zur Vermessung des Platzangebots im Knochen vor dem Setzen von Miniimplantaten eingegangen (European Commission 2012).

In der S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) von 2009 zur DVT sind für die Kieferorthopädie ausschließlich diagnostische Anwendungen

aufgeführt, Minischrauben wurden nicht erwähnt (DGZMK 2009). Nach der späteren S2k-Leitlinie der DGZMK aus dem Jahr 2013 besteht für die Anwendung des DVT zur kieferorthopädischen Routinediagnostik bei Kindern und Jugendlichen keine Indikation. Begründet wird dies mit der im Vergleich zu zweidimensionalen Röntgenaufnahmen deutlich höheren Strahlenbelastung. Nur bei atypischen Befunden wird die Anfertigung einer DVT-Aufnahme bislang als sinnvoll betrachtet (DGZMK 2013). Vor dem Hintergrund des großen Nutzens von Minischrauben beim therapeutischen Einsatz in der Kieferorthopädie, sollte die Erweiterung der Indikation eines DVTs überdacht werden. Zudem konnte einerseits die Strahlendosis mit Geräten der neuesten Generation effektiv gesenkt werden. Darüber hinaus kann die Strahlenbelastung über die Wahl der Parameter deutlich reduziert werden (siehe Kap. 7.1.2).

Die AAOMR (American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology) gibt eine Zusammenstellung der diagnostischen Zwecke der CBCT in der Kieferorthopädie. Demnach wird die DVT-Bildgebung für die Ermittlung der optimalen Lokalisation bei der Platzierung von kieferorthopädischen Miniimplantaten von zahlreichen Autoren als klinisch nützlich bewertet. Diese Aussage wird ohne weitere Kommentierung oder Bewertung als Anhang in den Raum gestellt (AAOMR 2013), stimmt aber mit den aus dieser Studie und der Literatur gezogenen Schlussfolgerungen überein.

Die European Commission nennt einige Einsatzgebiete der DVT in der Kieferorthopädie. Hierzu zählen neben der Beurteilung von Gaumenspalten, der Bestimmung der Zahnposition und der Beurteilung der Resorption bei benachbarten Zähnen u. a. auch die Bestimmung der zur Verfügung stehende Knochendicke für die Platzierung von Minischrauben als temporäre Verankerungsvorrichtungen. Nach der Einschätzung einiger Autoren ist die DVT dazu geeignet, vor dem Setzen von Minischrauben routinemäßig deren optimale Position zu bestimmen und Wurzelschäden zu vermeiden. Die Verwendung von Bohrschablonen auf Grundlage der DVT-Daten wurde ebenfalls vorgeschlagen. Es finden sich aber auch Stimmen, nach der eine dreidimensionale Bildgebung nur in den seltenen Fällen eines geringen Platzangebotes notwendig ist. Letztlich kommt die European Commission zu dem Schluss, dass eine DVT für die Platzierung von Minischrauben normalerweise nicht indiziert ist (European Commission 2012). Dem muss aber auf Grundlage der eigenen Ergebnisse und auch der Auswertung der Literatur widersprochen werden. So wurde eindeutig gezeigt, dass das Platzangebot im Knochen an vielen Stellen nicht ausreicht. Hinzu kommt, dass bei den einzelnen Patienten große individuelle Unterschiede bestehen. Bei einem Verzicht auf eine DVT wäre die Gefahr viel zu groß, dass wichtige Strukturen wie Nerven, Gefäße oder Zahnwurzeln verletzt werden (siehe

Kap. 7.2.3). Anhand der bisherigen Studien kann die Notwendigkeit der DVT hinreichend belegt werden. Es wird deshalb für eine Überarbeitung der Leitlinien plädiert, insbesondere die Indikation der DVT in der Kieferorthopädie im Allgemeinen und hinsichtlich der Minischrauben im Speziellen sollte überdacht werden.



## 8 Literaturverzeichnis

1. American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology. Clinical recommendations regarding use of cone beam computed tomography in orthodontics. Position statement by the American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2013; 116: 238-257.
2. Asscherickx K, Vande Vannet B, Wehrbein H, Sabzevar MM. Success rate of miniscrews relative to their position to adjacent roots. *Eur J Orthod* 2008; 30: 330-335.
3. Bae MJ, Kim JY, Park JT, Cha JY, Kim HJ, Yu HS, Hwang CJ. Accuracy of miniscrew surgical guides assessed from cone-beam computed tomography and digital models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 143: 893-901.
4. Baumgaertel S, Hans MG. Buccal cortical bone thickness for mini-implant placement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 230-235.
5. Baumgaertel S. Quantitative investigation of palatal bone depth and cortical bone thickness for mini-implant placement in adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 104-108.
6. Baumgaertel S. Cortical bone thickness and bone depth of the posterior palatal alveolar process for mini-implant insertion in adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011; 140: 806-811.
7. Baysal A, Ucar FI, Buyuk SK, Ozer T, Uysal T. Alveolar bone thickness and lower incisor position in skeletal Class I and Class II malocclusions assessed with cone-beam computed tomography. *Korean J Orthod* 2013; 43: 134-140.
8. Berens A, Wiechmann D, Dempf R. Mini- and micro-screws for temporary skeletal anchorage in orthodontic therapy. *J Orofac Orthop* 2006; 67: 450-458.
9. Brettin BT, Grosland NM, Qian F, Southard KA, Stuntz TD, Morgan TA, Marshall SD, Southard TE. Bicortical vs monocortical orthodontic skeletal anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 134: 625-635.
10. Carano A, Lonardo P, Velo S, Incorvati C. Mechanical properties of three different commercially available miniscrews for skeletal anchorage. *Prog Orthod* 2005; 6: 82-97.

11. Carrafiello G, Dizunno M, Colli V, Strocchi S, Pozzi Taubert S, Leonardi A et al. Comparative study of jaws with multislice computed tomography and cone-beam computed tomography. *Radiol Med.* 2010; 115: 600-611.
12. Cassetta M, Sofan AA, Altieri F, Barbato E. Evaluation of alveolar cortical bone thickness and density for orthodontic mini-implant placement. *J Clin Exp Dent.* 2013; 5: e245-e252
13. Chaimanee P, Suzuki B, Suzuki EY. "Safe zones" for miniscrew implant placement in different dentoskeletal patterns. *Angle Orthod* 2011; 81: 397-403.
14. Chatzigianni A, Keilig L, Reimann S, Eliades T, Bourauel C. Effect of mini-implant length and diameter on primary stability under loading with two force levels. *Eur J Orthod* 2011; 33: 381-387.
15. Chen YH, Chang HH, Chen Yj, Lee d, Chiang HH, Yao CC. Root contact during insertion of miniscrews for orthodontic anchorage increases the failure rate: an animal study. *Clin Oral Implants Res* 2008; 19: 99-106.
16. Chen YJ, Chang HH, Lin HY, Lai EH, Hung HC, Yao CC. Stability of miniplates and miniscrews used for orthodontic anchorage: experience with 492 temporary anchorage devices. *Clin Oral Implants Res* 2008; 19: 1188-1196.
17. Choi JH, Park CH, Yi SW, Lim HJ, Hwang HS. Bone density measurement in interdental areas with simulated placement of orthodontic miniscrew implants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 766.e1-e12.
18. Creekmore TD, Eklund MK. The possibility of skeletal anchorage. *J Clin Orthod* 1983; 17: 266-269.
19. da Costa Sabec C, Fernandes TM, de Lima Navarro R, Oltramari-Navarro PV, Conti AC, de Almeida MR, Poleti ML. Can bone thickness and inter-radicular space affect miniscrew placement in posterior mandibular sites? *J Oral Maxillofac Surg* 2015; 73: 333-339.
20. Damstra J, Fourie Z, Huddleston Slater JJR, Ren Y. Accuracy of linear measurements from cone-beam computed tomography-derived surface models of different voxel sizes. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2010; 137: 16e1-e6.
21. Davies J, Johnson B, Drage N. Effective doses from cone beam CT investigation of the jaws. *Dentomaxillofac Radiol* 2012; 41: 30-36.

22. Deguchi T, Takano-Yamamoto T, Kanomi R, Hartsfield JK Jr, Roberts WE, Garetto LP. The use of small titanium screws for orthodontic anchorage. *J Dent Res.* 2003; 82: 377-381.
23. Degucchi T, Nasu M, Murakami K, Yabuuchi T, Kamioka H, Takano-Yamamoto T. Quantitative evaluation of cortical bone thickness with computed tomographic scanning for orthodontic implants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 129: 721e.7-721.e12.
24. Denio D, Torabinejad M, Bakland LK. Anatomical relationship of the mandibular canal to its surrounding structures in mature mandibles. *J Endod* 1992; 18: 161-165.
25. DGZMK Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. S1-Empfehlung Dentale Volumentomografie (DVT). Verabschiedet am 06.04.2008.  
[http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgmkdokument/S1\\_Empfehlung\\_Dentale\\_Volumentomographie.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgmkdokument/S1_Empfehlung_Dentale_Volumentomographie.pdf) (Abruf am 09.11.2015)
26. DGZMK Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. S2k-Leitlinie Dentale digitale Volumentomografie. Version 9 vom 5. August 2013.  
[http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgmkdokument/083-0051\\_S2k\\_Dentale\\_Volumentomografie\\_2013-10.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgmkdokument/083-0051_S2k_Dentale_Volumentomografie_2013-10.pdf) (Abruf am 17.07.2015)
27. El-Beialy AR, Abou-El-Ezz AM, Attia KH, El-Bialy AM, Mostafa YA. Loss of anchorage of miniscrews: a 3-dimensional assessment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 700-707.
28. Ens S, Ulrici J, Hell E, Buzug TM. Automatic detection of patient motion in cone-beam computed tomography. *Proc 2010 IEEE Int Conf Biomed Imag*, pages 1257-1260, 2010
29. European Commission. Radiation Protection No 172 Cone beam CT for dental and maxillofacial radiology (Evidence-based guidelines). A report prepared by the sedentext project 2012. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/172.pdf> (Abruf am 17.07.2015)
30. Farnsworth D, Rossouw PE, Ceen RF, Buschang PH. Cortical bone thickness at common miniscrew implant placement sites. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011; 139: 495-503.
31. Fayed MM, Pazera P, Katsaros C. Optimal sites for orthodontic mini-implant placement assessed by cone beam computed tomography. *Angle Orthod* 2010; 80: 939-951.

32. Florvaag B, Kneuert P, Lazar F, Koebke J, Zöller JE, Braumann B, Mischkowski RA. Biomechanical properties of orthodontic miniscrews. An in-vitro study. *J Orofac Orthop* 2010; 71: 53-67.
33. Goch I. Metrische Genauigkeit von Computertomografie, digitaler Volumentomografie und Orthopantomografie. *Digital Dentalnews* 2008; 2: 6-12.
34. Gray JB, Steen ME, King GJ, Clark AE. Studies on the efficacy of implants as orthodontic anchorage. *Am J Orthod* 1983; 83: 311-317.
35. Greenstein G, Tarnow D. The mental foramen and nerve: clinical and anatomical factors related to dental implant placement: a literature review. *J Periodontol* 2006; 77: 1933-1943.
36. Grünheid T, Kolbeck Schieck JR, Pliska BT, Ahmad M, Larson BE. Dosimetry of a cone-beam computed tomography machine compared with a digital x-ray machine in orthodontic imaging. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2012; 141: 436-443.
37. Heibel H, Alt KW, Wächter R, Bähr W. Kortikalisdicke am Unterkiefer unter besonderer Berücksichtigung der Miniplattenosteosynthese. *Mund Kiefer Gesichtschir* 2001; 5: 180-185.
38. Hernández LC, Montoto G, Puente Rodríguez M, Galbán L, Martínez V. 'Bone map' for a safe placement of miniscrews generated by computed tomography. *Clin Oral Implants Res* 2008; 19: 576-581.
39. Hofmann E, Schmid M, Lell M, Hirschfelder U. Cone beam computed tomography and low-dose multislice computed tomography in orthodontics and dentistry: A comparative evaluation on image quality and radiation exposure. *J Orofac Orthop* 2014; 75: 384-398.
40. Holberg C, Steinhäuser S, Geis P, Rudzki-Janson I. Cone-beam computed tomography in orthodontics: benefits and limitations. *J Orofac Orthop* 2005; 66: 434-444.
41. Horner KA, Behrents RG, Kim KB, Buschang PH. Cortical bone and ridge thickness of hyperdivergent and hypodivergent adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2012; 142: 170-178.
42. Hu KS, Kang MK, Kim TW, Kim KH, Kim HJ. Relationships between dental roots and surrounding tissues for orthodontic miniscrew Installation. *Angle Orthod* 2009; 79: 37-45.

43. Huja SS, Litsky AS, Beck FM, Johnson KA, Larsen PE. Pull-out strength of monocortical screws placed in the maxillae and mandibles of dogs. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 127: 307-313.
44. Kau CH, English JD, Muller-Delgado MG, Hamid H, Ellis RK, Winkleman S. Retrospective cone-beam computed tomography evaluation of temporary anchorage devices. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2010; 137: 166.e1-e5.
45. Kim JW, Ahn SJ, Chang YI. Histomorphometric and mechanical analyses of the drill-free screw as orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 128: 190-194.
46. Kim HJ, Yun HS, Park HD, Kim DH, Park YC. Soft-tissue and cortical-bone thickness at orthodontic implant sites. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 130: 177-182.
47. Kim SH, Kang JM, Choi B, Nelson G. Clinical application of a stereolithographic surgical guide for simple positioning of orthodontic mini-implants. *World J Orthod* 2008; 4: 371-382.
48. Kim JH, Park YC. Evaluation of mandibular cortical bone thickness for placement of temporary anchorage devices (TADs). *Korean J Orthod* 2012; 42: 110-117.
49. Kokitsawat S, Manosudprasit M, Godfrey K, Chatchaiwiwattana C. Clinical effects associated with miniscrews used as orthodontic anchorage. *Aust Orthod J* 2008; 24: 134-139.
50. Kovisto T, Ahmad M, Bowles WR. Proximity of the mandibular canal to the tooth apex. *J Endod* 2011; 37: 311-315.
51. Kuroda S, Sugawara Y, Deguchi T, Kyung HM, Takano-Yamamoto T. Clinical use of miniscrew implants as orthodontic anchorage: success rates and postoperative discomfort. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007a; 131: 9-15.
52. Kuroda S, Yamada K, Deguchi T, Hashimoto T, Kyung HM, Takano-Yamamoto T. Root proximity is a major factor for screw failure in orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007b; 131 (4 Suppl): S68-73.
53. Kyriakou Y, Kolditz D, Langner O, Krause J, Kalender W. Digitale Volumetomografie (DVT) und Mehrschicht-Spiral-CT (MSCT): eine objektive Untersuchung von Dosis und Bildqualität. *Fortschr Röntgenstr* 2011; 183: 144-153.

54. Lee KJ, Joo E, Kim KD, Lee JS, Park YC, Yu HS. Computer tomographic analysis of tooth-bearing alveolar bone for orthodontic miniscrew placement . *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 135: 486-494.
55. Lee SJ, Ahn SJ, Lee JW, Kim SH, Kim TW. Survival analysis of orthodontic mini-implants. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2010; 137: 194-199.
56. Lee CY, Koval TM, Suzuki JB. Low-Dose Radiation Risks of Computerized Tomography and Cone Beam Computerized Tomography: Reducing the Fear and Controversy. *J Oral Implantol* 2015; 41: e223-e230
57. Liang X, Lambrechts I, Sun Y, Denis K, Hassan B, Li L, Pauwels R, Jacobs R. A comparative evaluation of Cone Beam Computed Tomography (CBCT) and Multi-Slice CT (MSCT). Part II: On 3D model accuracy. *Eur J Radiol* 2010; 75: 270-274.
58. Lim WH, Lee SK, Wikesjö UM, Chun YS. A descriptive tissue evaluation at maxillary interradicular sites: Implications for orthodontic mini-implant placement. *Clin Anat* 2007; 20: 760-765.
59. Lim JE, Lim WH, Chun YS. Quantitative evaluation of cortical bone thickness and root proximity at maxillary interradicular sites for orthodontic mini-implant placement. *Clin Anat* 2008; 21: 486-491.
60. Lim JE, Lee SJ, Kim YJ, Lim WH, Chun YS. Comparison of cortical bone thickness and root proximity at maxillary and mandibular interradicular sites for orthodontic mini-implant placement. *Orthod Craniofac Res* 2009; 12: 299-304.
61. Liou EJ, Pai BC, Lin JC. Do miniscrews remain stationary under orthodontic forces. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004; 126: 42-47.
62. Liu H1, Liu DX, Wang G, Wang CL, Zhao Z. Accuracy of surgical positioning of orthodontic miniscrews with a computer-aided design and manufacturing template. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2010; 137: 728.e1-e10.
63. Loubele M, Van Assche N, Carpentier K, Maes F, Jacobs R, van Steenberghe D, Suetens P. Comparative localized linear accuracy of small-field cone-beam CT and multislice CT for alveolar bone measurements. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008; 105: 512-518.

64. Ludlow JB, Davies-Ludlow LE, Brooks SL, Howerton WB. Dosimetry of 3 CBCT devices for oral and maxillofacial radiology: CB Mercuray, NewTom 3G and i-CAT. *Dentomaxillofac Radiol* 2006; 35: 219-226.
65. Ludlow JB, Ivanovic M. Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008; 106: 106-114.
66. Ludlow JB, Walker C. Assessment of phantom dosimetry and image quality of i-CAT FLX cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 144: 802-817.
67. Ludwig B, Glasl B, Lietz T. Minischrauben: Kleiner Aufwand – großer Nutzen. *Zahnärztliche Mitteilungen* 2007; 97: 36-42.
68. Manni A, Cozzani M, Tamborrino F, De Rinaldis S, Menini A. Factors influencing the stability of miniscrews. A retrospective study on 300 miniscrews. *Eur J Orthod* 2011; 33: 388-395.
69. Maret D, Molinier F, Braga J, Peters OA, Telmon N, Treil J, Inglise JM, Cossie A, Kahn JL, Sixou M. Accuracy of 3D reconstructions based on cone beam computed tomography. *J Dent Res* 2010; 89: 1465-1469.
70. Marmulla R, Wörtche R, Mühling J, Hassfeld S. Geometric accuracy of the NewTom 9000 Cone Beam CT. *Dentomaxillofac Radiol* 2005; 34: 28-31.
71. Martinelli FL, Luiz RR, Faria M, Nojima LI. Anatomic variability in alveolar sites for skeletal anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2010; 138: 252.e1-e9.
72. Meira TM, Tanaka OM, Ronsani MM, Maruo IT, Guariza-Filho O, Camargo ES, Maruo H. Insertion torque, pull-out strength and cortical bone thickness in contact with orthodontic mini-implants at different insertion angles. *Eur J Orthod* 2013; 35: 766-771.
73. Min KI, Kim SC, Kang KH, Cho JH, Lee EH, Chang NY, Chae JM. Root proximity and cortical bone thickness effects on the success rate of orthodontic micro-implants using cone beam computed tomography. *Angle Orthod* 2012; 82: 1014-1021.

74. Miyawaki S, Koyama I, Inoue M, Mishima K, Sugahara T, Takano-Yamamoto T. Factors associated with the stability of titanium screws placed in the posterior region for orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124: 373-378.
75. Monnerat C, Restle L, Mucha JN. Tomographic mapping of mandibular interradicular spaces for placement of orthodontic mini-Implants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 135: 428.e1-428.e9.
76. Moon CH, Lee DG, Lee HS, Im JS, Baek SH. Factors associated with the success rate of orthodontic miniscrews placed in the upper and lower posterior buccal region. *Angle Orthod* 2008; 78: 101-106.
77. Morant JJ, Salvadó M, Hernández-Girón I, Casanovas R, Ortega R, Calzado A. Dosimetry of a cone beam CT device for oral and maxillofacial radiology using Monte Carlo techniques and ICRP adult reference computational phantoms. *Dentomaxillofac Radiol*. 2013; 42: 92555893.
78. Morarend C, Qian F, Marshall SD, Southard KA, Grosland NM, Morgan TA, McManus M, Southard TE. Effect of screw diameter on orthodontic skeletal anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 224-229.
79. Morea C, Hayek JE, Oleskovicz C, Dominguez GC, Chilvarquer I. Precise insertion of orthodontic miniscrews with a stereolithographic surgical guide based on cone beam computed tomography data: a pilot study. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2011; 26: 860-865.
80. Motoyoshi M, Yoshida T, Ono A, Shimizu N. Effect of cortical bone thickness and implant placement torque on stability of orthodontic mini-implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2007; 22: 779-784.
81. Motoyoshi M, Inaba M, Ono A, Ueno S, Shimizu N. The effect of cortical bone thickness on the stability of orthodontic mini-implants and on the stress distribution in surrounding bone. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2009; 38: 13-18.
82. Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA. A new volumetric CT machine for dental imaging based on cone-beam technique: preliminary results. *Eur Radiol* 1998; 8: 1558-1564.



83. Müller-Hartwich R, Präger T, Park JA, Jost-Brinkmann P-G. Kieferorthopädische Verankerung mit Minischrauben – Auswahl geeigneter Insertionsorte und Mechaniken. *Kieferorthop* 2006; 20: 195-202.
84. Ono A, Motoyoshi M, Shimizu N. Cortical bone thickness in the buccal posterior region for orthodontic mini-implants. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2008; 37: 334-340.
85. Pan F, Kau CH, Zhou H, Souccar N: The anatomical evaluation of the dental arches using cone beam computed tomography - an investigation of the availability of bone for placement of mini-screws. *Head Face Med* 2013; 9: 13.
86. Park HS, Jeong SH, Kwon OW. Factors affecting the clinical success of screw implants used as orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2006; 130: 18-25.
87. Park HS, Lee YJ, Jeong SH, Kwon TG. Density of the alveolar and basal bones of the maxilla and the mandible *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 133: 30-37.
88. Park J, Cho HJ. Three-dimensional evaluation of interradicular spaces and cortical bone thickness for the placement and initial stability of microimplants in adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 314-315.
89. Park HS, HwangBo ES, Kwon TG. Proper mesiodistal angles for microimplant placement assessed with 3-dimensional computed tomography images. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2010; 137: 200-206.
90. Pauwels R, Beinsberger J, Collaert B, Theodorakou C, Rogers J, Walker A, Cockmartin L, Bosmans H, Jacobs R, Bogaerts R, Horner K; SEDENTEXCT Project Consortium. Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. *Eur J Radiol* 2012; 81: 267-271.
91. Pauwels R, Silkosessak O, Jacobs R, Bogaerts R, Bosmans H, Panmekiate S. A pragmatic approach to determine the optimal kVp in cone beam CT: balancing contrast-to-noise ratio and radiation dose. *Dentomaxillofac Radiol* 2014a; 43: 20140059
92. Pauwels R, Zhang G, Theodorakou C, Walker A, Bosmans H, Jacobs R, Bogaerts R, Horner K; SEDENTEXCT Project Consortium. Effective radiation dose and eye lens dose in dental cone beam CT: effect of field of view and angle of rotation. *Br J Radiol* 2014b; 87: 20130654

93. Pinsky HM, Dyda S, Pinsky RW, Misch KA, Sarment DP. Accuracy of three-dimensional measurements using cone-beam CT. *Dentomaxillofac Radiol* 2006; 35: 410-416.
94. Poggio PM, Incorvati C, Velo S, Carano A. "Safe zones": a guide for miniscrew positioning in the maxillary and mandibular arch. *Angle Orthod* 2006; 76: 191-197.
95. Präger T, Brochhagen H-G, Müller-Hartwich R. Knochenangebot im Unterkieferalveolarfortsatz für kortikale Verankerungsschrauben. *Kieferorthopädie* 2006; 20: 259-265.
96. Präger TM, Brochhagen HG, Mußler A, Mischkowski R, Jost-Brinkmann PG, Müller-Hartwich R. Investigation of bone conditions for orthodontic anchorage plates in the anterior mandible. *J Orofac Orthop* 2013; 74: 409-419.
97. Qiu L, Haruyama N, Suzuki S, Yamada D, Obayashi N, Kurabayashi T, Moriyama K. Accuracy of orthodontic miniscrew implantation guided by stereolithographic surgical stent based on cone-beam CT-derived 3D images. *Angle Orthod* 2012; 82: 284-293.
98. Ritter L, Neugebauer J, Mischkowski R, Dreiseidler T, Zöllner JE. Dreidimensionale Bildgebung in der Zahnmedizin. *Z Oral Implant* 2007; 3: 86-95.
99. Schilling R, Geibel MA. Assessment of the effective doses from two dental cone beam CT devices. *Dentomaxillofac Radiol* 2013; 42: 20120273.
100. Schnelle MA, Beck FM, Jaynes RM, Huja SS. A radiographic evaluation of the availability of bone for placement of miniscrews. *Angle Orthod* 2004; 74: 832-837.
101. Schulze D, Heiland M, Thurmann H, Adam G. Radiation exposure during midfacial imaging using 4- and 16-slice computed tomography, cone beam computed tomography systems and conventional radiography. *Dentomaxillofac Radiol* 2004; 33: 83-86.
102. Schulze R, Heil U, Gross D, Bruellmann DD, Dranischnikow E, Schwanecke U, Schoemer E. Artefacts in CBCT: a review. *Dentomaxillofac Radiol* 2011 ;40: 265-273.
103. Schulze R. DVT in der allgemein Zahnärztlichen Praxis. *ZM* 2014; 104: 1126-1132.
104. Sherrard JF, Rossouw PE, Benson BW, Carillo R, Buschang PH. Accuracy and reliability of tooth and root lengths measured on cone-beam computed tomographs. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2010; 137: S100-S108.

105. Shin HS, Nam KC, Park H, Choi HU, Kim HY, Park CS. Effective doses from panoramic radiography and CBCT (cone beam CT) using dose area product (DAP) in dentistry. *Dentomaxillofac Radiol* 2014; 43: 20130439.
106. Shinohara A, Motoyoshi M, Uchida Y, Shimizu N. Root proximity and inclination of orthodontic mini-implants after placement: cone-beam computed tomography evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 144: 50-56.
107. Silvestrini Biavati A, Tecco S, Migliorati M, Festa F, Marzo G, Gherlone E, Tetè S. Three-dimensional tomographic mapping related to primary stability and structural miniscrew characteristics. *Orthod Craniofac Res* 2011; 14: 88-99.
108. Simonton JD, Azevedo B, Schindler WG, Hargreaves KM. Age- and gender-related differences in the position of the inferior alveolar nerve by using cone beam computed tomography. *J Endod* 2009; 35: 944-949.
109. Stahl E, Keilig L, Abdelgader I, Jäger A, Bourauel C. Numerical analyses of biomechanical behavior of various orthodontic anchorage implants. *J Orofac Orthop* 2009; 70: 115-127.
110. Struckhoff JA, Huja SS, Beck FM, Litsky AS. Pull-out strength of monocortical screws at 6 weeks postinsertion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 129: 83-83.
111. Suomalainen A, Vehmas T, Kortensniemi M, Robinson S, Peltola J. Accuracy of linear measurements using dental cone beam and conventional multislice computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol* 2008; 37: 10-17.
112. Suomalainen A, Ventä I, Mattila M, Turtola L, Vehmas T, Peltola JS. Reliability of CBCT and other radiographic methods in preoperative evaluation of lower third molars. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010; 109: 276-284.
113. Suzuki EY, Suzuki B. Accuracy of miniscrew implant placement with a 3-dimensional surgical guide. *J Oral Maxillofac Surg* 2008; 66: 1245-1252.
114. Swasty D, Lee JS, Huang JC, Maki K, Gansky SA, Hatcher D, Miller AJ. Anthropometric analysis of the human mandibular cortical bone as assessed by cone-beam computed tomography. *J Oral Maxillofac Surg* 2009; 67: 491-500.

115. Tsaousidis G, Bauss O. Influence of insertion site on the failure rates of orthodontic miniscrews. *J Orofac Orthop* 2008; 69: 349-356.
116. Tseng YC, Hsieh CH, Chen CH, Shen YS, Huang IY, Chen CM. The application of mini-implants for orthodontic anchorage. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2006; 35: 704-707.
117. Viwattanatipa N, Thanakitcharu S, Uttraravichien A, Pitiphat W. Survival analyses of surgical miniscrews as orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 29-36.
118. Waldeyer A., Mayet A. *Anatomie des Menschen, Band 2, Kopf und Hals-Auge-Ohr-Gehirn-Arm-Brust.* Walter de Gruyter, 16. Auflage, 1993: S. 88-90.
119. Wilmes B, Drescher D. Impact of insertion depth and predrilling diameter on primary stability of orthodontic mini-implants. *Angle Orthod* 2009; 79: 609-614.
120. Wörtche R, Hassfeld S, Lux CJ, Müssig E, Hensley FW, Krempien R, Hofele C. Clinical application of cone beam digital volume tomography in children with cleft lip and palate. *Dentomaxillofac Radiol* 2006; 35: 88-94.
121. Zhang Y, Zhang L, Zhu XR, Lee AK, Chambers M, Dong L. Reducing metal artifacts in cone-beam CT images by preprocessing projection data. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2007; 67: 924-932.
122. Zhao L, Xu Z, Wei X, Zhao Z, Yang Z, Zhang L, Li J, Tang T. Effect of placement angle on the stability of loaded titanium microscrews: a microcomputed tomographic and biomechanical analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011; 139: 628-635.
123. Zhao H, Gu XM, Liu HC, Wang ZW, Xun CL. Measurement of cortical bone thickness in adults by cone-beam computerized tomography for orthodontic miniscrews placement. *J Huazhong Univ Sci Technolog Med Sci* 2013; 33: 303-308.

## 9 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Christian Brauns, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Interradikuläres Knochenangebot für kieferorthopädische Minischrauben im Unterkieferalveolarknochen in digitalen Volumentomografien“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -[www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

## **10 Lebenslauf**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

## 11 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich insbesondere Herrn Prof. Dr. A. Bumann für die Überlassung des Themas und die engagierte Betreuung der Arbeit danken. Er stand mir mit außerordentlicher Geduld und wertvollen Anregungen zu jeder Zeit während der Fertigstellung der Arbeit zur Seite.

Des Weiteren möchte ich Dr. Kollmann für seine zahlreichen Hilfestellungen bei der statistischen Auswertung danken.

Der Firma Materialise und dem Mitarbeiter Bert van Roie danke ich für die zur Verfügungstellung der Vermessungssoftware und hilfreiche Ratschläge im Umgang mit dem Programm.

Herrn Holger Nickel danke ich für die technische Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie für ihre Motivation, Unterstützung und Rückhalt in den letzten Jahren.