

Aus dem Institut MESANTIS 3D DENTAL RADIOLOGIE Berlin

DISSERTATION

Veränderungen des peridental Knochengebotes in dreidimensionalen Röntgenbildern während einer festsitzenden kieferorthopädischen Behandlung

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Fabian Jäger

aus Berlin

Datum der Promotion: 30.05.2015

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt	5
Abstract	7
1. Einleitung	8
1.1. Anatomie und Physiologie des Parodontiums	8
1.2. Kieferorthopädie und knöcherner Dehiszenzen	10
1.3. Klassische bildgebende Diagnostik parodontaler Defekte in der Kieferorthopädie	14
1.4. DVT zur bildgebenden Diagnostik in der Kieferorthopädie	16
2. Fragestellung	20
3. Methodik	22
3.1. Allgemeine Methodik	22
3.1.1. Patientengut	22
3.1.2. DVT-Parameter	24
3.1.3. Messmethodik	26
3.1.4. Statistische Auswertung	29
3.2. Spezielle Methodik	31
3.2.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Parameter	31
3.2.2. Ausmaß der therapeutischen Inklinationsänderung	32
3.2.3. Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderungen	38
3.2.4. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Alter und Geschlecht	46
3.2.5. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Kiefer und Zahngruppe	46
3.2.6. Korrelation zwischen Ausgangssituation und therapeutischem Effekt	47
3.2.7. Korrelation zwischen horizontalen und vertikalen Therapieeffekten	48

3.2.8. Korrelation zwischen Zahnbewegung und Therapieeffekten	48
4. Ergebnisse	49
4.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Parameter	49
4.2. Ausmaß der therapeutischen Inklinationsänderung	50
4.3. Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderungen	50
4.4. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Alter und Geschlecht	54
4.5. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Kiefer und Zahngruppe	66
4.6. Korrelation zwischen Ausgangssituation und therapeutischem Effekt	82
4.7. Korrelation zwischen horizontalen und vertikalen Therapieeffekten	84
4.8. Korrelation zwischen Zahnbewegung und Therapieeffekten	86
5. Diskussion	88
5.1. Diskussion der Methoden	88
5.2. Diskussion der Ergebnisse	91
5.2.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Parameter	91
5.2.2. Ausmaß der therapeutischen Inklinationsänderung	91
5.2.3. Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderungen	92
5.2.4. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Alter und Geschlecht	95
5.2.5. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Kiefer und Zahngruppe	98
5.2.6. Korrelation zwischen Ausgangssituation und therapeutischem Effekt	102
5.2.7. Korrelation zwischen horizontalen und vertikalen Therapieeffekten	103
5.2.8. Korrelation zwischen Zahnbewegung und Therapieeffekten	103
5.3. Schlussfolgerungen	105
6. Literaturverzeichnis	106
7. Eidesstattliche Erklärung	128

8. Lebenslauf	129
9. Publikationsliste	130
10. Danksagung	131

Abstrakt

Einleitung: Die vorliegende Studie dient der Evaluation des peridental Knochenangebotes am durchschnittlichen kieferorthopädischen Patienten. Hierbei wurde eine quantitative Bewertung der therapiebedingten Änderungen in der Knochenhöhe und –breite vorgenommen. Dabei sollten spezielle Risikogruppen oder prädisponierende Faktoren beurteilt werden. **Material und Methoden:** Retrospektiv wurden digitale Volumetomogramme von 43 Patienten (24 Frauen, 19 Männer; mittleres Alter: 25 Jahre und 5 Monate) vermessen, die mindestens ein Jahr lang mittels festsitzender Multibrackettherapie kieferorthopädisch behandelt wurden. Die Bildauflösung betrug $0,25 \text{ mm}^3$. Alle Zähne bis zu den ersten bleibenden Molaren wurden sowohl prä- als auch posttherapeutisch vestibulär und oral hinsichtlich ihres linearen Abstandes zwischen der Schmelz-Zement-Grenze und dem zervikalen Knochenrand sowie ihres Abstandes zwischen der lateralen Zahnbegrenzung und dem lateralen Knochenrand untersucht. Zusätzlich wurde die Inklinationsänderung als Parameter der kieferorthopädischen Behandlung erhoben. Die statistische Aufarbeitung in Form einer explorativen Datenanalyse und nicht-parametrischer Tests wurde mit Hilfe der Statistiksoftware SPSS Statistics® (Statistical Package of Social Science, Version 20, Chicago, IL, USA) durchgeführt. **Ergebnisse:** Über den Zeitraum der kieferorthopädischen Therapie kam es zu einer signifikanten Reduktion im vertikalen und transversalen Knochenangebot ($p < 0,001$). Die vestibuläre Knochenseite war von dem Anstieg der Prävalenz und der Tiefe der Dehiscenzen stärker betroffen als die orale Seite. Zwischen den Geschlechtern waren keine Unterschiede hinsichtlich des vertikalen Knochenangebotes beziehungsweise des therapiebedingten Knochenverlustes feststellbar. Ältere kieferorthopädische Patienten wiesen signifikant größere Defekttiefen auf und erlitten über den Zeitraum der Therapie einen stärkeren Knochenverlust. Dahingegen konnte kein therapiebedingter vertikaler Knochenverlust bei den unter 15-Jährigen festgestellt werden. Die Oberkieferreckzähne, Unterkieferprämolaren, Unterkieferreckzähne sowie die Unterkieferschneidezähne wiesen in Bezug auf das vestibuläre Knochenangebot ein erhöhtes Risiko für therapiebedingte Abbauprozesse auf. Oral und vestibulär waren es unterschiedliche Zahngruppen, die durch signifikant kleinere oder größere Knochenbreiten auffielen. Mit einigen Ausnahmen waren oral ausgeprägtere Knochenbreiten vorzufinden als vestibulär. Es existierte kein Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der vertikalen vestibulären Vorschädigung und der Größe des therapiebedingten Knochenverlustes. Die therapiebedingte

Änderung der Inklination korrelierte mit dem Ausmaß der therapiebedingten Änderung im transversalen Knochenangebot. **Schlussfolgerung:** Da das untersuchte Patientengut einen therapiebedingten vertikalen Knochenverlust von zirka 0,8 mm aufweist, kann insbesondere bei Patienten, die älter als 30 Jahre sind, im Bereich der Oberkiefereckzähne und der Unterkieferfrontzähne eine dreidimensionale Bildgebung zur Evaluation der peridental Knochenverhältnisse erwogen werden, um negativen Entwicklungen des Knochenangebotes durch kieferorthopädische Zahnbewegung vorzubeugen. In Einzelfällen kann die Anfertigung eines strahlungsarmen DVTs auch bei jüngeren Patienten sinnvoll sein. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse erscheint es angebracht, die von Andrews postulierten sechs Schlüssel der normalen Okklusion um das peridentale Knochenangebot als siebente Komponente zu erweitern.

Abstract

Introduction: The aim of this study was to quantify the periodontal bone substance in orthodontic patients. The amount of vertical and horizontal bone loss has been measured in order to display possible dependencies and risk factors. **Methods:** Cone-beam computed tomographies (CBCT) of 43 patients (24 female, 19 male; mean age: 25 years and 5 months), who were receiving orthodontic treatment with multibracket appliances for 1 year at least, were chosen for retrospective evaluation. Image resolution did not exceed 0,25 mm³ voxel size. Pretreatment and posttreatment measurements of the linear distance between the cemento-enamel junction and the cervical alveolar crest as well as between the buccal or oral limit of the radicular contour and the outermost section of the cortical bone were quantified on the vestibular and oral site of each tooth up to the first permanent molars. Furthermore, the change in inclination was determined as a parameter of orthodontic treatment. Statistical analysis by means of exploratory data analysis and non-parametric tests were conducted with the help of SPSS Statistics® (Statistical Package of Social Science, version 20, Chicago, IL, USA). **Results:** There was a significant decrease in periodontal bone height and width within the period of therapy ($p < 0,001$). The increase in prevalence and depth of bony dehiscences was more distinct on the vestibular site of the bone. In terms of gender there was no difference regarding bone height and vertical bone loss. In contrast, a significantly greater dehiscence depth occurred with an increased bone loss in older patients. In 14-years-old and younger, however, no vertical bone loss was determined. The upper canines, lower premolars, lower canines and lower incisors showed a higher risk for vestibular bone loss due to orthodontic treatment. On the vestibular and oral site of the bone, some of the tooth types displayed significantly greater or smaller bone widths. Apart from a few exceptions, oral bone widths were wider than on the vestibular site. The initial vertical defect depth and the amount of bone loss during orthodontic therapy are not mutually dependent. The therapeutic change in inclination correlates with horizontal bone loss. **Conclusions:** Three-dimensional evaluation of the periodontal bone may be considered for patients older than 30 years, especially in the regions of the upper canines and lower anterior teeth to minimize bone loss due to orthodontic treatment. In individual cases, it can be reasonable to use a low dose CBCT in younger patients. Based on the present results, it seems appropriate to expand Andrews' six keys of normal occlusion by the periodontal bone as a seventh component.

1. Einleitung

1.1 Anatomie und Physiologie des Parodontiums

Das Parodontium wird als funktionelle Einheit betrachtet und besteht aus vier hart- und weichgeweblichen Komponenten. Neben der Gingiva gibt es das Zahnzement, den Alveolarknochen und den desmodontalen Faserapparat, der den Raum zwischen Wurzeloberfläche des Zahnes und knöchernem Zahnfach einnimmt (Rateitschak, Rateitschak, & Wolf 2004). Diese Verbindung darf allerdings nicht als starre Ankopplung, sondern vielmehr als dynamisches, lebendiges System verstanden werden. Die Aufgaben des Parodontiums liegen in der Zahnhaltefunktion, der Übertragung auftretender Zug- oder Druckkräfte, der Aufnahme und Weiterleitung taktiler Reize, als Bestandteil der mastikatorischen Propriozeption, der Immunabwehr sowie dem Schutz des Zahnes vor Resorption und Ankylose. Überdies findet eine Abgrenzung der mikrobiell kontaminierten Mundhöhle von den aseptischen, inneren Geweben statt (Listgarten et al. 1991; Schroeder & Listgarten 1997). Im Folgenden sollen die einzelnen Bestandteile des Parodonts kurz besprochen werden.

Gingiva

Die Gingiva bedeckt als Schleimhaut den koronalen Anteil des Alveolarfortsatzes. Nach peripher geht sie in die Alveolarmukosa über (Wolf, Rateitschak & Rateitschak 2005). Nur nach palatinal fehlt diese Grenze, sodass die Gingiva dort direkt in die unbewegliche, keratinisierte Gaumenschleimhaut übergeht (Eickholz & Dannewitz 2012; Schroeder & Listgarten 1997). Die freie oder marginale Gingiva erstreckt sich girlandenförmig vom Gingivalsaum bis zur gingivalen Furche und ist etwa 1,5 mm breit (Wolf et al. 2005). Daran schließt sich bis zur Mukogingivalgrenze die befestigte, keratinisierte Gingiva an, welche je nach Individuum, untersuchtem Zahn oder Alter Breiten zwischen 1 und 10 mm annehmen kann (Ainamo, Ainamo & Poikkeus 1981).

Die Gingiva besitzt einen Faserkomplex aus zirkulären oder semizirkulären, interzirkulären, transgingivalen, transseptalen und intergingivalen Fasern, die als gingivaler Anteil das parodontale Stützgewebe aller Zähne eines Kiefers miteinander verbinden (Schroeder & Listgarten 1997).

Zahnzement

Das Zahnzement ist nicht vaskularisiert und unterliegt im Gegensatz zur Gingiva keiner kontinuierlichen Turnover-Rate, sondern tendiert eher zur apikalen Dickenzunahme (Listgarten et al. 1991; Wolf et al. 2005). Obwohl es kalzifiziert und in enger Nachbarschaft zum Dentin steht, zählt es nicht zu den Zahnbestandteilen, sondern wird als Komponente des parodontalen Gewebes angesehen, welches der Haftvermittlung zwischen Zahn und Desmodont dient (Listgarten et al. 1991). Man unterscheidet 4 verschiedene Zementarten. Sie differieren in Lokalisation, Struktur und Funktion (Bosshardt & Schroeder 1992; Bosshardt & Selvig 1997; Bosshardt & Schroeder 1991).

Alveolarknochen

Als Alveolarknochen wird der zahntragende Anteil des jeweiligen Kieferknochens bezeichnet. Der Alveolarknochen besteht aus der 0,1 bis 0,4 mm dicken Lamina cribiformis, die das Zahnfach auskleidet, dem dichten kortikalen und dem großlumigeren spongiösen Knochen (Diedrich 2000; Eickholz & Dannewitz 2012; Rateitschak et al. 2004). Der Abstand zwischen freier Gingiva und marginalem Knochenrand beträgt 2 bis 3 mm und wird als biologische Breite bezeichnet (Gargiulo, Wentz & Orban 1961). Der Alveolarknochen ist in einem stetigen dynamischen Prozess zwischen Auf- und Abbau begriffen. Im Gegensatz dazu wird der zielgerichtete Umbau während einer Zahnbewegung als Remodellierung, manchmal auch nur Modellierung, bezeichnet (Frost 1965). Knochenbildung und Knochenresorption werden von einer Vielzahl systemischer und lokaler Faktoren beeinflusst, zu denen unter anderem Hormone und Zytokine zählen.

Desmodont

Über das Desmodont werden die Haltefunktion, die Kraftübertragung und der Schutz des Zahnes vor Resorption oder Ankylose realisiert. Es setzt sich aus kollagenen Fasern, den sogenannten Sharpey-Fasern, dem dentogingivalen Gefäßplexus aus kapillären Venolen, dem Plexus dentalis, bestehend aus somatosensorischen und autonomen Nerven und einer Matrix aus Proteoglykanen und Glykoproteinen sowie aus verschiedenartigen Zellen zusammen (Schroeder 1991; Wolf et al. 2005). Die desmodontalen Zellen bestehen hauptsächlich aus Fibroblasten, Osteoblasten und Zementoblasten, aus Immunzellen, epithelialen Zellen und Endothelzellen (Wolf et al. 2005). Die kollagenen extrinsischen Faserbündel verbinden die Lamina cribiformis des Alveolarfortsatzes mit dem Zahnzement (Feneis 1952). Neben schräg verlaufenden zementoalveolären

Fasern, die koronal am Alveolarknochen beginnen und apikal am Zahnzement inserieren, existieren ebenso koronal am Zahnzement beginnende, nach apikal in den Alveolarknochen ziehende Fasern. Darüber hinaus gibt es horizontal verlaufende aber auch transalveoläre Fasern. So wird jeder Zahn horizontal und vertikal stabilisiert (Diedrich 2000). Die Fasern liegen in einem gewellten Zustand vor und sind etwa 5 % dehnbar, wodurch eine intraalveoläre Beweglichkeit ermöglicht wird (Mühlemann & Rateitschak 1963).

Das Parodontium als funktionelle Einheit reagiert unterschiedlich auf kieferorthopädische Einflussnahme. Eine Zahnbewegung als Resultat von Umbauprozessen in den umliegenden Geweben ist abhängig von Art, Größe, Dauer und Richtung der angreifenden Kraft (Graber & Vanarsdall 2011). Man unterscheidet die Reaktion auf unterschiedliche und wirksame Belastungen. Die unterschwellige Kraft wird durch das parodontale Gewebe gedämpft und verteilt, wobei neben der Streckung des desmodontalen Faserapparates auch die Elastizität und elastische Verformung der Zahnhartsubstanzen und des Alveolarknochens sowie der hydrodynamische Polstereffekt der flüssigen Bestandteile im Parodontalspalt eine Rolle spielen (Bien 1966; Körber 1962, 1969; Picton 1965, 1969). Die kieferorthopädisch wirksame Kraft führt zu einer Formveränderung des Alveolarfortsatzes, die damit erst eine Positionsänderung des Zahnes ermöglicht. Durch langsame, moderate Kraftanwendung kann eine Kompression des Parodontalspalt erreicht werden, die ohne Zirkulationsstörung und unerwünschte Nebeneffekte zur Remodellierung des Alveolarfortsatzes führt (Diedrich 2000). Es wird dabei ein Gleichgewicht zwischen Knochenanbau und -abbau angestrebt (Göz 1989; Roberts 2000). Kraftinduzierte Umbauprozesse im Parodont führen immer erst zu einer Lockerung des Zahnes, welche erst durch die erneute Mineralisierung umgebender Strukturen verschwindet (Göz 1989; Reitan 1967, 1989; Roberts 2000).

1.2 Kieferorthopädie und knöcherne Dehiszenzen

Im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung kann es zu unerwünschten Nebeneffekten kommen. Neben Reizungen an Haut und Schleimhäuten durch Materialunverträglichkeiten (Jacobsen & Hensten-Pettersen 1989), Zahnüberempfindlichkeiten (Fernandes, Øgaard & Skoglund 1998; Scheurer, Firestone & Bürgin 1996) und Dekalkifikationserscheinungen (Øgaard 1989) sind apikale Wurzelresorptionen eine der häufigsten Nebenwirkungen. Eine unzureichende Plaquekontrolle kann neben Zahndemineralisationen (Atack, Sandy & Addy 1996; Heintze & Miethke 1993; Mirabella & Årtun

1995; Mitchell 1992) zudem marginale Entzündungen der Gingiva hervorrufen, aus denen sich selten profunde Parodontopathien oder Parodontalabszesse bilden (Alstad & Zachrisson 1979; Årtun & Urbye 1988; Folio, Rams & Keyes 1985). Die Folge können Rezessionen, also lokalisierter oder generalisierter Zahnfleischrückgang, sein. Marginale Parodontitiden können über den kieferorthopädischen Zeitraum zu progredientem horizontalen Knochenabbau und vertikalen Knocheneinbrüchen führen (Göz & Rakosi 1989; Owin & Diedrich 1990; Polson et al. 1988; Sadowsky & BeGole 1981). Durch ein engmaschiges Hygieneprogramm kann ein Zustand der parodontalen Verhältnisse erreicht werden, bei dem kein Unterschied zwischen kieferorthopädisch behandelten und unbehandelten Patienten feststellbar ist (Alstad & Zachrisson 1979). Die vestibulären Zahnoberflächen sind häufig nur noch von einer feinen kortikalen Knochenlamelle bedeckt (Diedrich 2000). Eine starke Kraftapplikation in Bereichen dünner knöcherner Begrenzungen und die Zahnbewegung aus dem Zentrum des Alveolarfortsatzes heraus kann insbesondere dazu führen, dass Wurzeloberflächen posttherapeutisch nicht mehr vom knöchernen Zahnfach umgeben sind (Fuhrmann 1996c, 2002; Oppenheim 1942; Reitan 1957, 1967; Slichter 1971; Stuteville 1937; Wehrbein, Bauer & Diedrich 1996). Nicht selten kann diese Knochenlamelle durch äußere Einflüsse fensterartig durchbrochen sein oder ohne Kontinuitätsunterbrechung von koronal nach apikal verschwinden (Hassell 1993). Ist es fensterartig durchbrochen, spricht man von Fenestrationen (Lindhe, Lang & Karring 2009), ist der Defekt nach koronal nicht mehr knochenbegrenzt, bezeichnet man ihn als Dehiszenz (Diedrich 1995; Hollender, Rönnerman & Thilander 1980; Wainwright 1973). Da der Großteil des parodontalen Stützgewebes in den oberen 2/3 des Wurzelbereiches liegt, können bereits geringe vertikale Knochenverluste von großer klinischer Bedeutung sein (Goldman & Cohen 1968; Jacobson 1952; Kalkwarf, Krejci & Pao 1986; Phillips 1955).

Dabei bedeutet der Verlust der knöchernen Basis nicht immer gleich die Ausbildung von Schleimhautdehiszenzen. Studien an nicht kieferorthopädisch behandelten Patienten haben gezeigt, dass eine Rezession von 1 mm Tiefe im Mittel von einer knöchernen Dehiszenz von 2,8 mm in Richtung apikal überragt wird. Jeder zusätzliche Millimeter an Rezessionstiefe ist mit einer zusätzlichen Dehiszenztiefe von 0,98 mm assoziiert (Löst 1984). Alveoläre Defekte sind also kein reines kieferorthopädisches Problem, denn häufig sind sie auch am Alveolarknochen unbehandelter Patienten feststellbar (Evangelista et al. 2010; Loe, Ånerud & Boysen 1992; Rupprecht et al. 2001). Loe et al. ermittelten bereits 1978 für norwegische Studenten und Akademiker eine mittlere jährliche Attach-

mentverlustrate von etwa 0,1 mm (Löe et al. 1978). Hugoson et al. lieferten in einer ähnlichen Studie zugehörige röntgenologische Betrachtungen, anhand derer sie einen natürlichen jährlichen Knochenverlust ab dem zwanzigsten Lebensjahr von etwa 0,1 mm errechneten, wobei 80 % der Probanden ab dem dreißigsten Lebensjahr mindestens eine Messstelle mit 10 % Knochenverlust aufwiesen (Hugoson & Laurell 2000). Nur bei 5 % der Probanden überstieg der mittlere Knochenverlust einen Wert von 2 mm. Außerdem konnte kein Zusammenhang zwischen vorausgegangenen Erkrankungserfahrungen und einem erhöhten Knochenverlust festgestellt werden (Hugoson & Laurell 2000). Die Prävalenz solcher alveolärer Defekte scheint mit dem Alter des Probanden zu steigen. Es gibt Studien, die keine geschlechtsspezifischen Unterschiede in ihrem Auftreten feststellen konnten (Aass & Gjermo 1992; Bondemark 1998; Bondemark & Kuroi 1997; Hausmann et al. 1989; Kennedy et al. 1983; Nelson & Artun 1997; Trossello & Gianelly 1979; Weigang 2014; Zachrisson & Alnaes 1974), wobei andere Autoren eine erhöhte Frequenz dieser Defekte bei Männern detektierten (Wouters et al. 1989). Ebenso verhält es sich mit der Betrachtung der einzelnen Kiefer. Ein Großteil der Autoren stellte eine erhöhte Prävalenz von Dehiszenzen im Unterkiefer fest, wobei Fenestrationshäufiger im Oberkiefer imponierten (Abdelmalek & Bissada 1973; Davies et al. 1974; Edel 1981; Enhos et al. 2012; Evangelista et al. 2010; Ezawa et al. 1987; Fuhrmann 1996a; Larato 1972, 1970; Rupprecht et al. 2001; Urbani & Lombardo 1990; Volchansky & Cleaton-Jones 1978; Yagci et al. 2011). Wieder andere Autoren konnten keinen Unterschied hinsichtlich der Prävalenz von Dehiszenzen beziehungsweise alveolären Defekten zwischen den Kiefern ermitteln (Baljoon, Natto & Bergstrom 2003; Wouters et al. 1989).

Die Mundhygiene scheint ein entscheidender Faktor für die Stabilität der parodontalen Strukturen zu sein, da einige Studien belegen, dass Patienten mit durchschnittlicher Mundhygiene und Multibandtherapie keinen signifikanten marginalen Attachmentverlust aufweisen (Weise 1973; Zachrisson & Alnaes 1973, 1974). Einzelne Faktoren begünstigen die Entstehung von Rezessionen und Knochendehiszenzen. Neben einem schmalen Alveolarkamm, Okklusionsstörungen, koronal inserierenden Bändchen und parodontalen Vorschädigungen sind ebenfalls die Art und Richtung der Kraftapplikation, die osteoblastische Potenz des Periosts, die Knochenelastizität, die vaskuläre Versorgung sowie das Volumen und die Struktur angrenzender Hart- und Weichgewebe als Risikofaktoren bekannt (Årtun, Krogstad & Little 1990; Årtun & Krogstad 1987; Baker & Seymour 1976; Batenhorst 1974; Diedrich 1995, 1996, 1990; Dorfman 1978; Göz et al.

1992; Löst & Gerhardt 1984; Melsen 1983; Ten Hove & Mulie 1976; Thilander et al. 1983; Wehrbein, Fuhrmann & Diedrich 1995; Wennström et al. 1987). Es scheint einen direkten Zusammenhang zwischen Gesichts- beziehungsweise Alveolarfortsatzhöhe und einem dünnen Alveolarknochen zu geben (Handelman 1996), welcher wiederum mit der Ausbildung von Dehiszenzen assoziiert ist (Siriwat & Jarabak 1985). Der schmale Alveolarfortsatz kann bei jedem skelettalen Typ auftreten, ist aber vermehrt bei Patienten mit erhöhter unterer Gesichtshöhe und starker bimaxillärer Protrusion zu finden.

Da Kiefergröße und Zahngröße separat vererbt werden, können prominente Wurzeln mit dünner alveolärer Bedeckung die Folge sein. Die dünne faciale Knochenlamelle ist von besonderem Interesse, da sie im Rahmen kieferorthopädischer Diagnostik in gewissem Maße eingeschätzt werden kann (Fuhrmann 1996b). Bislang ist es nicht abschließend geklärt, ob eine kieferorthopädische Behandlung die umliegenden knöchernen Strukturen signifikant schädigt. Es gibt Autoren, die von irreparablen Schäden ausgehen (Oppenheim 1942, 1944; Stuteville 1937) und Studien, die insbesondere bei gesundem Parodont keine signifikanten Änderungen feststellen können (Baxter 1967; Buchner 1949; Eliasson et al. 1982; Kloehn & Pfeifer 1974; Polson & Reed 1984; Rateitschak, Herzog-Specht & Hotz 1968; Sadowsky & BeGole 1981). Vereinzelt haben Parodontologen aus klinischen Beobachtungen Vermutungen angestellt, dass eine ehemalige kieferorthopädische Therapie einen Anteil an der späteren Entwicklung von chronisch marginalen Parodontitiden haben könnten (Burket 1963; Moskow & Baden 1966; Schluger 1968). Es herrscht weitestgehend Einigkeit darüber, dass die Dimension der anterioren Alveole als limitierender Faktor für die kieferorthopädische Behandlung anzusehen ist (Garib et al. 2010). Das Überschreiten dieser anatomischen Grenzen ist eindeutig mit einem erhöhten Risiko für therapiebedingte Knochenverluste assoziiert (Mulie & Ten Hove 1976). So kann das Verhältnis der Knochenremodellierung zur Zahnbewegung selbst in Bereichen mit größerem transversalen Knochenangebot nur 1:2 betragen (Vardimon, Oren & Ben-Bassat 1998).

Der Versuch der Einschätzung des peridental Knochenangebotes wurde bereits über die Messung klinischer Parameter wie Sondierungstiefen (Jancosek 1965; Weber 1971; Zachrisson & Zachrisson 1972) oder Attachmentlevel (Dreyer 1970; Huettner 1960; Rateitschak et al. 1968) unternommen. Darüber hinaus wurden Studien mit der transgingivalen Knochen Sondierung (Greenberg, Laster & Listgarten 1976) und der Ultraschalluntersuchung (Löst & Nüssele 1988) angestrengt. Hinzu kamen zweidimensionale

Röntgenuntersuchungen, um den Zustand des parodontalen Apparates zu evaluieren (Baxter 1967; Buchner 1949; Massler 1954; Maushardt 1968; Rehák 1935; Storey 1953; Tirk, Guzman & Nalchajian 1967; Weber 1971).

1.3. Klassische bildgebende Diagnostik parodontaler Defekte in der Kieferorthopädie

Das zahnärztliche Röntgen ist in den Bereich der Teilkörperexposition einzustufen und wirkt auf Risikoorgane wie die Augenlinse, die Schilddrüse, den Thymus und die Speicheldrüsen (Pasler, Visser 2000). Dabei werden Strahlendosen im Milli- oder Mikrogray-Bereich appliziert, für die weder karzinogene noch mutagene Schäden nachgewiesen werden konnten (Pasler 2008). Die röntgenologische Basisdiagnostik der Kieferorthopädie besteht aus einer Panoramaschichtaufnahme und einem Fernröntgenseitenbild. Erstere liefert eine Übersicht des Zahnsystems und benachbarter Kieferstrukturen in der Frontalebene (Diedrich 2000; Fleischer-Peters 1963; Galanski 1974; Graber 1966). Röntgenstrahler und Röntgenempfänger bewegen sich im Uhrzeigersinn um den Patientenkopf herum und liefern ein Summationsbild hartgeweblicher Strukturen innerhalb einer Schichtstärke von 9 bis 20 mm (Pasler 2008). Strukturen außerhalb dieser Schicht werden unscharf und verzerrt abgebildet. Es ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum für die Panoramaschichtaufnahme, zu dem auch die Bewertung des apikalen (Carter et al. 1998; Richardson 1997) und marginalen Parodonts (Akesson et al. 1993; Akesson 1991) sowie der Knochenstruktur (Düker 2000) gehören. Zur Einschätzung filigraner Knochenstrukturen ist sie aufgrund der geringen Bildqualität nur eingeschränkt aussagekräftig (Eley & Cox 1998; Kim et al. 2008), weshalb nur eine erste Einschätzung des Knochenverlustes anhand einer Panoramaschichtaufnahme möglich ist (Kim et al. 2008).

Das Fernröntgenseitenbild ist demgegenüber eine Darstellung in der Norma lateralis. Hierbei werden knöcherne und weichgewebliche Strukturen in der Sagittalebene abgebildet. Neben der Dentition und den Kieferbasen werden zudem das Viszerokranium, die Schädelbasis und das Weichteilprofil dargestellt (Diedrich 2000). Es handelt sich hierbei ebenfalls um die zweidimensionale Darstellung von dreidimensionalen Strukturen, wodurch Limitationen in der Aussagekraft gewonnener Informationen entstehen. Die Zahnreihen rechts und links der Zahnbogenmitte überlagern sich und bilden Doppelkonturen, die durch ihren unterschiedlichen Abstand zum Röntgenempfänger unterschiedlich groß dargestellt werden (Ahlqvist, Eliasson & Welander 1986). Neben die-

sem Parallaxenfehler können außerdem Verzerrungseffekte auftreten (Skotnický 1972). Dessen ungeachtet ist eine Einschätzung der Form, Höhe und Ausdehnung des frontalen Alveolarkamms anhand des Fernröntgenseitenbildes möglich (Fuhrmann 1996a, 1996c). Dennoch macht die Überlagerung der vestibulären und lingualen Knochenlamelle in diesem Bereich eine quantitative Beschreibung der knöchernen Verhältnisse unmöglich (Fuhrmann et al. 1993; Fuhrmann, Bücken & Diedrich 1995; Fuhrmann 1996c). Da die Erwachsenenbehandlung einen immer größeren Stellenwert innerhalb des kieferorthopädischen Alltags einnimmt, gewinnt die prätherapeutische Einschätzung der parodontalen Situation an Bedeutung (Garib et al. 2010). Neben der kieferorthopädischen, röntgenologischen Basisdiagnostik kann die Anfertigung von Einzelbildern, Einzelfilm- oder Bissflügelaufnahmen sinnvoll sein. Die nutzbringenden Informationen sollten allerdings im Hinblick auf die Strahlenbelastung kritisch bewertet werden. Ein kompletter Röntgenstatus liefert Erkenntnisse über alle Zähne und zahntragenden Anteile des Alveolarknochens. In der Literatur werden beim konventionellen (Rechteckblende) und digitalen Röntgenverfahren effektive Strahlendosen von 4,1 bis 18,5 μSv (Pasler & Visser 2000) angegeben. Demgegenüber stehen Einzelbilder und Bissflügelaufnahmen zur Beurteilung einzelner Zähne mit dem kompletten angrenzenden Knochen oder nur marginaler Anteile mit effektiven Strahlendosen von 1 bis 8,3 μSv (Patel & Sandler 2009). Die Panoramaschichtaufnahme belastet den Patienten mit 6,7 (White 1992) bis 10 μSv (Cohnen et al. 2002), wohingegen das Fernröntgenseitenbild nur 1,1 bis 2,3 μSv (Pasler & Visser 2000) aufweist.

Es bleibt festzuhalten, dass die Darstellung hart- und weichgeweblicher, dreidimensionaler Strukturen mit konventionellen bildgebenden Verfahren als zweidimensionale Abbildung durch Probleme wie Überlagerung und Verzerrung zur Beschreibung feiner parodontaler Details ungeeignet ist (Sitzmann 1988). Fenestrationen sowie der vestibuläre und orale marginale Knochenrand entziehen sich der Beurteilung (Fuhrmann 1996a, 1996b; Mengel, Kruse & Flores-de-Jacoby 2006). Darüber hinaus sind quantitative Einschätzungen der Knochenverhältnisse im Bereich des Septums mehrwurzeliger Zähne unzureichend aussagekräftig (Gomes-Filho et al. 2007). Erste Studien zum Einfluss der kieferorthopädischen Behandlung auf die Höhe des interdentalen Knochens wurden mittels röntgenologischer Einzelbilder durchgeführt. Dabei beschreiben einige Autoren, dass kein vertikaler Knochenverlust feststellbar ist (Aass & Gjermo 1992; Eliasson et al. 1982; Kloehn & Pfeifer 1974; Nelson & Artun 1997; Polson & Reed 1984; Reed, Polson & Subtelny 1985). Andere beschreiben einen signifikanten, wenn auch leichten Kno-

chenverlust (Baxter 1967; Bondemark 1998; Bondemark & Kurol 1997; Harris & Baker 1990; Hollender et al. 1980; Janson et al. 2003; Kennedy et al. 1983; Øgaard 1988; Sjølien & Zachrisson 1973; Trossello & Gianelly 1979; Wisth 1975; Zachrisson & Alnaes 1974). Bei entsprechender Fragestellung können spezielle dreidimensionale Aufnahmeverfahren mit hoher Detailwiedergabe, wie eine Computertomographie, durchgeführt werden. Insbesondere das hochauflösende Computertomogramm (CT) kann alveoläre Knochenverläufe sehr präzise darstellen (Fuhrmann et al. 1995; Fuhrmann et al. 1995; Pistorius et al. 2001). Dadurch wird es nicht nur möglich, vestibuläre und orale Knochenlamellen abzubilden, sondern horizontale Knochenbreiten bis zu einer Dicke von 0,2 mm quantitativ zu erfassen und therapiebedingte Veränderungen im peridentalen Knochen hinsichtlich der Inzidenz von Knochendehiszenzen und osteoblastischen Umbauvorgängen zu beurteilen (Fuhrmann, Bucker & Diedrich 1997; Fuhrmann et al. 1994; Fuhrmann 1996a, 1996c, 2002). Mengel et al. beschrieben für das CT im Vergleich mit direkten Messungen an histologischen Präparaten eine mittlere Abweichung für Knochendefekte von 0,16 mm (Mengel et al. 2005). Aber auch für das hochauflösende Computertomogramm ist eine einwandfreie Erkennbarkeit des Parodontalspalt es nicht immer gewährleistet (Fuhrmann, Bucker & Diedrich 1997; Fuhrmann 1996b). Grundlage der Auswahl des geeigneten bildgebenden Verfahrens ist die Röntgenverordnung, die jenes Konzept bevorzugt, welches zur Beantwortung der Fragestellung beiträgt aber gleichzeitig die geringste Strahlenbelastung sowie den kleinstmöglichen finanziellen und technischen Aufwand birgt (Deutschland 1973).

In der zweidimensionalen Röntgendiagnostik können nur interproximale Knochenverhältnisse eingeschätzt werden (Misch, Yi & Sarment 2006). Trichterförmige Defekte oder linguale beziehungsweise bukkale Knochenlamellen bleiben undiagnostiziert oder können nicht voneinander unterschieden werden (Ramadan & Mitchell 1962; Rees, Biggs & Collings 1971). Aufgrund dieser Einschränkungen und einer großen Varianz zwischen mehreren Untersuchern (Eickholz & Hausmann 2000) sind dahingehend nur limitierte Beurteilungen möglich.

1.4. DVT zur bildgebenden Diagnostik in der Kieferorthopädie

Besteht der Wunsch, Fragestellungen über die konventionellen bildgebenden Verfahren hinaus zu bearbeiten und dabei Kosten und Strahlenbelastung für den Patienten zu minimieren, kann ein digitales Volumentomogramm (DVT) das Mittel der Wahl repräsentieren (Freisfeld et al. 1998; Hirschfelder 1994). Um die Ausbildung von alveolären De-

fekten wie Dehiszenzen und Fenestrationen zu vermeiden, kann es notwendig sein, topographische und anatomische Besonderheiten vor einer kieferorthopädischen Behandlung durch bildgebende Verfahren darzustellen. Das DVT stellt einen Kompromiss zwischen hochauflösender dreidimensionaler Bildgebung und geringer Strahlendosis dar, welches kleinste Hartgewebsstrukturen im Kopf- und Halsbereich visualisieren kann (Dalchow & Weber 2006; Ludlow & Ivanovic 2008). Es kann sowohl für qualitative als auch quantitative Einschätzungen verwendet werden (Baumgaertel et al. 2009; Evans 2013). Die Messgenauigkeit in digitalen Volumentomogrammen ist so gut belegt, dass es sogar Überlegungen gibt, bei allen in DVT-Aufnahmen enthaltenen Zähnen das peridentale Knochenangebot zu evaluieren (Vandenberghe, Jacobs & Yang 2008).

Vom Aufbau gleicht der digitale Volumentomograph dem Gerät zur Erstellung von Panoramaschichtaufnahmen. Prinzipiell besteht er aus einer Strahlenquelle und einem Sensor, die während der Bestrahlung gleichsinnig um den Patientenkopf rotieren. Im Gegensatz zur Computertomographie wird das Objekt der Untersuchung in einem Umlauf in 100 bis 400 Schichten einer definierten Stärke zerteilt und gespeichert, sodass überlagerungsfreie, maßstabsgetreue Schnittbilder entstehen (Hirschfelder 1994; Rothman 1998; Spitzer & Müller-Richter 1997; Terakado et al. 2000; Widlitzek, König & Golin 1996). Durch die geringe Umlaufzeit wird die effektive Strahlendosis gegenüber der Computertomographie signifikant reduziert. Daher ist das digitale Volumentomogramm bei ausreichender Indikationsstellung immer dem Computertomogramm vorzuziehen (Cohnen et al. 2002; Schulze et al. 2004; Silva et al. 2008; Swennen & Schutyser 2006).

Je nach Field of View entstehen 1,5 bis 12,3-fach geringere effektive Dosen als bei CT-Untersuchungen (Ludlow & Ivanovic 2008). Digitale Volumentomographen sind nicht als homogene Geräteklasse zu verstehen, denn sie variieren in der applizierten effektiven Dosis teilweise enorm (Chung et al. 2005; Hirsch et al. 2008; Ludlow & Ivanovic 2008; Noujeim et al. 2009; Schulze et al. 2004). Sie weisen je nach Field of View, Aufnahmeprotokoll und Hersteller effektive Dosen zwischen 13 und 498 μSv auf, wobei deren Mehrzahl 30 bis 80 μSv beträgt (Loubele et al. 2009; Ludlow & Ivanovic 2008; Silva et al. 2008). Seit kurzem gibt es außerdem ein von Mesantis inauguriertes indikationsabhängiges Dosisreduktionskonzept, auch IADR-Prinzip genannt, mit dem dreidimensionale Röntgenaufnahmen und einem Field of View von 20 x 17 cm mit einer effektiven Dosis von 12,3 bis 30,7 μSv möglich sind (Waehrisch & Bumann 2014). Dadurch wird der Anspruch einer möglichst geringen Strahlungsapplikation gemäß dem ALARA-

Prinzip und dem Paragraph 2c der Röntgenverordnung Rechnung getragen. Zusätzlich können die einzelnen Schichten in Form eines dreidimensionalen Modells rekonstruiert werden (Fuhrmann et al. 1996; Fuhrmann, Schnappauf & Diedrich 1995). Da auch bei der Anwendung dieser Methode die Röntgenverordnung gilt und gängige Indikationsstellungen häufig durch Röntgenmaßnahmen mit geringer Auflösung bearbeitet werden können, ist das Auftreten von Teilvolumeneffekten denkbar. In diesen Fällen ist die quantitative Bewertung dünner, knöcherner Strukturen nicht möglich (Fuhrmann et al., 1995; Sitzmann 1988). Werden Röntgenprotokolle mit hoher Auflösung gewählt, verlängert sich die Aufnahmedauer, sodass Bewegungsartefakte auftreten können, die im Computertomogramm selten zu finden sind (Ens et al. 2010; Fuhrmann et al. 1997; Holberg et al. 2005; Suomalainen 2010). Auslöschungs- oder Aufhärtungsartefakte durch metallische Restaurationen treten gegenüber dem CT allerdings in einer deutlich schwächeren Form auf (Fu et al. 2007; Holberg et al. 2005; Schulze et al. 2011; Schulze, Berndt & D'Hoedt 2010). Aufgrund des gesteigerten Informationsgehaltes und der vergleichsweise geringen Strahlenbelastung äußerten einige Kliniker und Röntgenherstellern bereits die Überlegung, das digitale Volumentomogramm als Ersatz für die herkömmliche kieferorthopädische Bildgebung zu verwenden (Hechler 2008; Mah, Huang & Choo 2010; Silva et al. 2008). Je nach Röntgenprotokoll können effektive Strahlendosen von 62 μSv bis 68 μSv erreicht werden (Ludlow et al. 2006; Silva et al. 2008). Im Vergleich zu konventionellen Aufnahmeverfahren birgt das DVT signifikante Vorteile für die Diagnostik parodontaler Fragestellungen (Guerrero et al. 2006; Mengel et al. 2005; Misch et al. 2006; Vandenberghe, Jacobs & Yang 2007; Vandenberghe et al. 2008; Vandenberghe, Jacobs & Yang 2007).

Obwohl in der Kieferorthopädie das zweidimensionale Röntgenbild immer noch den Standard zur Therapieplanung, Behandlungsevaluation und Langzeitkontrolle darstellt, gewinnt das dreidimensionale Aufnahmeverfahren immer mehr an Bedeutung (Aboudara et al. 2003; Halazonetis 2005; Honda et al. 2006; Maki et al. 2003; Tsiklakis, Syriopoulos & Stamatakis 2004; Yang, Jacobs & Willems 2006). Die gute Reliabilität im digitalen Volumentomogramm, insbesondere für die quantitative Einschätzung von knöchernen Dehiszenzen, konnte hinreichend belegt werden (Mengel et al. 2005; Misch et al. 2006; Mol & Balasundaram 2008; Patcas et al. 2012; Vandenberghe et al. 2008). Darüber hinaus können im DVT signifikant mehr knöchernen Defekte nachgewiesen werden als in intraoralen Einzelbildverfahren (Fuhrmann 2002; Misch et al. 2006; Vandenberghe et al. 2008). Einige Studien konnten hinsichtlich der peridentalen Kno-

chenhöhe keinen Unterschied zwischen Messungen mittels DVT oder Goldstandard ermitteln (Patcas et al. 2012; Timock et al. 2011). Demgegenüber stellten einige Autoren eine leichte Abweichung fest. In dieser Gruppe gab es Vertreter, deren radiographisch ermittelter Messwert die tatsächliche Situation in einem Bereich von 0,1 bis 0,9 mm überschätzte (Fuhrmann 1996b; Mengel et al. 2005, 2006; Misch et al. 2006; Vandenberghe et al. 2008) und Studien, die eine leichte Unterschätzung der röntgenologisch bestimmten Werte in einem Bereich von -0,09 bis -0,27 mm detektierten (Baumgaertel et al. 2009; Lascala, Panella & Marques 2004; Loubele et al. 2008; Pinsky et al. 2006). Mittlere Abweichungen dieser radiographischen Messungen von weniger als 0,1 mm können als klinisch unbedeutend (Ballrick et al. 2008), von weniger als 0,2 mm als klinisch vernachlässigbar (Pinsky et al. 2006) und weniger als 0,5 mm als klinisch akzeptabel (Mol 2004; Vandenberghe et al. 2008; 2007) betrachtet werden. Fleiner et al. ermittelten bei 0,16 mm³ Voxelgröße eine Abweichung der radiographischen Messung der vertikalen Defekttiefe vom Goldstandard zwischen 0,36 und 0,69 mm, wobei 83 % der Differenzen unter 0,5 mm groß waren (Fleiner et al. 2012).

2. Fragestellung

Obwohl die Datenlage zur Prävalenz knöcherner Dehiszenzen für parodontal kompromittierte Patienten gut ist, fehlen aktuelle Werte für den durchschnittlichen kieferorthopädischen Patienten. Darüber hinaus ist noch unklar, in welchem Maß sich das vertikale und horizontale Knochenangebot im Rahmen kieferorthopädischer Behandlung ändert und inwiefern diesbezügliche Abhängigkeiten existieren. Da eine kieferorthopädische Therapie als elektiver Eingriff zu betrachten ist, sind Informationen über spezielle Risikogruppen oder prädisponierende Faktoren für therapiebedingte Knochenverluste von entscheidender Bedeutung für die Einschätzung der Behandlungsoptionen. Dass DVT-Aufnahmen es ermöglichen, peridentale Knochenverhältnisse präzise abzubilden, konnte hinreichend belegt werden. Aber ob diese Informationen reelle Therapierelevanz für den durchschnittlichen kieferorthopädischen Patienten bedeuten, ist noch unbekannt. Darüber hinaus fehlen neben Daten zur Frontzahnbewegung Angaben bezüglich anderer Zahngruppen und deren Knochenverhältnissen im Rahmen kieferorthopädischer Behandlung.

Mit der vorliegenden Arbeit sollten insbesondere folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Knochendehiszenzen, Knochenbreiten und Zahninklinationen können im DVT-Datensatz intraindividuell reproduzierbar vermessen werden.
2. Durch kieferorthopädische Maßnahmen wird die vestibulo-orale Inklination der Zähne zur Okklusionsebene signifikant verändert.
3. Das peridentale Knochenangebot wird durch kieferorthopädische Behandlungsmaßnahmen signifikant verändert.
4. Therapeutisch bedingte Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine signifikante Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht der Patienten auf.
5. Therapeutisch bedingte Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine signifikante Abhängigkeit von der Zugehörigkeit zu einem Kiefer oder spezieller Zahngruppen auf.
6. Zwischen dem prätherapeutisch vorhandenen vertikalen Knochenangebot und dem Ausmaß der therapeutisch bedingten vertikalen Knochenveränderungen gibt es keinen signifikanten Zusammenhang.

7. Zwischen der therapeutisch bedingten Differenz im horizontalen Knochenangebot und der therapeutisch bedingten Veränderung des vertikalen Knochenangebotes gibt es keinen signifikanten Zusammenhang.
8. Zwischen der therapeutisch bedingten Differenz in der Inklination und der therapeutisch bedingten Veränderung des peridentalen Knochenangebotes gibt es keinen signifikanten Zusammenhang.

3. Methodik

3.1. Allgemeine Methodik

3.1.1. Patientengut

Das Patientengut wurde retrospektiv aus dem EU-zertifizierten Langzeitarchiv des nationalen 3D-Röntgennetzwerkes MESANTIS[®] (Standorte: Aschaffenburg, Berlin, Hamburg, Heilbronn, Leonberg, Mayen, München und Wiesbaden) rekrutiert. Das aus selbstständigen, dentalradiologischen Instituten bestehende Netzwerk, stellte anonymisierte Datensätze zur Verfügung, die mit unterschiedlichen Fragestellungen aus dem täglichen, klinischen Einsatz stammen. Um der Fragestellung hinreichend gerecht werden zu können, wurden Patienten gesucht, deren radiologischer Zustand vor und nach kieferorthopädischer Intervention in Form einer dentalen Volumentomographie (DVT) dokumentiert wurde.

Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wurde eine Bildauflösung von mindestens 0,25 mm³ Voxelgröße als zentrales Einschlusskriterium festgelegt. Zähne mit kariösen Läsionen oder Restaurationen im Bereich der Schmelz-Zement-Grenze wurden aus den Messungen ausgeschlossen, da stark röntgendichte Strukturen Bildartefakte produzieren können (Mora et al. 2007; Soğur, Baksi & Gröndahl 2007). Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass im Patientengut weder Hinweise auf aggressive oder chronische Parodontitiden, noch stärkere Engstände oder Diskontinuitäten im Kieferknochenbereich vorhanden waren.

Aus den 15.000 archivierten Datensätzen wurden 500 Patientenfälle vorsortiert. Daraus mussten 438 Datensätze aufgrund von einer zu geringen Auflösung, 6 wegen abweichender Therapieart und 13 wegen Bewegungs- oder Metallartefakten im Bereich von Referenzpunkten für die Studie ausgeschlossen werden. Es ergaben sich 43 Datensätze aus dem Zeitraum von August 2007 bis März 2012, die diesen Kriterien entsprachen. Diese 43 Patienten setzen sich aus 19 Männern und 24 Frauen mit einem Durchschnittsalter von 25 Jahren und 5 Monaten (Standardabweichung: 13 Jahre, 5 Monate; Minimum: 10 Jahre, 2 Monate; Maximum: 56 Jahre, 9 Monate) zusammen. Das Patientengut lässt sich entsprechend ihres Alters in 3 Gruppen mit folgender Verteilung darstellen:

Tabelle 1: Einteilung des Patientenguts in Altersgruppen

Gruppen [Jahre]	N _{gesamt}	N _{männlich}	N _{weiblich}	Durchschnittsalter*	Standardabweichung
1.: 10 bis 15	13	4	9	13 Jahre, 7 Monate	1 Jahr, 5 Monate
2.: 15 bis 30	16	9	7	19 Jahre, 9 Monate	3 Jahre, 9 Monate
3.: >30	14	6	8	43 Jahre	7 Jahre, 4 Monate
Gesamt	43	19	24	25 Jahre, 5 Monate	13 Jahre, 5 Monate

*Alter zum Zeitpunkt der posttherapeutischen DVT-Aufnahme

Der zeitliche Rahmen zwischen erster und zweiter DVT-Aufnahme betrug im Durchschnitt 20 Monate (Standardabweichung: 7 Monate) und reicht von 12 bis 38,5 Monaten. Zwischen Ausgliedern der kieferorthopädischen Apparatur und posttherapeutischem Röntgentermin lagen durchschnittlich 1,1 Monate (Minimum: 0 Monate; Maximum: 17 Monate). Für die Anfertigung jedes dentalen Volumentomogramms lag eine, durch einen Zahnarzt/ -ärztin mit gültiger DVT-Fachkunde gestellte, rechtfertigende medizinische Indikation vor, die unabhängig von der vorliegenden retrospektiven Studie war. Für diese Arbeit wurde demnach keine einzige DVT-Aufnahme angefertigt. Alle Patienten wurden im Sinne der Straight-Wire-Technik mithilfe einer Multibracketapparatur behandelt.

Tabelle 2: Ein- / Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Prätherapeutisches DVT ohne vorherige kieferorthopädische Maßnahme	
Posttherapeutisches DVT nach abgeschlossener Kieferorthopädischer Behandlung und mindestens dreimonatiger Retentionsphase	Unschärfen in den Datensätzen; Verwacklungsartefakte

Mindestens 12 Monate kieferorthopädische Behandlung mittels Multibrackettherapie	Ursachen für Ungenauigkeiten im Bereich der Schmelz-Zement-Grenze (kariöse Läsionen / Restaurationen)
Bildauflösung: 0,25 mm ³ oder kleiner	Bildauflösung: >0,25 mm ³
Vollständig dargestellter dentaler Bereich	Hinweise auf chronische oder aggressive Parodontitiden (genereller marginaler- / lokalisierter vertikaler Knochenabbau)
Keine bis leichte Engstände	Mittlere bis starke Engstände

3.1.2. DVT-Parameter

Prinzipiell werden von allen Mesantis-Standorten entweder das i-CAT Classic[®] (Hatfield, USA) oder das „Mesantis Line“, eine Modifikation des 3D eXam der Firma KaVo Dental, verwendet. Bei dem i-CAT Classic „handelt es sich um ein Fächerstrahl-Volumentomographie- und Panorama-Dentalbildgebungssystem für Kopf- und Halsaufnahmen zu zahnmedizinischen Zwecken“ (Imaging Sciences International Inc. 2006) der Firma Imaging Sciences International Inc..

Das Mesantis Line ist ein Kegelstrahl-Volumentomographie- und Panorama-Dentalbildgebungssystem. Ergebnisse unterschiedlicher Strahlenprofile und Dentalbildgebungssysteme können miteinander verglichen werden. Die DGZfP stellte 2009 fest, dass das Kegelstrahl-CT unter der Voraussetzung von Artefaktkorrekturverfahren vergleichbare Messeigenschaften zum Fächerstrahl-CT bei kürzeren Aufnahmezeiten aufweist (Hiller, Funk & Kasperl 2009).

Technische Details können der Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Technische Daten vorhandener DVT-Geräte.

Abkürzungen: B=Breite, H=Höhe, D=Durchmesser, kV=Kilovolt, mA=Milliampere

	I-CAT Classic [®]	Mesantis [®] line
Bilddetektor	Flachfeld, amorphes Silizium (ablesbarer Bereich) 23,8 cm x 19,2 cm (B x H)	Flachfeld, amorphes Silizium (erfassbarer Bereich) 23,8 cm x 19,2 cm (B x H)

Voxelprofile [mm ³]	0,4 / 0,3 / 0,25 / 0,2	0,4 / 0,3 / 0,25 / 0,2 / 0,125
Strahlenprofil	Fächerstrahl	Kegelstrahl
Graustufung [Bit]	12	14
Bilderfassung	Einzelrotation	Einzelrotation
Bilderfassungsdauer [s]	40 / 20 / 10	26,9 / 17,8 / 14,7 / 8,9 / 4,9
Sichtfeld (Field of View) [cm]	16 x 13 (D x H)	16 x 13,5 (D x H)
Röhrenspannung [kV]	120	120
Stromstärke [mA]	3 bis 8	3 bis 7

Die untersuchten DVTs entsprachen einem Scan-Protokoll mit einem Durchmesser von 16 cm, einer Höhe von 13 cm, einer Bilderfassungsdauer von 26,9 Sekunden und einer Auflösung von 0,25 mm³. Die effektive Dosis bei diesen Aufnahmeparametern beträgt bei dem i-Cat Next Generation 134,2 µSv (Grünheid et al. 2012). Einige Aufnahmen mit höherer Auflösung wurden nach einem Protokoll von 16 cm Durchmesser, 13 cm Höhe, 40 Sekunden Bilderfassungsdauer und einer Auflösung von 0,25 mm³ erstellt.

Nach der Datenerfassung wurden die einzelnen Schichten mittels systemeigener Software zum 3-dimensionalen Bild rekonstruiert. Datensätze werden im DICOM-Format (Digital Imaging and Communications in Medicine) gespeichert und bearbeitet. Das DICOM-Format gilt als Industriestandard für digitale Bilder im medizinischen Bereich und soll Interoperabilität, also einen herstellerunabhängigen Austausch zwischen unterschiedlichen medizinischen Bilddarstellungssystemen, gewährleisten. Die effektive Dosis des I-CAT Classic[®] mit Einbezug der Speicheldrüse beträgt bei einer Scanzeit von 20 Sekunden 101,5 Mikrosievert (Imaging Sciences International Inc. 2006).

Aus den DICOM-Datensätzen werden mit Hilfe einer geeigneten Software 3-dimensionale Computermodelle rekonstruiert. Neben dem 3-dimensionalen Modell stehen außerdem Ansichten zur Beurteilung einzelner Schichten innerhalb des Modells zur Verfügung. Die Messungen wurden im Befundungszentrum des Mesantisstandortes Berlin durchgeführt. In einem abgedunkelten Raum wurde der Monitor Eizo RadiForce R31 (Fa. Avnet Technology Solutions GmbH, Nettetal, Germany) mit einer Auflösung von 3 Megapixeln und 1536 x 2048 Bildpunkten verwendet. Das Kontrastverhältnis be-

trug 400:1 und die Helligkeit/ Leuchtdichte betrug 400 cd/m² (Candela pro Quadratmeter). Ein 10-Bit-Look-Up-Table steuerte zudem die Farbwiedergabe. Diese Abbildungsparameter ermöglichen die Betrachtung von Röntgenbildern gemäß Kategorie B nach DIN V 6868-57 und QS-RL. Die tägliche Konstanzprüfung der Monitore erfolgte durch das Mesantispersonal.

In allen Mesantis Röntgeninstituten wird ein gleicher Ablauf zur Erstellung einer DVT-Aufnahme eingehalten. Sämtliche Patienten werden in der Frontansicht anhand der Okklusionsebene, von sagittal mittels einer gedachten Linie zwischen der Nasenspitze und dem jeweiligen Tragus positioniert. Ist die Ausrichtung des Patienten durch eine Übersichtsaufnahme kontrolliert, kann anschließend die ausführliche Röntgenaufnahme stattfinden. Um Bewegungsartefakte zu vermeiden, sollte während des Scans auf Schlucken oder Kaubewegungen verzichtet werden. Durch das kegelförmige Strahlenprofil kann eine einzelne Rotation um 360° das eingegebene Volumen erfassen. Es ergibt sich ein Expositionszeitraum von etwa 40 Sekunden, wobei das eingestellte Field of View 13 x 16 cm umfasst. Prinzipiell gilt, dass mit abnehmender Voxelgröße, also einer verbesserten Auflösung und Genauigkeit, die Aufnahmedauer ansteigt. Aus diesem Grund ist eine Aufnahme bei höherer Auflösung auch empfindlicher gegenüber Bewegungen des Patienten (Kaltenbach & Voigt GmbH 2009). Überdies erhöht sich nicht nur die Rekonstruktionszeit sondern ebenfalls die Strahlenbelastung für den Patienten.

Prä- und posttherapeutische Röntgenaufnahmen eines Patienten stammen jeweils von demselben dentalen Volumentomographen.

3.1.3. Messmethodik

Zur Datenerhebung wurde InVivo Dental 5.1.6 (Anatomage Inc., San Jose, Kalifornien), eine volumetrische Bildgebungs- und Planungssoftware, verwendet (Anatomage Inc. 2011). Dieses Programm rekonstruiert 3D-Modelle aus DICOM-Datensätzen und unterstützt eine Vielzahl von Analysemöglichkeiten. Neben der dreidimensionalen Darstellung mit der 3D-Rendering-Software ist es durch die sogenannte Mehrfachprojektionsrekonstruktion ebenfalls möglich, einzelne Schichten in der transversalen, koronalen oder sagittalen Ebene zu betrachten. Alle Messungen wurden in dieser multiplanaren Ansicht vorgenommen. Das Programm unterscheidet das Section- und das Arch Section-Menü, wobei Einstellungen der Betrachtungsachse in dem Section-Menü (Abb. 1) vorgenommen werden können. Hier kann die DVT-Aufnahme in der axialen-, koronalen

und sagittalen Ebene um ein Fadenkreuz rotiert, also reorientiert werden. Das Arch-Section-Menü (Abb. 2) erweitert lediglich die Betrachtungsmöglichkeit um eine Panorama-Ansicht und gestaffelte Cross-Section-Ansichten. Messungen fanden ausschließlich in der Cross-Section-Ansicht des Arch-Section Menüs statt.

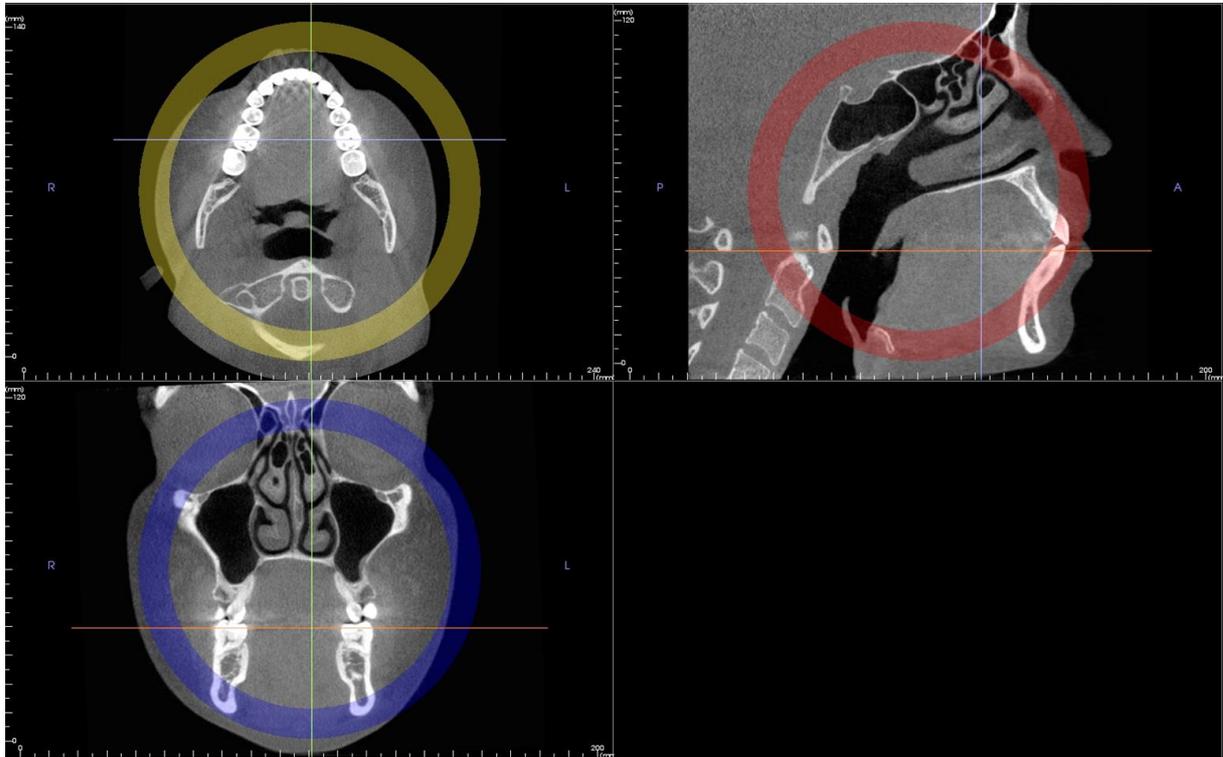


Abb. 1: InVivoDental Section-Menü

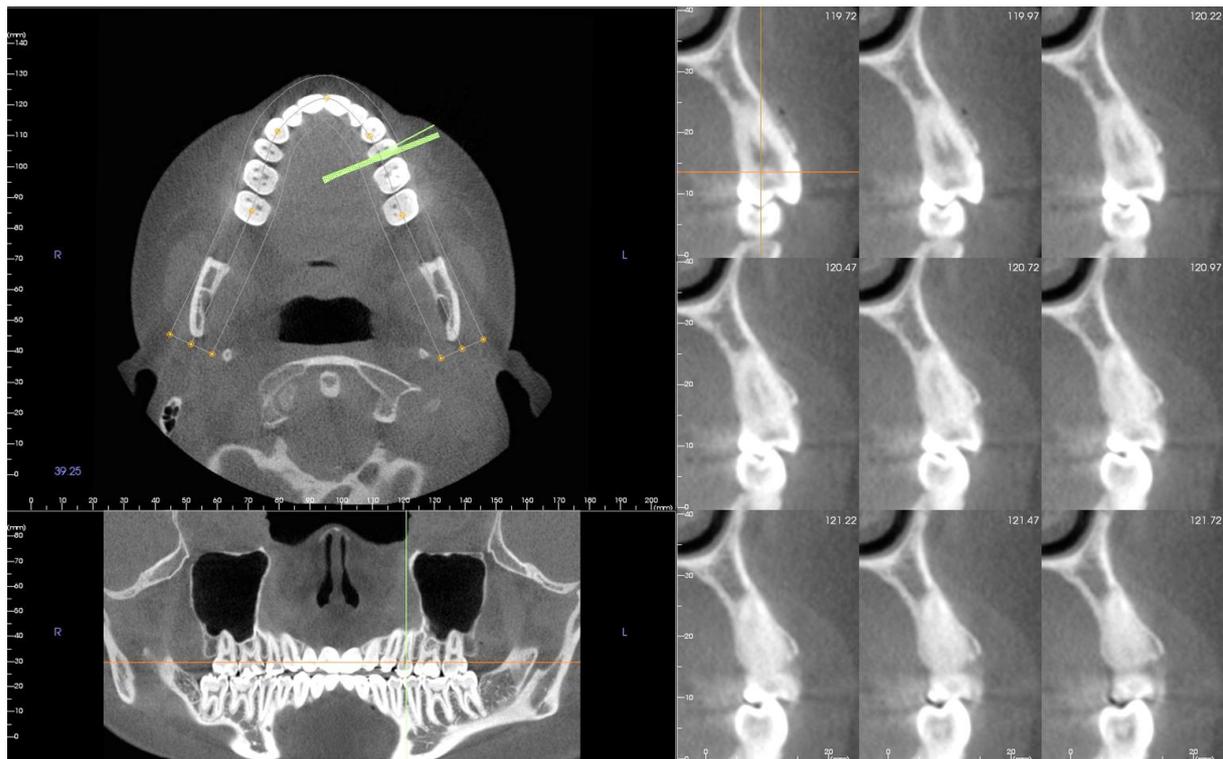


Abb. 2: InVivoDental Arch Section-Menü

Es wurden alle Zähne bis zu den ersten bleibenden Molaren in die Messung integriert, so dass maximal 24 Zähne pro Patient untersucht wurden. Grundlage der Messmethode bildete die Untersuchung von R. Fuhrmann aus dem Jahr 1996 (Fuhrmann 1996c). Generell wurden 2 Messparameter erhoben, die eine Aussage über das peridentale Knochenangebot vor und nach kieferorthopädischer Behandlung ermöglichten. Einerseits wurde das vertikale Knochenangebot als linearer Abstand zwischen der Schmelz-Zement-Grenze und dem zervikalen Knochenrand, parallel zur Zahnachse gemessen. Andererseits wurde die transversale Knochenbreite als linearer Abstand zwischen lateraler Zahnbegrenzung und äußerstem lateralen Knochenrand senkrecht zur Zahnachse ermittelt. Diese Messparameter wurden bereits in einer Vielzahl von röntgenologischen Studien zur Ermittlung der Messgenauigkeit des peridentalen Knochens bestimmt (Fleiner et al. 2012; Fuhrmann et al. 1995; Fuhrmann 1996a; Schattmann 2011). Überdies wurde ein Parameter als Maß der kieferorthopädischen Bewegung erhoben, anhand dessen eine Änderung des peridentalen Knochenangebotes eingeschätzt werden sollte. Wir wählten die vestibulo-orale Inklination der Zahnachse in Bezug zur Okklusionsebene, da sie ohne eindeutig festgelegten Bezugspunkt eine relative Achsenänderung der Zähne sehr gut wiedergibt. Jeder Parameter wurde sowohl im prä-

therapeutischen als auch im posttherapeutischen DVT ermittelt. Zwischen der Erhebung zugehöriger Parameter unterschiedlichen Zeitpunktes wurden zum Zwecke der Vermeidung potentieller reading order error ein Intervall von mindestens 6 Monaten eingehalten. Das Problem der Wiederauffindung korrespondierender Strukturen in zwei Röntgenaufnahmen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten angefertigt wurden, besteht in der Schwierigkeit eine gemeinsame Bezugsebene festzulegen, da es im Schädel keinen Punkt gibt, der während des Wachstums stabil bleibt (Baumrind et al. 1983; Baumrind, Miller & Molthen 1976; Israel 1968, 1970). Sämtliche Messungen wurden als JPEG-Datei gespeichert. Erhobene Messwerte wurden in anonymisierter Form in einer Excel-Tabelle verwaltet.

3.1.4. Statistische Auswertung

Die statistische Aufarbeitung in Form von explorativer Datenanalyse und nicht-parametrischen Tests, sowie die Erstellung von Diagrammen wurde mit Hilfe der Statistiksoftware SPSS Statistics® (Statistical Package of Social Science, Version 20, Chicago, IL, USA) der Firma IBM SPSS für Windows durchgeführt. Nach der Datenerhebung standen aus den N= 43 Patienten eine Gesamtzahl von 954 untersuchten Zähnen zur Prüfung der unter Kapitel 2 beschriebenen Hypothesen zu Verfügung. Wie in dem Abschnitt der Fragestellung ersichtlich, wurde sowohl nach Geschlecht, Alter, Kiefer als auch Anzahl der Wurzeln unterschieden.

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit des Fehlers 1. Art $\alpha = 0.05$ festgelegt. Sie stellt die Wahrscheinlichkeit dar, bei der die Nullhypothese verworfen werden kann. Die Nullhypothese beschreibt eine Hypothese, die einen bestimmten Unterschied, Zusammenhang oder Effekt leugnet und steht damit der Alternativhypothese oder Gegenhypothese diametral gegenüber. SPSS ermittelt für Hypothesentests einen sogenannten p-Wert, der auch als Überschreitungswahrscheinlichkeit bezeichnet wird. Er gibt an, wie wahrscheinlich ein vorliegendes Stichprobenergebnis ist, wenn die Nullhypothese der Wahrheit entspricht. Je mehr sich der p-Wert dem Wert Null annähert, desto mehr spricht das Ergebnis gegen die Nullhypothese. In den medizinischen wissenschaftlichen Disziplinen haben sich festgelegte Grenzen von 0.05, 0.01 und 0.001 durchgesetzt. Kann also die Nullhypothese abgelehnt werden, bezeichnet man das Ergebnis als statistisch signifikant. Entspricht das Stichprobenergebnis einem p-Wert von <0.05 , so wird von einem statistisch signifikanten Zusammenhang gesprochen. Ein Wert von <0.01 entspricht einem hohen, <0.001 einem höchst signifikanten

Ergebnis. Dennoch darf in keinem Fall davon ausgegangen werden, dass ein solcher Befund auch einen dementsprechenden Effekt beweist (Altman 1991). Alle Angaben zur Signifikanz wurden auf 3 Stellen nach dem Komma gerundet.

Zur Teststärkenanalyse wurde das Programm GPower 3.1 verwendet. Es wurden Post-hoc-Analysen für die jeweiligen N durchgeführt. Um die Teststärke $1 - \beta$ zu errechnen, wurde von einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ und einer Effektstärke $d = 0,5$ ausgegangen.

Da laut dem Kolmogorov-Smirnov-Test kein Parameter bis auf die Inklination der Zähne eine Normalverteilung aufwies, wurden neben dem T-Test für verbundene Stichproben vor allem nicht-parametrische Tests durchgeführt. Zum Vergleich der verbundenen Stichproben vor und nach kieferorthopädischer Behandlung wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test verwendet. Lagen mehr als 2 verbundene Stichproben vor, wurde die Friedmans-Zweifachrangvarianzanalyse benutzt, um zu prüfen ob Unterschiede zwischen den Stichproben vorliegen. Konnte die Nullhypothese widerlegt werden, konnten anhand paarweiser Vergleiche die genauen Parameterbeziehungen abgelesen werden. Dieser Test wurde unter Anderem zum Vergleich der Parameter der therapiebedingten Änderungen im transversalen Knochenangebot verwendet. Bei unabhängigen Stichproben wie beispielsweise dem Vergleich zwischen den Geschlechtern wurde der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Die Erweiterung dieses Tests bei mehr als 2 unabhängigen Stichproben wie den Altersgruppen ist der Kruskal-Wallis-Test.

Um die Zusammenhänge zwischen der Inklinationsänderung und der Änderung im vertikalen Knochenangebot zu evaluieren, wurde die Korrelation nach Pearson ermittelt. Sie beschreibt die Stärke des linearen Zusammenhanges zwischen 2 mindestens intervallskalierten Merkmalen. Sie nimmt Werte zwischen +1 und -1 an, was einem perfekten positiven oder negativen linearen Zusammenhang entspricht. Ergibt sie den Wert Null, so besteht kein linearer Zusammenhang. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass ein nicht-linearer Zusammenhang existiert.

Der Effekt der prätherapeutischen, vestibulären Defekttiefe auf den therapiebedingten vestibulären Knochenverlust konnte über die univariate Varianzanalyse bestimmt werden. Sie charakterisiert die Auswirkung einer oder mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable.

3.2. Spezielle Methodik

3.2.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Parameter

Um die Messmethodik auf Reliabilität zu überprüfen, wurden an 50 beliebig ausgewählten Zähnen Wiederholungsmessungen zur Messfehlerbestimmung durchgeführt. Dazu wurden je 5 Zähne aus 10 zufällig ausgewählten DVT-Aufnahmen aus dem bereits beschriebenen Patientengut ausgewählt. Einzige Einschränkung war die Maßgabe, dass alle 10 DVT-Aufnahmen von unterschiedlichen Patienten stammen sollten. Es wurde also kein Zahn vor und nach kieferorthopädischer Behandlung vermessen. Pro Zahn pro Parameter wurden anschließend 6 Messungen im Sinne einer Wiederholungsmessung durchgeführt. Zwischen den einzelnen Wiederholungsmessungen lagen jeweils 24 Stunden. Sie wurden von derselben Person in zufällig festgelegten Reihenfolgen durchgeführt. Es ergab sich folgende Verteilung von Zähnen:

Tabelle 4: An der Messfehlerbestimmung beteiligte Zähne

Zähne	OK*- Molar	UK*- Molar	OK*- Prä- molar	UK*- Prä- molar	OK*- Eckzahn	UK*- Eckzahn	OK*- Inzisivus	UK*- Inzisivus
Anzahl	5	6	8	8	4	3	7	9
*OK – Oberkiefer, UK – Unterkiefer								

Anschließend konnte für jeden Messparameter ein Methodenfehler nach Dahlberg sowie ein Reliabilitätskoeffizient nach Houston ermittelt werden. Dahlberg beschrieb den methodischen Fehler als Ausmaß der Schwankungsbreite zweier Werte einer wiederholten Messung, in Bezug auf den tatsächlichen Betrag des Messwertes. Somit können Fehler quantifiziert werden, die bei der Identifizierung von Messpunkten auftreten oder durch den Untersucher selbst verursacht werden. Er ging dabei von einem Vielfachen von Doppelmessungen aus und definierte den Methodenfehler δ anhand folgender Gleichung:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

Hierbei stellt d die Differenz aus Messwert und Mittelwert der Einzelmessungen dar, n repräsentiert die Anzahl der durchgeführten Messungen (Dahlberg 1940).

Mithilfe des Zuverlässigkeitskoeffizienten nach Houston ist es möglich, eine Aussage über die Reliabilität der einzelnen Variablen zu treffen. Er errechnet sich anhand nachstehender Formel:

$$R = \frac{1 - \delta^2}{S_v^2}$$

S_v steht in diesem Fall für die Standardabweichung der Messreihe (Houston 1983).

3.2.2. Ausmaß der therapeutischen Inklinationsänderung

Da die quantitative Einschätzung der therapeutischen Zahnbewegung anhand von 2 DVT-Aufnahmen äußerst schwierig ist, haben wir uns dazu entschlossen, einen eher begrenzt aussagekräftigen aber reliabel messbaren Parameter als Vergleichsgröße zu erheben. Die vestibulo-orale Inklination als ein Maß zur therapeutischen Zahnbewegung wurde als Winkel zwischen Zahnachse und Okklusionsebene im DVT definiert. Sie wird im Folgenden als Inklination benannt. Dabei wurde die Einstellung der Okklusionsebene nur 1 Mal pro DVT-Aufnahme vorgenommen. Im Rahmen dieser Studie wurde die Zahnachse für einwurzelige Zähnen als Verbindungslinie zwischen Mitte der Wurzelspitze und Höckerspitze des vestibulären Höckers, beziehungsweise der Mitte der inzisalen Kante definiert. Bei mehrwurzeligen Zähnen wurde die Zahnachse als Verbindungslinie der palatinalen Wurzelspitze im Oberkiefer beziehungsweise Wurzelspitze der mesialen Wurzel im Unterkiefer und der Höckerspitze des mesio-vestibulären Höckers angenommen. Da sich kieferorthopädische Zahnbewegungen nicht als absoluter Wert, sondern als Änderung der Inklination auszeichnen, konnte eine beliebige Zahnachse definiert werden, solange sie sich als reproduzierbar messbarer Parameter darstellt. Der Wert der Inklination vor kieferorthopädischer Behandlung stellte hierbei also weniger einen aussagekräftigen Wert der Zahnstellung im Alveolarfortsatz dar, sondern diente vielmehr als Ausgangswert um eine Änderung der vestibulo-oralen Achsenstellung über den Zeitraum der Behandlung detektieren und quantitativ einschätzen zu können. Die therapiespezifische Änderung der Inklination ergibt sich aus:

Δ Inklination = Inklination_{post} – Inklination_{prä}. Beträgt die Inklinationsänderung 0, so kam es im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung nicht zu einer Änderung in der oro-vestibulären Zahnachse. Eine Vergrößerung des vestibulo-oralen Winkels deutet auf eine relative Kippung des Zahnes nach oral hin. Dabei kann es sich um eine ko-

ronale Kippung nach oral, eine apikale Kippung nach vestibulär oder eine Kombination aus beidem handeln. Wie bereits erwähnt ist eine Orientierung des Zahnes nach vestibulär besonders risikobehaftet, da die vestibuläre Knochenlamelle im Vergleich zur oralen Knochenbreite um ein Vielfaches dünner ist.

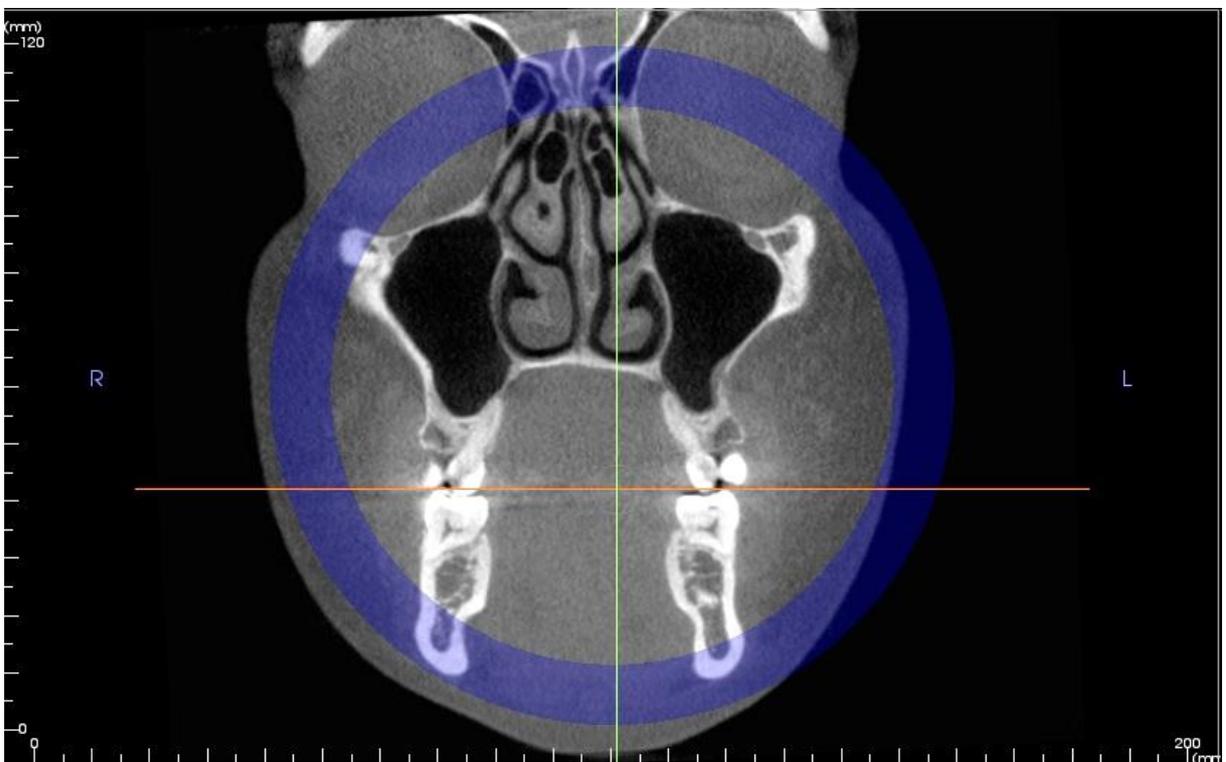
Zunächst wurde in der axialen Ebene des Section Menüs die horizontale Linie auf den disto-vestibulären Höcker eines ersten bleibenden Molaren verschoben. Nun wurde die axiale Ebene so reorientiert, dass die horizontale Linie die beiden disto-vestibulären Höcker von 36 und 46 verbindet. In der koronalen Ebene konnte die horizontale Linie anschließend auf die Höckerspitzen verschoben werden. Nachdem die horizontale Linie in der sagittalen Ebene auf den Berührungspunkt der Schneidekanten der mittleren, unteren Schneidezähne reorientiert wurde, ist die Einstellung der Okklusionsebene abgeschlossen.

Im Arch Section Menü wurde eine Schnittdicke von 1,5 mm gewählt, da die Zahnachsen, im Gegensatz zu den Messungen des peridentalen Knochenangebotes, nicht den Schnittebenen entsprechen. Dünne Schnittebenen würden dazu führen, dass Apex und Krone eines Zahnes nicht gleichzeitig in einer Schicht auffindbar wären und Winkelmessungen daher stark verfälscht würden. Nachdem der Zahn in der Cross Section Ansicht zentralisiert wurde, wurde ein Winkel zwischen bereits definierter Zahnachse und horizontaler Linie, also axialer Ebene gemessen.

Im Folgenden ist der Ablauf der Messungen der vestibulo-oralen Inklination am Beispiel von Zahn 25 in illustrierter Form abgebildet.

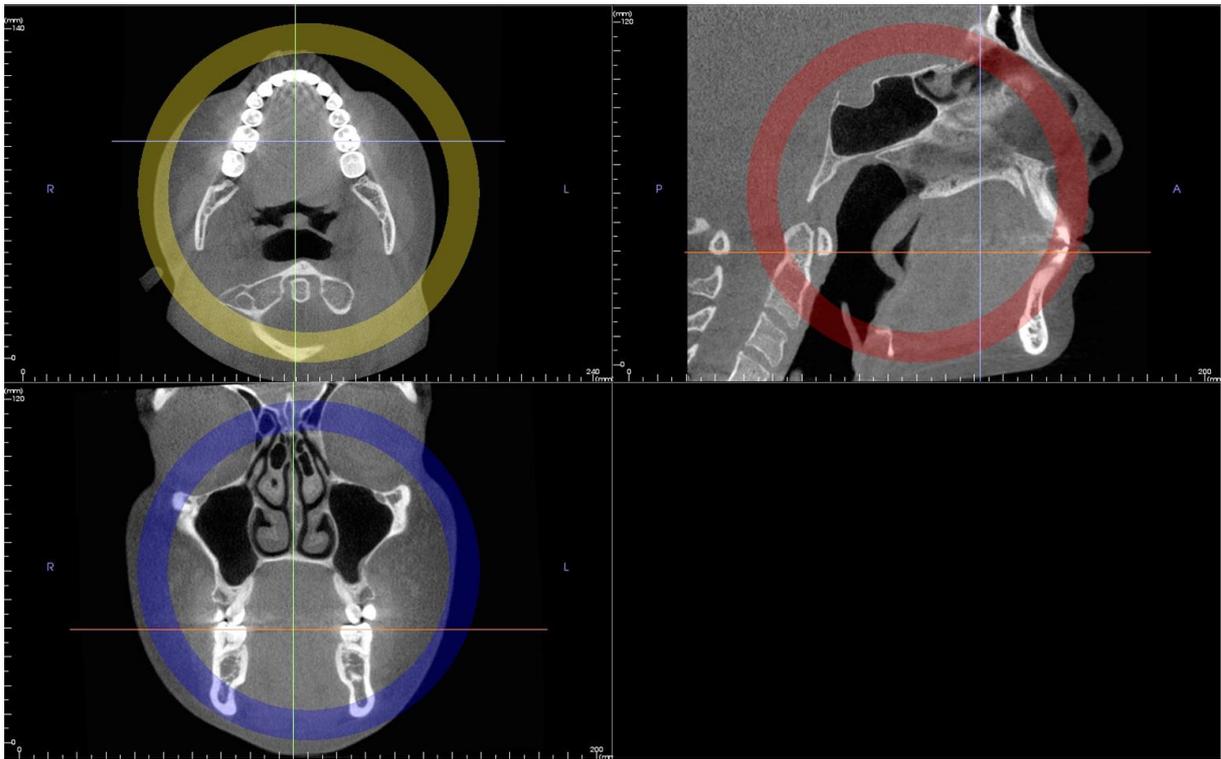


Section Menü: axiale Ebene so reorientiert, dass horizontale Linie disto-vestibuläre Höcker der 1. bleibenden Molaren verbindet

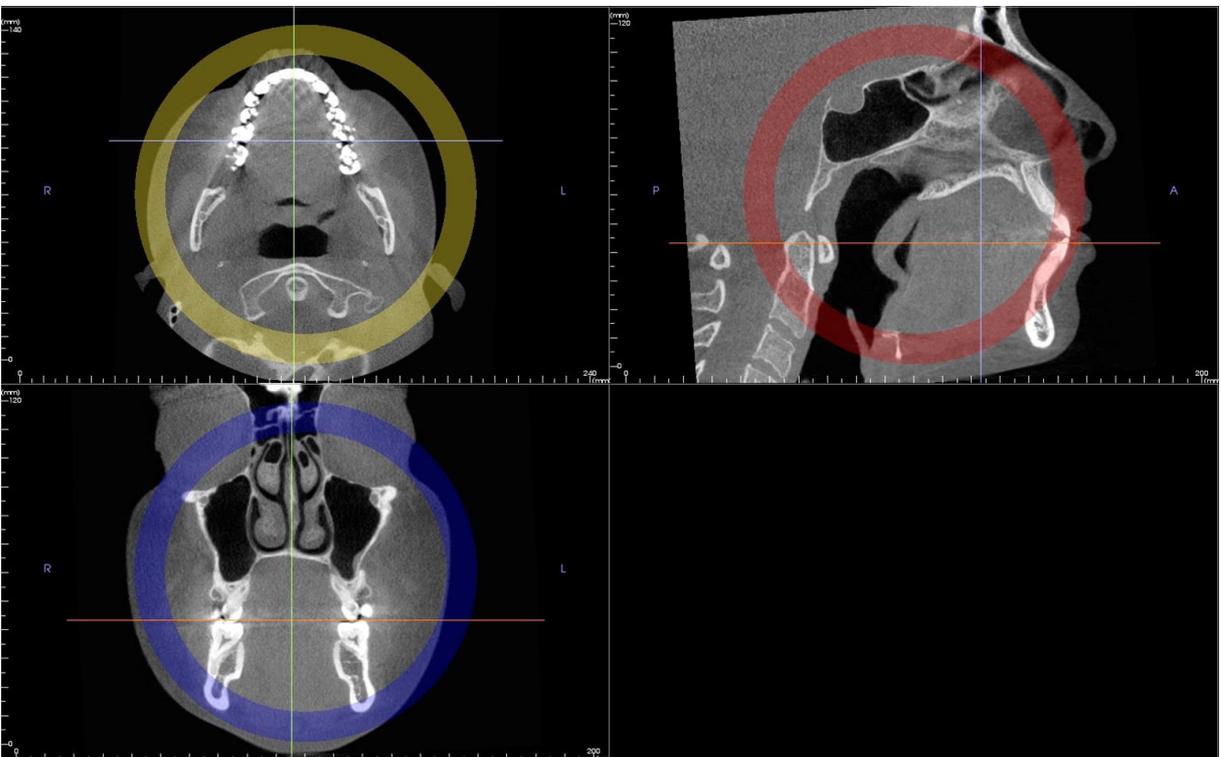


Koronale Ebene so reorientiert, dass horizontale Linie Höckerspitzen der 1. bleibenden

Molaren verbindet

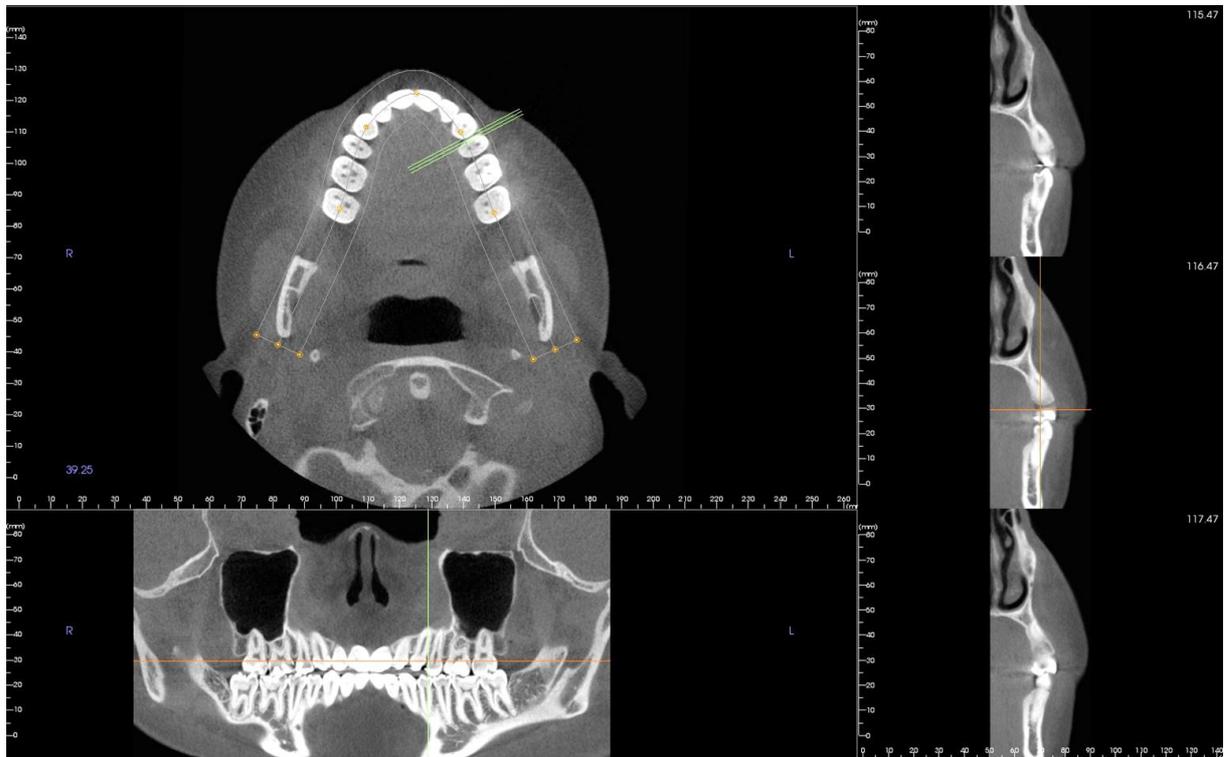


Vertikale Linie in axialer Ebene zwischen untere mittlere Inzisivi verschoben

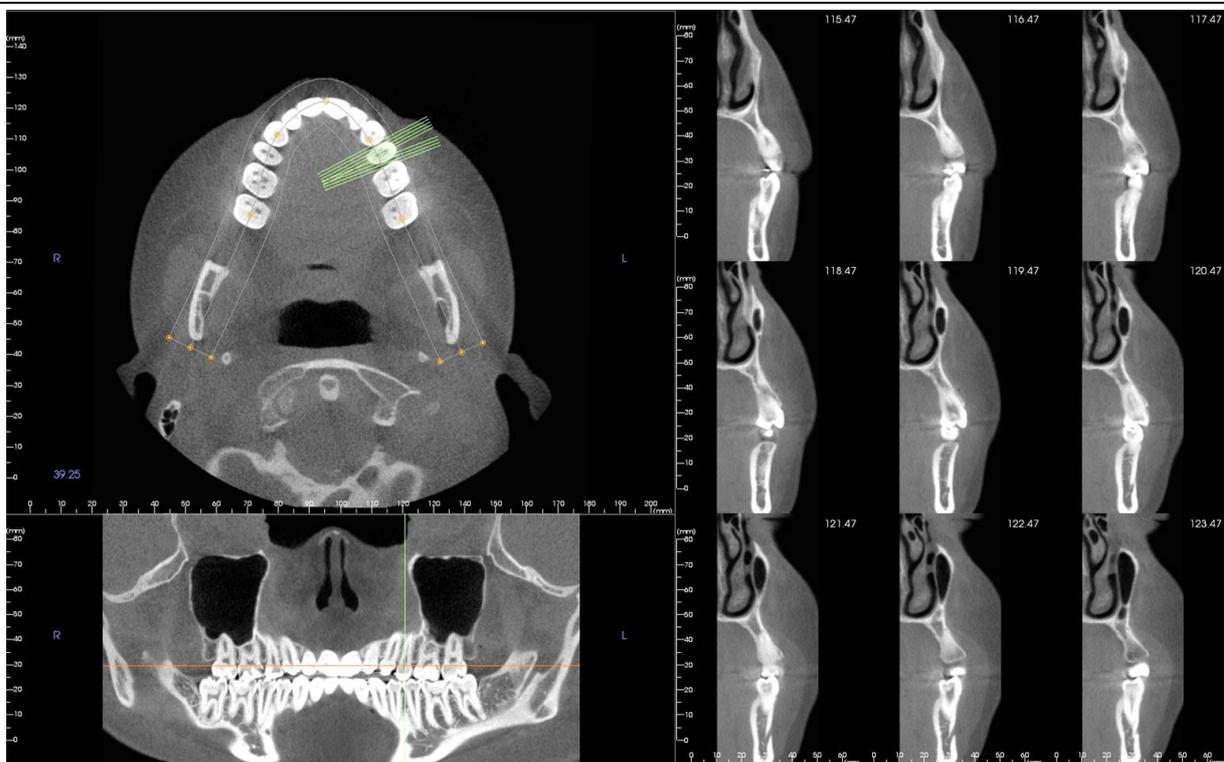


Sagittale Ebene so reorientiert, dass horizontale Linie Berührungspunkt der Schnei-

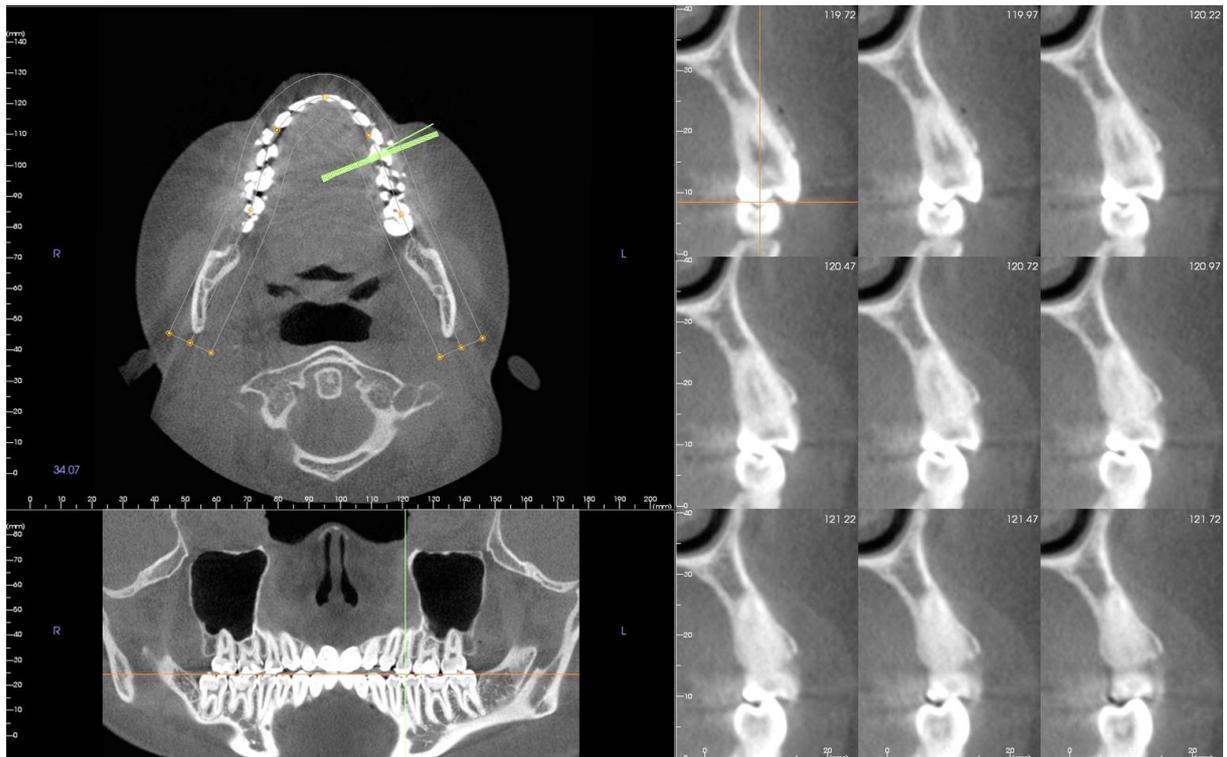
dekanten der mittleren Inzisivi tangiert; aufgespannte Ebene verbindet Interinzisalpunkt und disto-vestibuläre Höckerspitzen der ersten bleibenden Molaren des Unterkiefers



Arch Section Menü: Ausgangssituation



Einstellung des Bogenfeldes



Positionierung des Zahnes 25 in Mitte der Cross Section Ansicht, horizontale Linie auf Niveau der vestibulären Höckerspitze verschoben



Messung der vestibulo-oralen Inklination mit der horizontalen Linie und der Verbindung der Mitte der Wurzelspitze und der Höckerspitze des mesio-vestibulären Höckers als Schenkel

Abb. 3 bis 12: Ablauf der Messung der vestibulo-oralen Inklination am Beispiel von Zahn 25

3.2.3. Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderungen

Um die Veränderungen in der Alveole besser beurteilen zu können, sollte nach dem vertikalen und horizontalen Knochenangebot unterschieden werden. Für 954 Zähne ergab sich eine Teststärke von $\approx 1,00$, bei einer angenommenen Effektstärke von 0,5.

Vertikales Knochenangebot

Zur Messung des vertikalen Knochenangebotes wurden die Schmelz-Zement-Grenze, sowie der marginale Knochenrand als Referenzpunkte festgelegt.

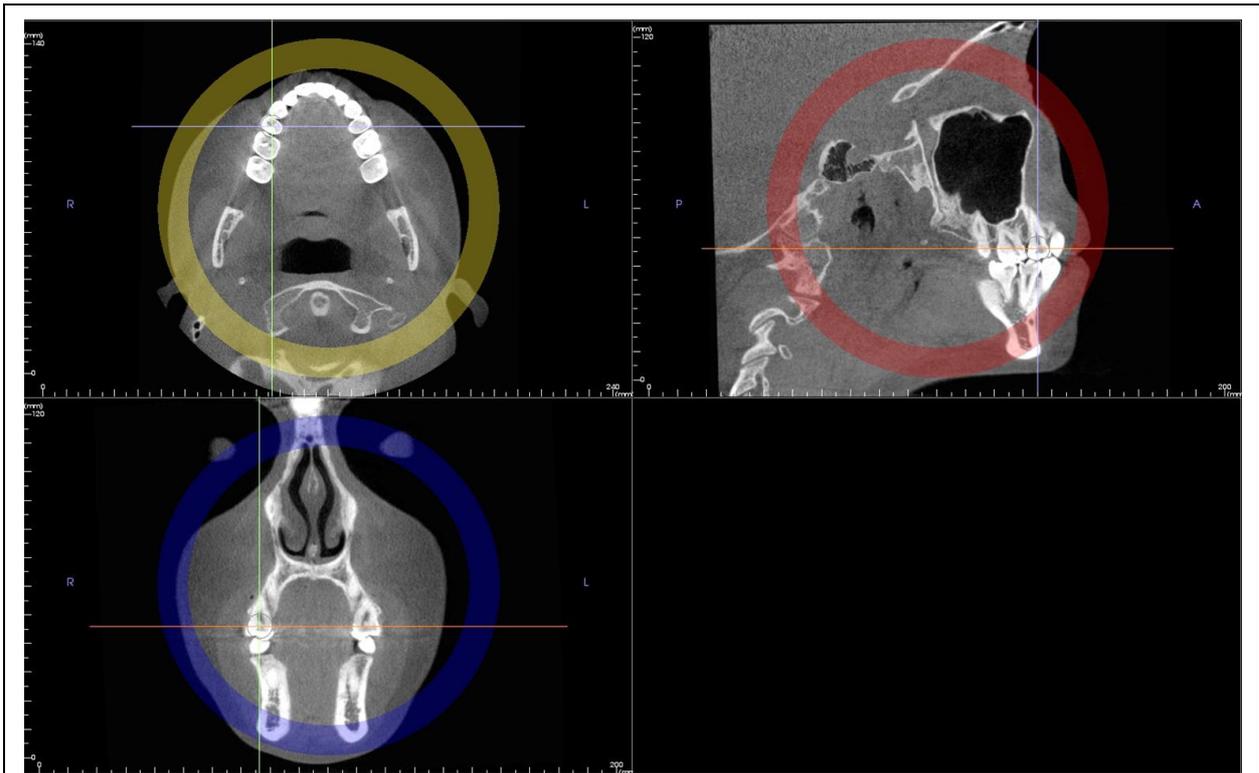
Zachrisson und Alnaes nutzten diese Technik bereits 1974, um in 2-dimensionalen Röntgenbildern den interdentalen Knochen vor und nach kieferorthopädischer Behandlung zu beurteilen (Zachrisson & Alnaes 1974). Im Gegensatz dazu können in 3-dimensionalen Röntgenaufnahmen die grazileren vestibulären und oralen Knochenlamellen bewertet werden. Studien haben gezeigt, dass vor allem der morphologisch schwach ausgebildete vestibuläre Alveolarknochen ein höheres Risiko zur Ausbildung knöcherner Dehiszenzen aufweist (Rupprecht et al. 2001). Der Bereich der Symphyse im Unterkiefer-Frontzahnbereich scheint überdies sehr häufig von vestibulären Dehiszenzen betroffen zu sein (Mulie & Ten Hove 1976). Die Messung erfolgte parallel zur Zahnachse und da der marginale Knochenrand nicht geradlinig sondern halbmondförmig verläuft, wurden die Werte im Bereich des tiefsten Punktes ermittelt (Patcas et al. 2012).

Da die Grenze ab wann eine Defekttiefe als pathologische Dehiszenz beschrieben wird nicht eindeutig festgelegt ist, können je nach Studiendesign stark unterschiedliche Prävalenzen für alveoläre Defekte beschrieben sein. Persson et al. beschrieben bei einer Änderung der Grenze von 1 auf 3 mm eine Reduktion der Prävalenz von 70 % auf 30 % (Persson et al 1998). Ein Wert kann erst dann als vergrößert beschrieben werden, wenn er den Mittelwert der gesunden Bevölkerung signifikant übersteigt (Janson et al. 2003). Es konnte gezeigt werden, dass der Abstand zwischen der Schmelz-Zement-Grenze und dem marginalen Knochenrand bei parodontal gesunden Probanden einen Wert von 2 mm nicht übersteigt (Hausmann & Clerehugh 1991; Källestål & Matsson 1989).

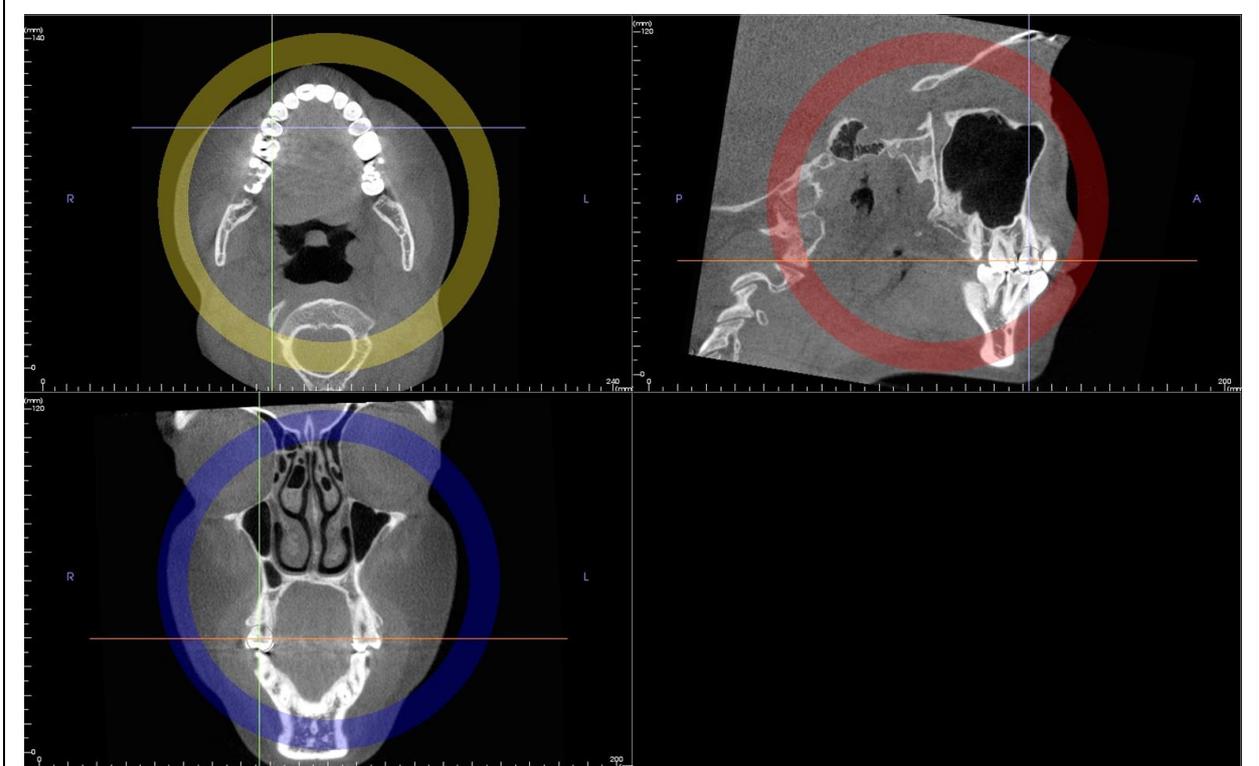
Mehrere Autoren beschreiben daher diesen Abstand erst dann als pathologisch wenn er einen Wert von ≥ 2 mm annimmt (Persson et al. 1998; Yagci et al. 2011). Analog dazu wurden in der Auswertung Defekttiefen über 2 mm als relevante Knochendehiszenzen beschrieben und als gesonderte Untersuchung des relevanten Anteils der Defekttiefen in den Abschnitten über das vertikale Knochenangebot betrachtet.

Zunächst wurde der betreffende Zahn im Section-Menü parallel zur Schnittachse des Programms eingestellt. Das Section-Menü setzt sich aus 3 Ebenen, der axialen, koronalen und sagittalen Schnittebene, zusammen. Ein Fadenkreuz, zusammengesetzt aus je einer vertikalen und einer horizontalen Linie definieren über ihren Schnittpunkt exakt einen Punkt im dreidimensionalen Modell. Wählt man nun diesen Punkt im koronaren Bereich eines Zahnes kann man durch Reorientierung der Schnittebenen die Zahnachse und die vertikalen Linien der sagittalen und koronalen Schnittebenen parallelisieren. Dies stellt sicher, dass der Zahn in jeder nicht-axialen Schnittebene in Zahnachse, beziehungsweise parallel zur Zahnachse geschnitten wird.

Wählt man nun das Arch Section-Menü des Programms aus, erhält man eine Ansicht, bei der neben der axialen und koronalen Schnittebene gleichzeitig mehrere Cross Section-Schnitte definierter Breite angezeigt werden. Zunächst wurde in der Horizontalebene die Betrachtungsebene in mesio-distaler Richtung auf die Region des zu untersuchenden Zahnes eingestellt. So ergaben sich in der Cross-Section-Ansicht viele, zueinander parallel verlaufende Schnittebenen, mit einem Abstand von je 0,5 mm. Vor der endgültigen Messung wurde der zu untersuchende Zahn in der Cross Section Ansicht so eingestellt, dass die Schmelz-Zement-Grenze zentral des Schnittes positioniert war. Bei einer y-Achse mit einer Skala bis 40 mm wurde die horizontale Linie als Verbindung der oralen und vestibulären Schmelz-Zement-Grenze auf die Höhe von 20 mm verschoben, um eine zentrale Zahnposition zu gewährleisten. Durch die vorherige Parallelisierung der Zahnachse und der Schnittebene war es nun möglich, das vertikale Knochenangebot, indirekt als Distanz zwischen Schmelz-Zement-Grenze und marginalem Knochenrand, parallel zur Zahnachse zu messen. Im Folgenden ist der Ablauf der Messung des vertikalen Knochenangebotes am Beispiel von Zahn 15 in illustrierter Form abgebildet.

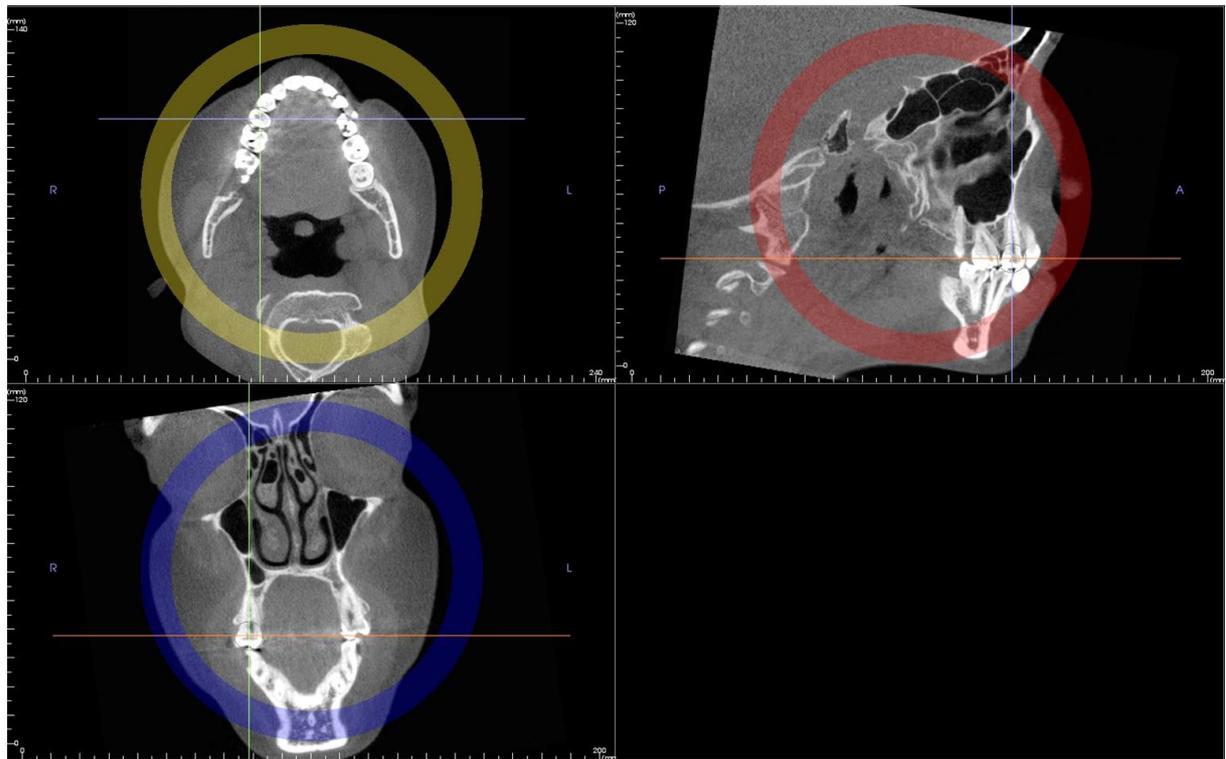


Fadenkreuz auf Zahn 15

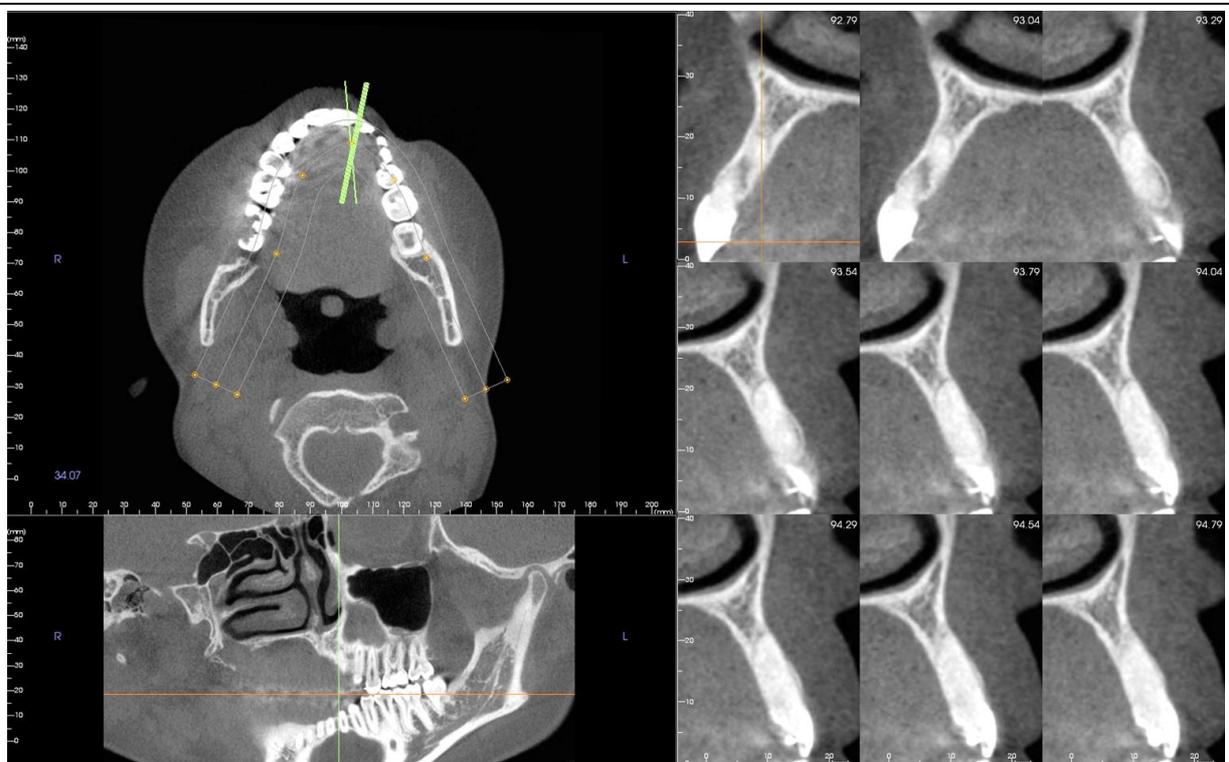


Vertikale Linie auf Zahnachse reorientieren, indem in sagittaler Ebene das DVT um

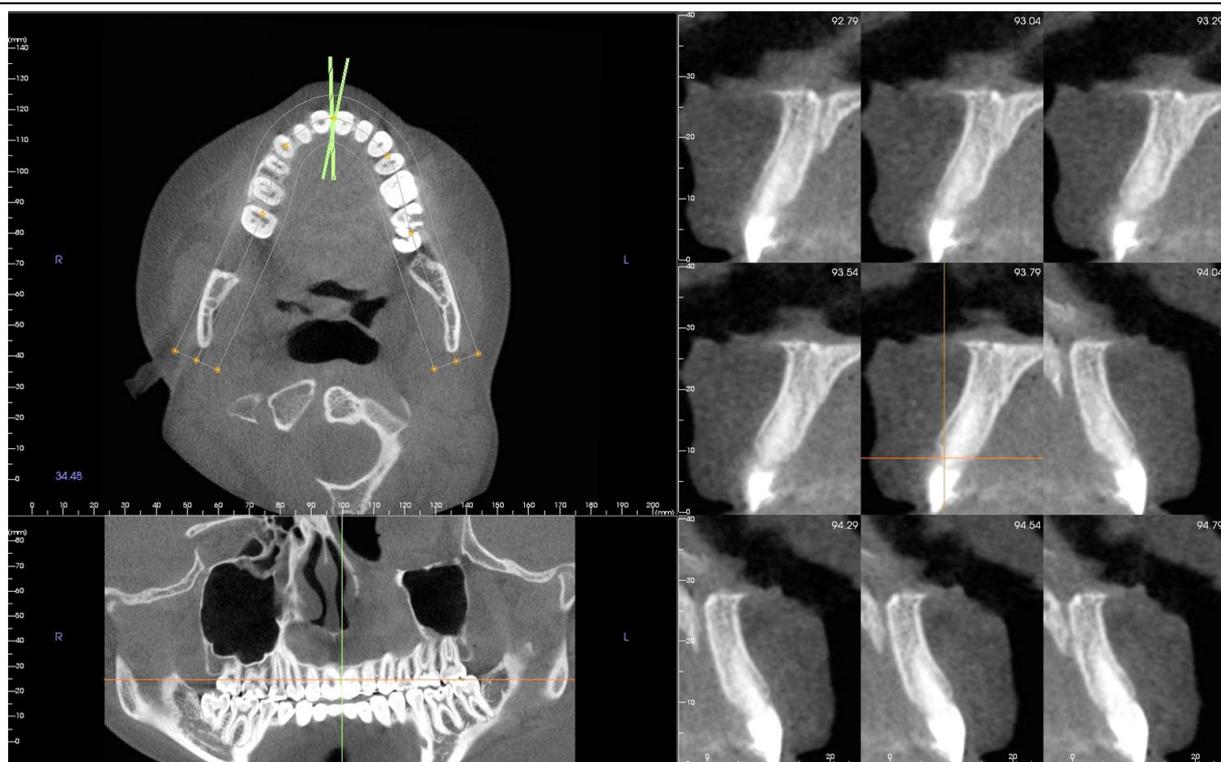
Bildmittelpunkt rotiert wird



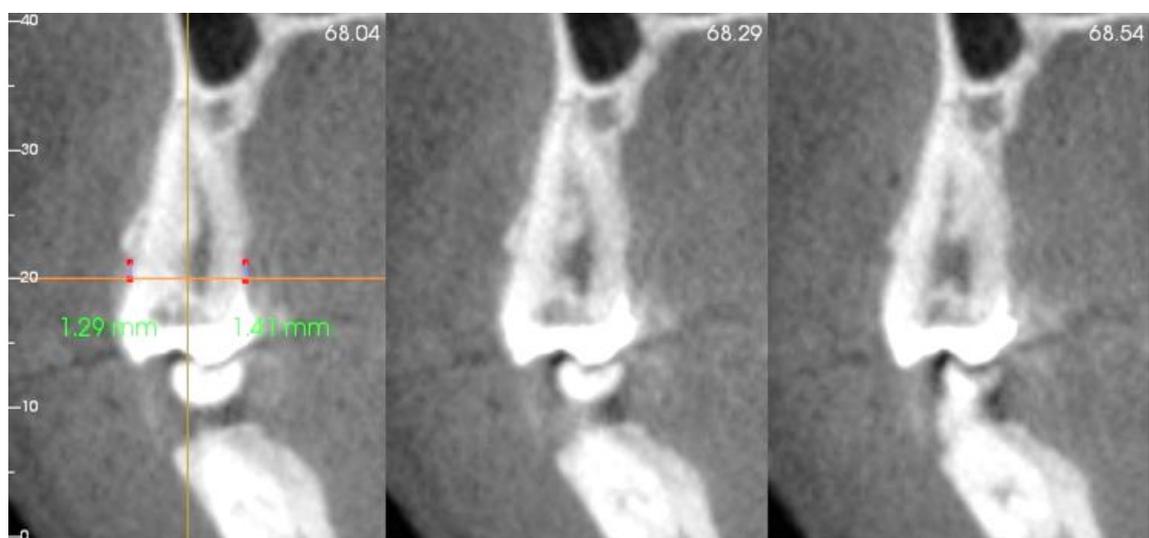
Analoges Vorgehen in koronarer Ebene → Zahnachse und Schnittebenen sowohl in Section-, als auch in Arch Section Menü parallelisiert



Arch Section Menü: Ausgangssituation



Bogenprofil auf Oberkiefer angepasst



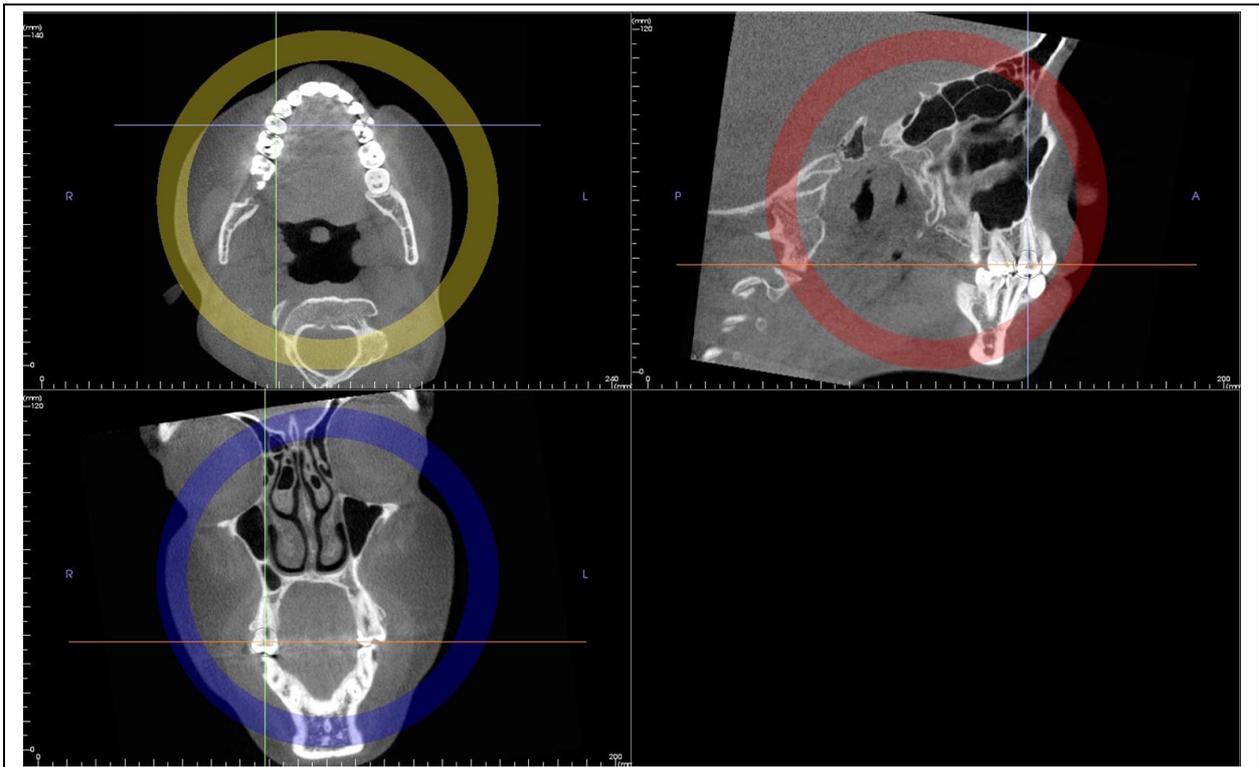
Cross Section Ansicht: Messung des Abstandes der Schmelz-Zement-Grenze zum marginalen Knochenrand oral und vestibulär

Abb. 13 bis 20: Ablauf der Messung des vertikalen Knochenangebotes am Beispiel von Zahn 15

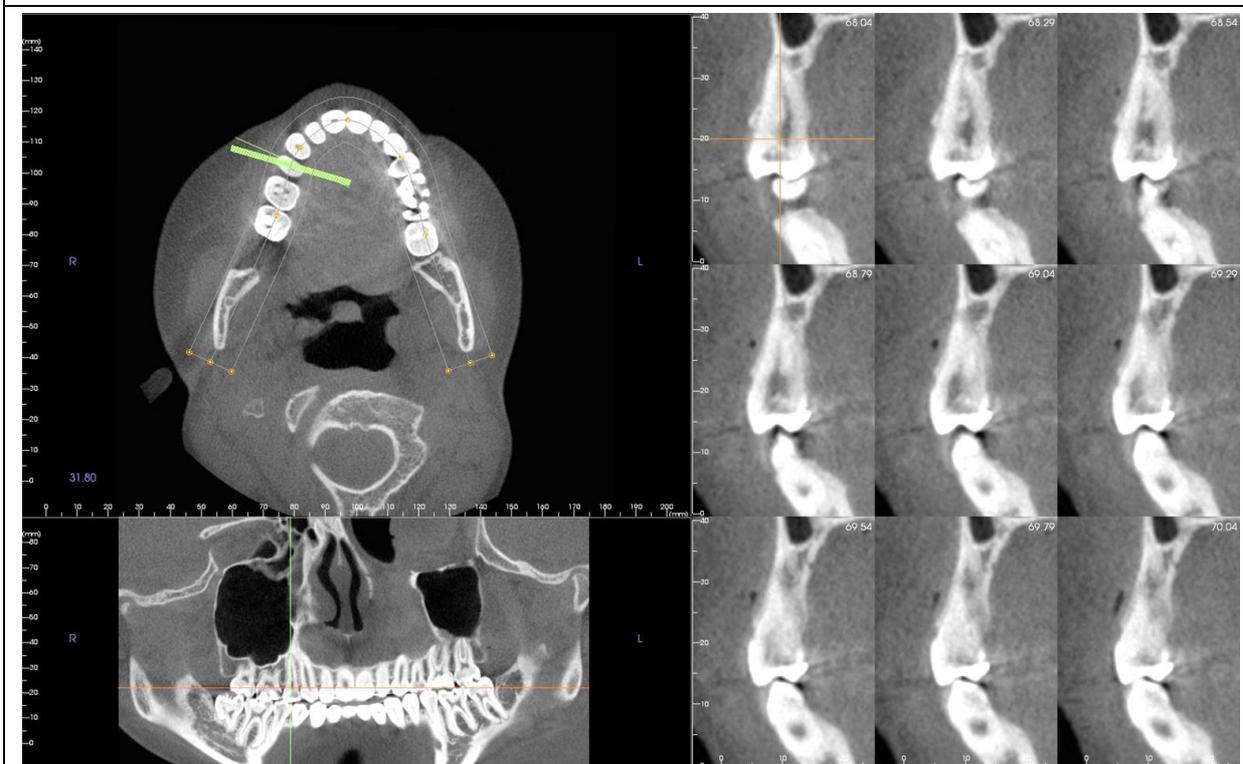
Es wurden sowohl die prä- als auch die posttherapeutischen Parameter gesondert untersucht. Zur Ermittlung der therapiebedingten Änderung wurden nichtparametrische Analysen für verbundene Stichproben durchgeführt. Insbesondere wurde der Anteil relevanter Defekttiefen im Verhältnis zur Gesamtmenge der Messstellen verifiziert. Zudem konnten deren Mittelwerte vor und nach kieferorthopädischer Therapie untersucht werden. Da die dazugehörige Signifikanzuntersuchung für verbundene Stichproben gilt, gingen all jene Zähne ein, die prä- oder posttherapeutisch eine relevante Defekttiefe aufwiesen, auch wenn der korrespondierende Wert nicht relevant war.

Transversales Knochenangebot

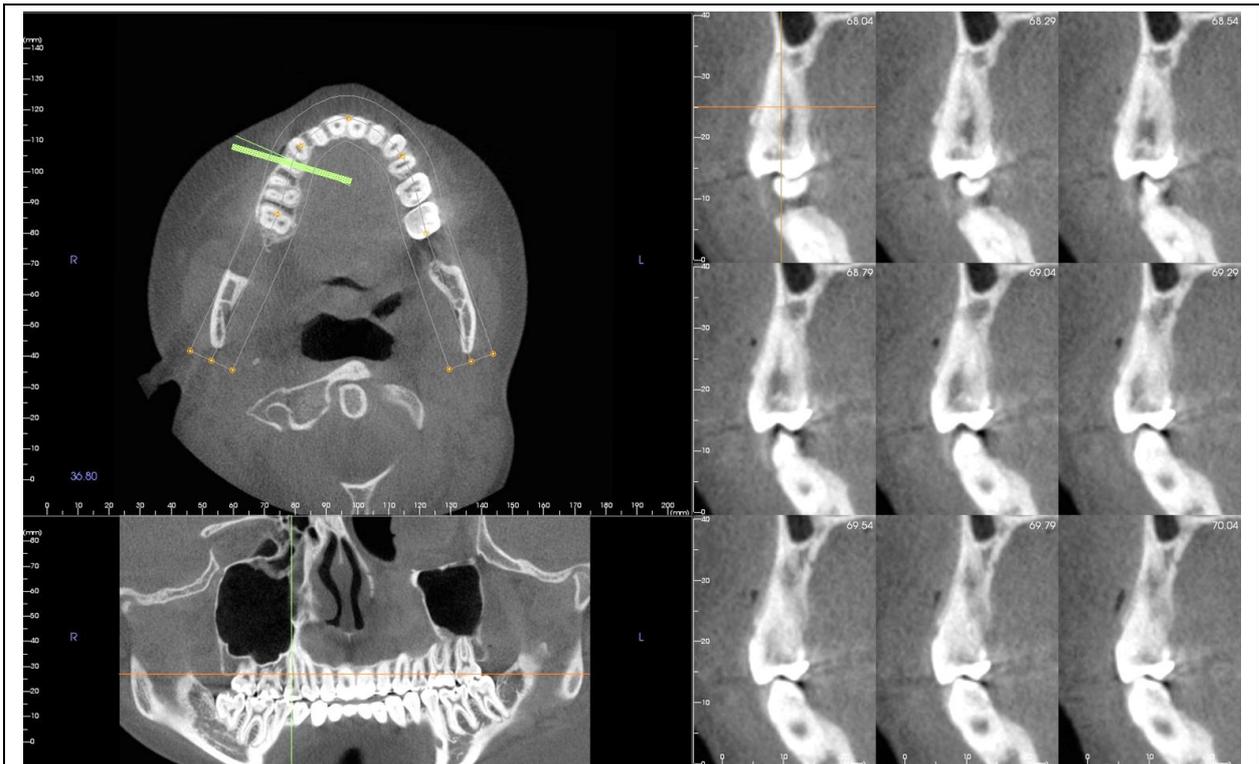
Zur Messung des transversalen Knochenangebotes wurden die Einstellungen innerhalb des Section- und Arch Section Menüs analog zu denen des vertikalen Knochenangebotes vorgenommen. Die Positionierung der Schmelz-Zement-Grenze konnten ebenfalls übernommen werden. Die horizontale Linie wurde nun 5 mm nach apikal parallelverschoben, was einer Verschiebung der betrachteten axialen Schnittebene um 5 mm entspricht. Auf dieser Höhe konnte nun der Abstand zwischen lateraler Zahnbegrenzung und lateralem Knochenrand entlang der horizontalen Linie vestibulär und oral vermessen werden. Dasselbe Vorgehen wurde 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze wiederholt, so dass pro Zahn pro DVT-Aufnahme 4 transversale Knochenbreiten auf 2 Zahnlevels erhoben wurden. Zum Zweck der Übersichtlichkeit wird die Auswertung der transversalen Parameter hinsichtlich der unterschiedlichen Abstände zur Schmelz-Zement-Grenze getrennt dargestellt. Zähne, bei denen vertikale Dehiszenzen ≥ 5 mm vorlagen, erhielten dementsprechend einen Wert von 0 mm. Ausnahmen bildeten lediglich Zähne mit Wurzellängen ≤ 10 mm. In diesem Fall gingen auf dieser Höhe keine Werte ins arithmetische Mittel ein. Im Folgenden ist der Ablauf der Messungen des horizontalen Knochenangebotes am Beispiel von Zahn 15 in illustrierter Form abgebildet.



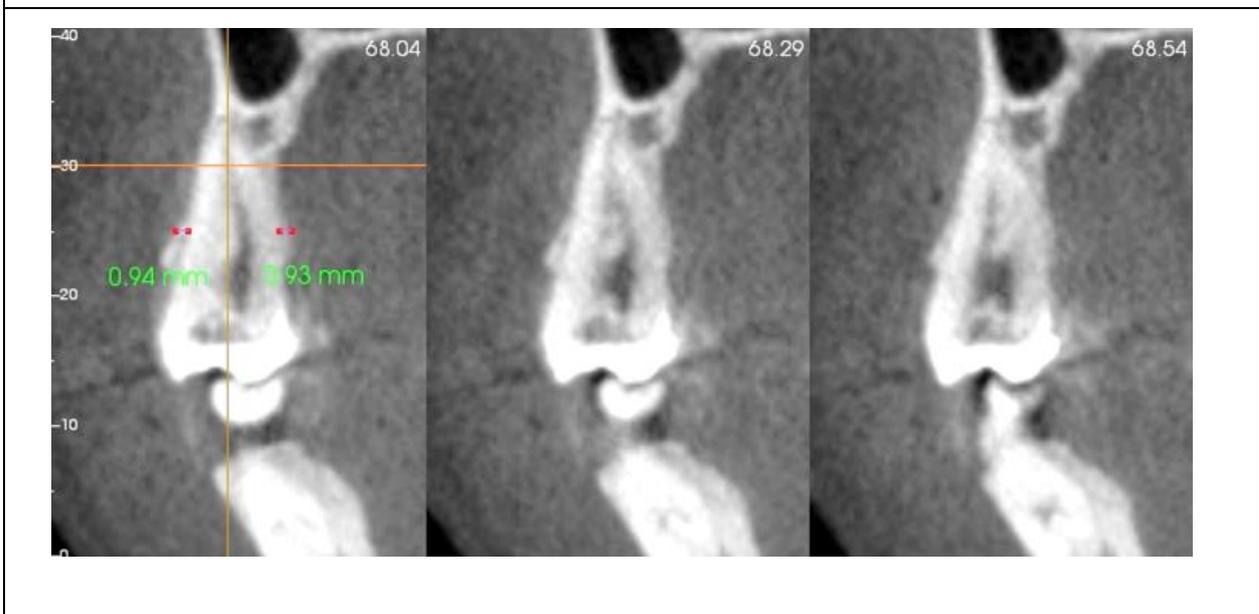
Section Menü: Zahnachse und Schnittebene analog zur vertikalen Messung parallelisiert



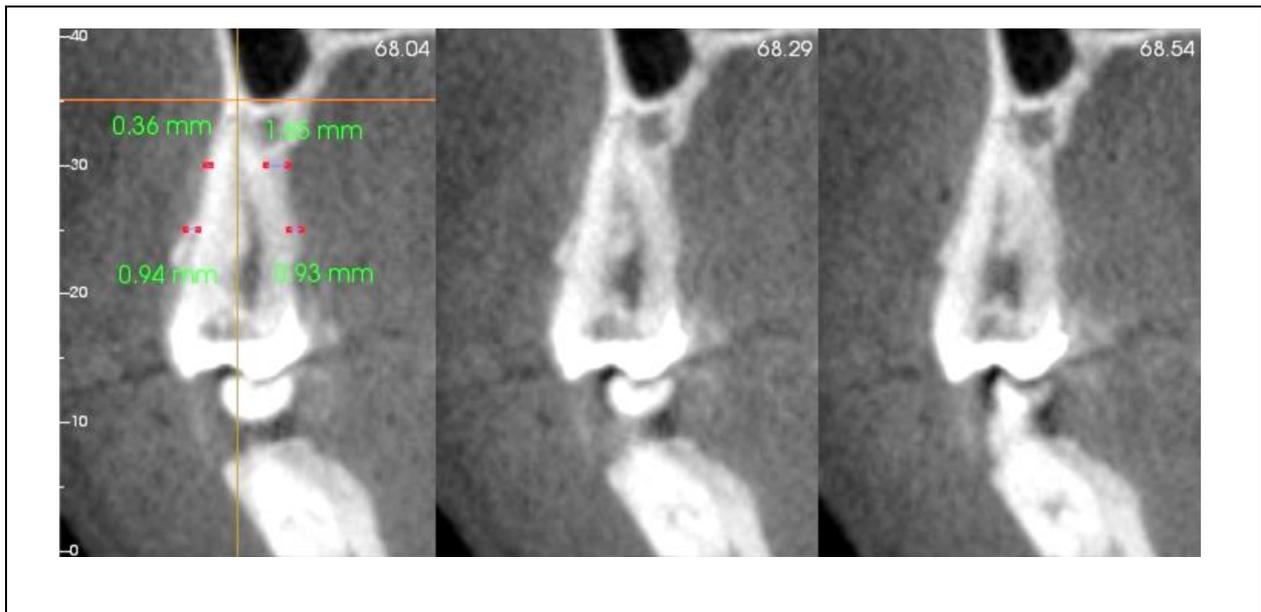
Arch Section Menü: Zahn 15 analog zur vertikalen Messung positioniert



Schmelz-Zement-Grenze 5 mm nach apikal parallelverschoben



Messung der Knochenbreite oral und vestibulär 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze entlang der horizontalen Ebenenmarkierung



Messung der Knochenbreite oral und vestibulär 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Abb. 21 bis 25: Ablauf der Messungen des horizontalen Knochenangebotes am Beispiel von Zahn 15

3.2.4. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Alter und Geschlecht

Sowohl die unterschiedlichen Alters-, als auch Geschlechtsgruppierungen wurden hinsichtlich des prätherapeutischen Knochenangebotes und der therapiebedingten Veränderungen im peridentalen Knochenangebot ausgewertet. Insgesamt wurden die Messwerte von 431 Zähnen männlicher Probanden mit 523 Zähnen weiblicher Patienten verglichen. GPower gab für den Vergleich dieser unabhängigen Stichproben und einer Effektstärke von 0,5 eine Teststärke von 1 an, $t(952)=1,96$. Analog zu 3.2.3 wurde die Änderung in den relevanten Anteilen der Defekttiefen gesondert untersucht. Die Einteilung der Altersgruppen ist dem Abschnitt „Patientengut“ zu entnehmen. Neben der deskriptiven Statistik fanden hierbei der Mann-Whitney-U-Test sowie der Kruskal-Wallis-Test Anwendung.

3.2.5. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Kiefer und Zahngruppe

Um eine Aussage bezüglich der Lokalisation der größten Veränderungen im peridentalen Knochenangebot treffen zu können, wurden beide Kiefer gesondert ausgewertet. Im Speziellen soll hierbei auf die betreffenden Zahngruppen eingegangen werden. Es wurde folgendermaßen unterschieden:

Tabelle 5: Zahngruppeneinteilung

Kiefer	Oberkiefer / Unterkiefer			
Zahngruppe	Molar	Prämolar	Eckzahn	Schneidezahn

Für jeden Zahn der jeweiligen Zahngruppe wurden die prätherapeutischen Messwerte zunächst von den posttherapeutischen Werten subtrahiert, um die Änderung des Knochenangebotes zu erhalten. Im Anschluss konnten Gruppenvergleiche durchgeführt werden.

3.2.6. Korrelation zwischen Ausgangssituation und therapeutischem Effekt

In diesem Abschnitt soll die therapiebedingte Änderung des vertikalen Knochenangebotes in Abhängigkeit von dem prätherapeutischen, vestibulären, vertikalen Knochenangebot betrachtet werden. Es stellt sich die Frage, ob sich ein bestehender vertikaler Defekt im Zuge der festsitzenden, kieferorthopädischen Therapie weniger ändert, als eine optimale knöcherne Ausgangssituation. Zu diesem Zweck wurden die untersuchten Zähne anhand ihrer prätherapeutischen, vertikalen, vestibulären Defekthöhe in 10 Gruppen eingeteilt. Die vertikale Defekthöhe definiert sich als linearer Abstand zwischen Schmelz-Zement-Grenze und marginalem Knochenrand im Bereich des größten Defektes. Die Einteilung ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 6: Einteilung prätherapeutischer Ausgangsdefekte

Gruppe	Prätherapeutische vertikale, vestibuläre Defekthöhe
1	$x < 0,5 \text{ mm}$
2	$0,5 < x < 1 \text{ mm}$
3	$1 < x < 1,5 \text{ mm}$
4	$1,5 < x < 2 \text{ mm}$
5	$2 < x < 2,5 \text{ mm}$
6	$2,5 < x < 3 \text{ mm}$
7	$3 < x < 3,5 \text{ mm}$

8	$3,5 < x < 4 \text{ mm}$
9	$4 < x < 4,5 \text{ mm}$
10	$x > 4,5 \text{ mm}$

3.2.7. Korrelation zwischen horizontalen und vertikalen Therapieeffekten

Hierbei sollte untersucht werden, ob es eine Korrelation zwischen den Änderungen im vertikalen und transversalen Knochenangebot an korrespondierenden Zähnen gibt. Zu diesem Zweck wurden die prätherapeutischen Messwerte zunächst von den posttherapeutischen Werten subtrahiert. Man erhielt die Änderung des Parameters über den Zeitraum der Bildgebungen. Anschließend konnte mittels Korrelation nach Pearson auf eventuelle Zusammenhänge untersucht werden. Da es lediglich um mögliche Zusammenhänge geht, wurde in der Wertetabelle auf das Aufführen von Quadratsummen und Kreuzprodukten verzichtet. Außerdem wurden die Kovarianzen nicht aufgenommen, da sie bereits in der Pearson-Korrelation enthalten sind. Für signifikante Korrelationen wurden Streudiagramme angefertigt.

3.2.8. Korrelation zwischen therapeutischer Zahnbewegung und Therapieeffekten

Zunächst wurde eine explorative Datenanalyse durchgeführt um daraufhin mittels eines T-Tests auf signifikante Unterschiede innerhalb der verschiedenen Gruppen zu prüfen. Anschließend konnten Untersuchungen über mögliche Zusammenhänge zwischen kieferorthopädischer Änderung der vestibulo-oralen Inklination eines Zahnes und der Änderung des peridentalen Knochenangebotes durchgeführt werden. Als Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs wurden Pearson-Korrelationen verwandt. Da es wie bereits in 3.2.7. um mögliche Verknüpfungen ging, wurde auch hier auf das Aufführen von Quadratsummen und Kreuzprodukten verzichtet. Auch Kovarianzen wurden nicht aufgenommen.

4. Ergebnisse

4.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Parameter

Für die verwendeten Parameter konnte eine sehr hohe intraindividuelle Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden. Der Methodenfehler maß hinsichtlich der Inklination messung weniger als 0,1, hinsichtlich der Parameter des peridentalen Knochenangebotes weniger als 0,01.

Der Zuverlässigkeitskoeffizient belegte für alle drei Parameter eine hervorragende Reliabilität. Die ermittelten Standardfehler, Standardabweichungen, Varianzen sowie die Variationskoeffizienten können der Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Tabellarische Zusammenstellung, der für die Fehlerbetrachtung gängigen Parameter.

Alle verwendeten Messparameter wiesen eine sehr hohe intraindividuelle Reproduzierbarkeit auf.

N= Stichprobenanzahl

	Vertikale Knochen- dehiszenz (N=300)	Transversale Kno- chenbreite (N=300)	Inklination (N=300)
Mittlerer Standard- fehler	0,08 mm	0,079 mm	0,33°
Mittlere Stan- dardabweichung	0,2 mm	0,19 mm	0,82°
Mittlere Varianz	0,046 mm ²	0,041 mm ²	0,81° ²
Mittlerer, empiri- scher Variationsko- effizient	0,21	0,16	0,011
Methodenfehler nach Dahlberg	0,00381793	0,00344068	0,06747333
Zuverlässigkeitsko- effizient nach Hous- ton	0,99833351	0,998333	0,99833333

Die Nullhypothese „Knochendehiszenzen, Knochenbreiten und Zahninklinationen können im DVT-Datensatz intraindividuell reproduzierbar vermessen werden“ konnte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden.

4.2. Ausmaß der therapeutischen Inklinationsänderung

Die Neigung der Zähne zur Referenzebene änderte sich über den Zeitraum der Therapie signifikant um $0,8^\circ \pm 5,6^\circ$.

Die Nullhypothese „Durch kieferorthopädische Maßnahmen wird die vestibulo-orale Inklination der Zähne zur Okklusionsebene signifikant verändert“ konnte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden.

4.3. Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderungen

Vertikales Knochenangebot

Das Ausmaß des vertikalen Knochenangebotes verkleinerte sich über den Zeitraum der Therapie sowohl vestibulär als auch oral signifikant.

Die mittlere therapiebedingte Änderung der vestibulären Dehiszenztiefe betrug $+0,82 \pm 1,47$ mm. Bei 79,6 % der untersuchten Zähne vergrößerte sich die Defekttiefe. Nur bei 15,7 % konnte eine therapiebedingte Vergrößerung des vertikalen Knochenangebotes festgestellt werden.

Die orale Defekttiefe vergrößerte sich über den Zeitraum der Therapie im Mittel um $+0,57 \pm 0,79$ mm. Eine Vergrößerung der oralen Defekttiefe trat bei 79,4 % der Zähne ein, wohingegen sich die vertikale Knochenhöhe nur in 12,9 % der Fälle vergrößerte.

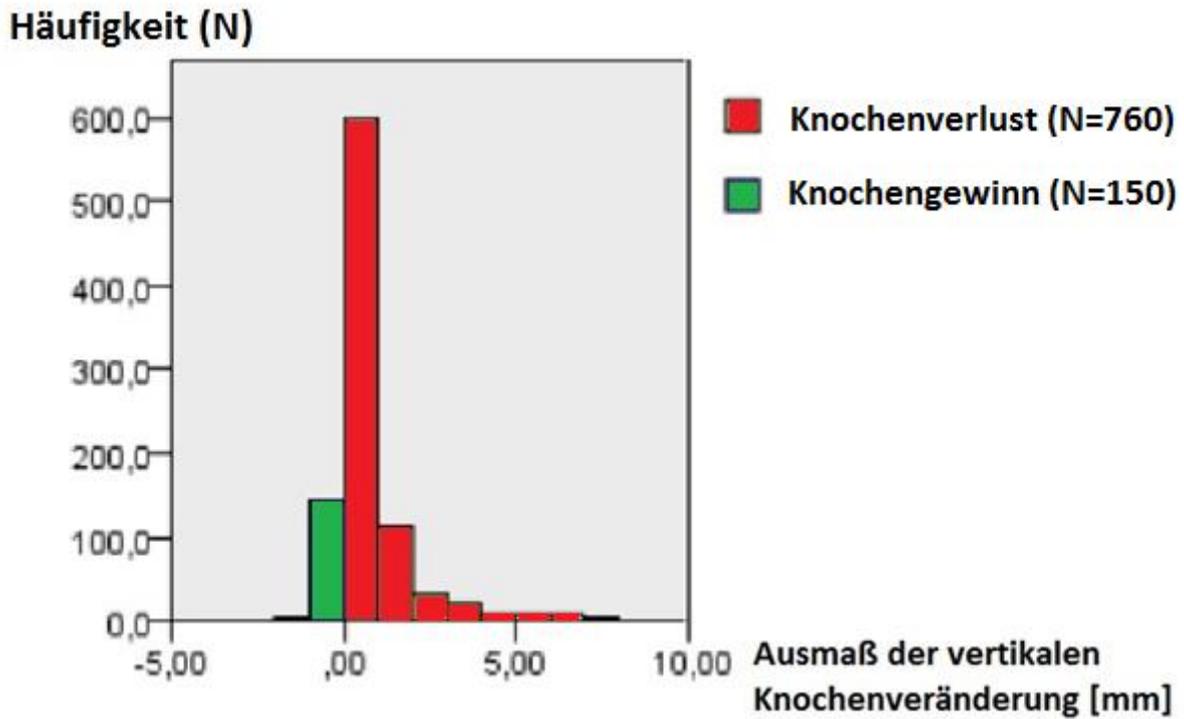


Abb. 26: Häufigkeitsverteilung der unterschiedlich gerichteten Ausprägungen therapiebedingter Änderungen in den vestibulären Defekttiefen. Bei der überwiegenden Mehrheit der Patienten kam es zu einer leichten Vergrößerung der vestibulären Defekttiefen. N= Stichprobenanzahl

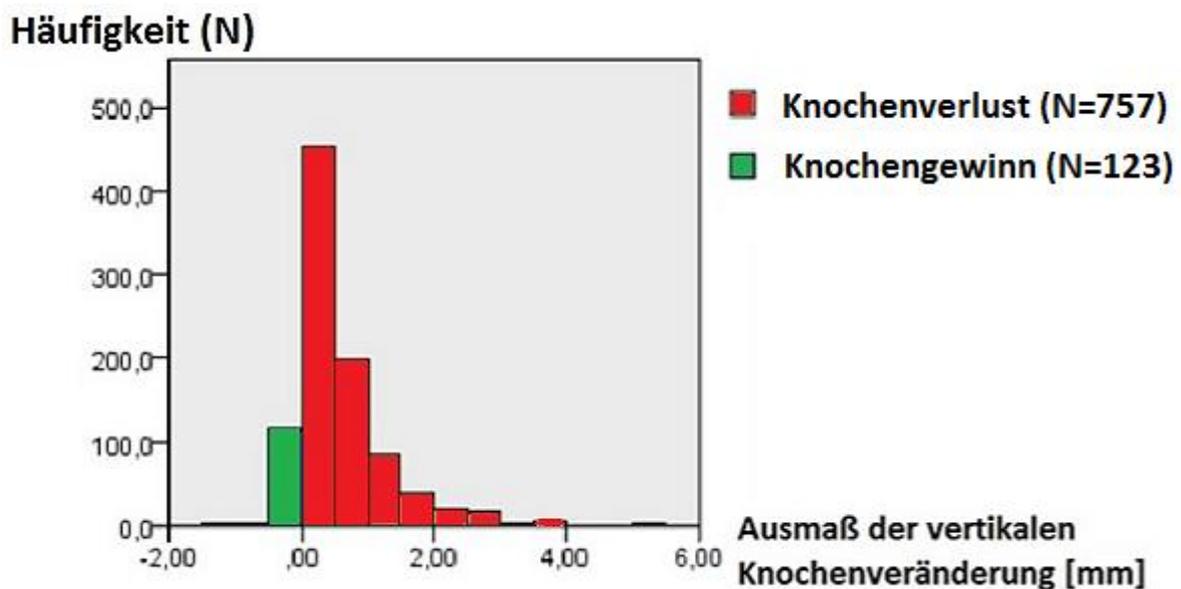


Abb. 27: Häufigkeitsverteilung der unterschiedlich gerichteten Ausprägungen therapiebedingter Änderungen in den oralen Defekttiefen.
 Bei der überwiegenden Mehrheit der Patienten kam es zu einer leichten Vergrößerung der oralen Defekttiefen.
 N= Stichprobenanzahl

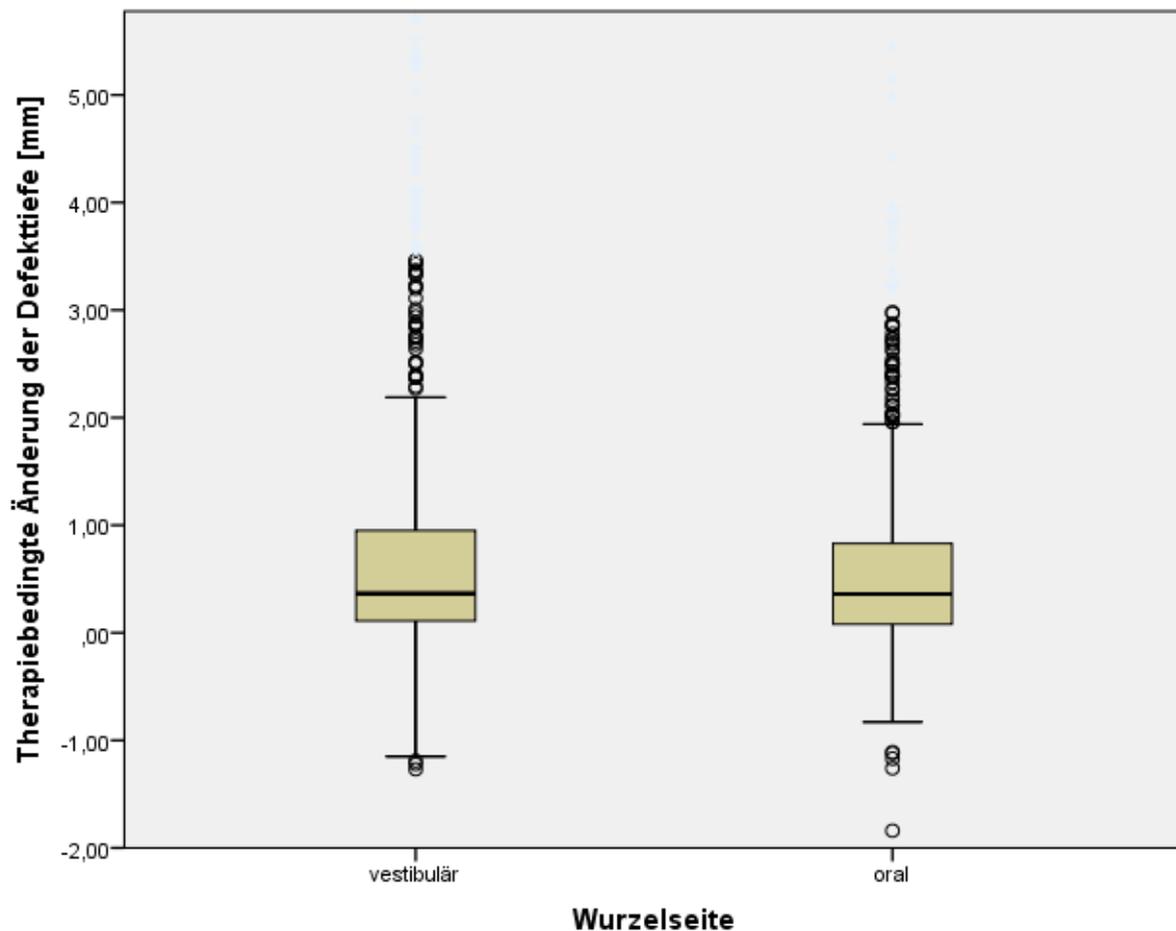


Abb. 28: Vergleich des therapiebedingten vertikalen Knochenverlustes vestibulär und oral.
 Das Ausmaß des therapiebedingten vertikalen Knochenverlustes unterschied sich zwischen der vestibulären und oralen Wurzelseite nicht signifikant.

Im Folgenden sollte die Entwicklung klinisch relevanter Defekttiefen untersucht werden. Der Anteil jener Defekttiefen mit einer Ausprägung ≥ 2 mm erhöhte sich über den Zeitraum der Therapie auf der vestibulären Seite von 28,62 % auf 45,49 %.

Auf der oralen Seite vergrößerte sich der Anteil klinisch relevanter Defekttiefen von 18,24 % auf 32,39 %.

Transversales Knochenangebot

Über den Zeitraum der Therapie kam es in allen Parametern des transversalen Knochenangebotes zu einer signifikanten Verkleinerung der Knochenbreite.

5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Vestibulär veränderte sich die Knochenbreite signifikant um $-0,24 \pm 0,47$ mm, $p < 0,001$.

Oral verminderte sich das transversale Knochenangebot über den Zeitraum der Therapie signifikant um $-0,33 \pm 0,57$ mm, $p < 0,001$. Oral und vestibulär unterschieden sich die therapiebedingten Knochenverluste dabei nicht signifikant, $p = 0,918$.

10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Das transversale Knochenangebot verminderte sich vestibulär signifikant um $-0,29 \pm 0,78$ mm.

Oral veränderte sich das Knochenangebot signifikant um $-0,4 \pm 0,78$ mm. Diese Verminderung war signifikant größer als an allen weiteren Messstellen des transversalen Knochenangebotes, $p < 0,001$ bis $p = 0,048$.

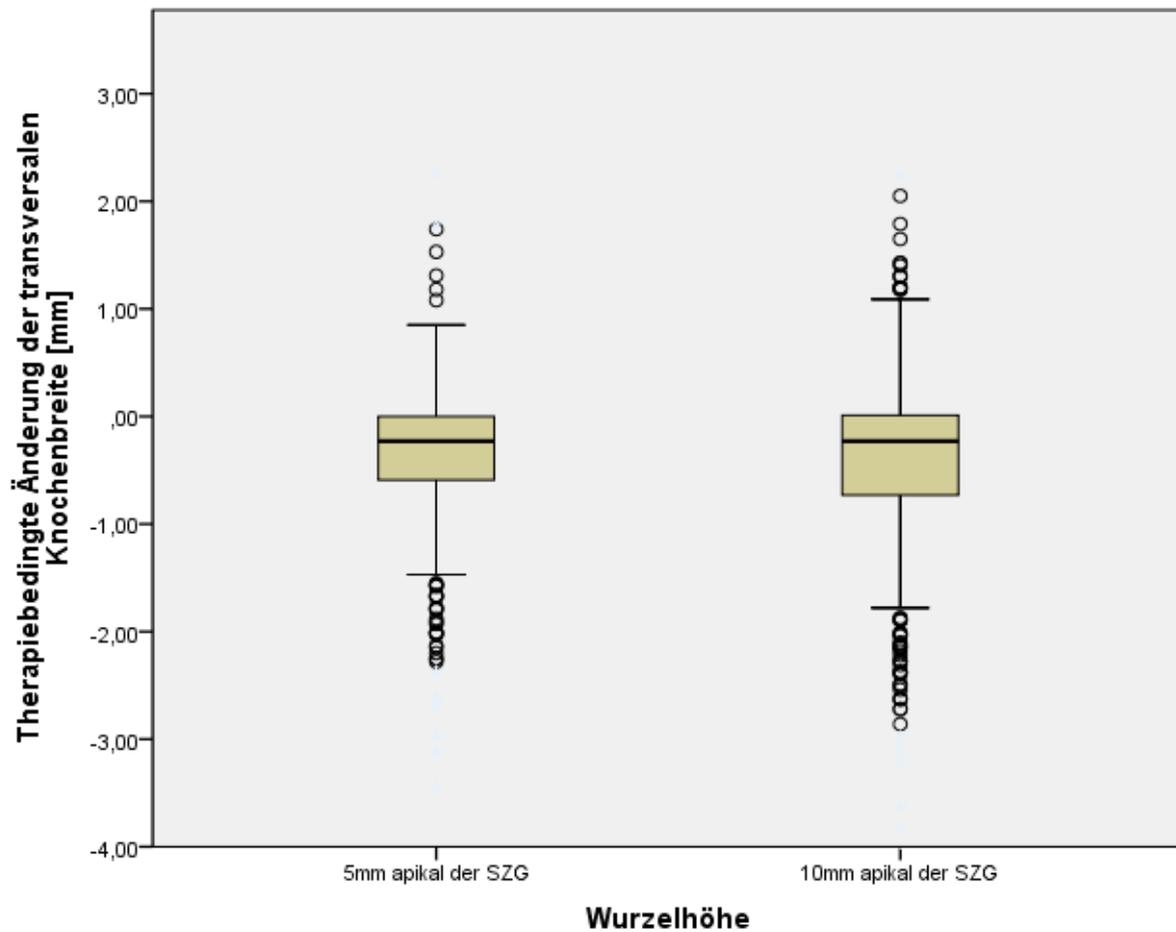


Abb. 29: Therapiebedingte Veränderung in der oralen Knochenbreite.
 Im oralen apikalen Bereich trat ein vergleichsweise größerer transversaler Knochenverlust auf.
 SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Die Nullhypothese „Das peridentale Knochenangebot wird durch kieferorthopädische Behandlungsmaßnahmen signifikant verändert“ konnte aufgrund der vorliegende Ergebnisse bestätigt werden.

4.4. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Alter und Geschlecht

Geschlecht

Vertikales Knochenangebot

Das vestibuläre Knochenangebot unterschied sich zwischen den Geschlechtern weder prä- oder posttherapeutisch, noch in der therapiebedingten Änderung signifikant.

Analog zu den geschlechtsunabhängigen Ergebnissen bestand auch geschlechtsspezifisch ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten vor und nach der kieferorthopädischen Therapie, $p < 0,001$.

Im Folgenden sollten die beiden Geschlechter hinsichtlich der Entwicklung klinisch relevanter Defekttiefen untersucht werden.

Bei den männlichen Patienten vergrößerte sich der Anteil der relevanten Defekttiefen auf der vestibulären Seite um 15,08 %, wohingegen er bei den weiblichen Probanden um 18,26 % anstieg. Posttherapeutisch wiesen 47,33 % der Zähne männlicher und 43,98 % der Zähne weiblicher Probanden relevante, vestibuläre Defekttiefen auf. Auf der oralen Seite vergrößerte sich der Anteil im männlichen Patientengut um 14,39 %, beim weiblichen Patientengut um 13,89 %. Posttherapeutische, relevante, orale Defekttiefen traten im Vergleich zur vestibulären Seite an 14,38 % weniger Zähnen bei Männern und 12,05 % weniger Messstellen bei weiblichen Probanden auf. Eine Übersicht der prozentualen Verteilung sowie der Mittelwerte und Standardabweichungen kann den Tabellen 8 und 9 entnommen werden.

Tabelle 8: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der vestibulären relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Geschlechter.

Die männlichen Patienten wiesen mehr relevante vestibuläre Defekttiefen auf, die sich zudem um ein größeres Maß therapiebedingt vertieften.

Relevant: Defekttiefe < 2 mm; T1: prätherapeutisch, T2: posttherapeutisch;

N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N_{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] \pm Standardabweichung [mm]		Signifikanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
männlich	139	204	32,25	47,33	4,1 \pm 2,46	4,71 \pm 3,03	<0,001
weiblich	134	230	25,72	43,98	4,27 \pm 2,08	4,4 \pm 2,38	<0,001

Tabelle 9: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der oralen relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Geschlechter.

Obwohl sich der Anteil relevanter Defekttiefen auf der oralen Seite hinsichtlich der Geschlechter nicht unterschied, nahm ihr Mittelwert bei den weiblichen Patienten therapiebedingt ab.

Relevant: Defekttiefe <2 mm; T1: prätherapeutisch, T2: posttherapeutisch; N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N _{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] ± Standardabweichung [mm]		Signifikanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
männlich	80	142	18,56	32,95	3,22±1,57	3,48±1,79	<0,001
weiblich	94	167	18,04	31,93	3,79±1,83	3,69±1,76	<0,001

Transversales Knochenangebot

Hinsichtlich der therapiebedingten Änderung in der Knochenbreite waren bis auf den apikalen oralen Bereich keine Unterschiede hinsichtlich der Geschlechter feststellbar.

5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Zwischen den Geschlechtern war kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der therapiebedingten Änderung des transversalen Knochenangebotes auf diesem Zahnlevel nachweisbar. Das männliche Patientengut wies posttherapeutisch breitere vestibuläre Knochenlamellen auf als die weiblichen Probanden, $p=0,006$.

10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Die therapiebedingte Änderung der oralen Knochenbreite unterschied sich auf diesem Zahnlevel signifikant zwischen den Geschlechtern, $p=0,036$. Bei den männlichen Patienten fiel der Verlust an transversalem Knochen mit $-0,32\pm 0,71$ mm geringer aus als im weiblichen Probandenanteil, in dem ein mittlerer Verlust von $-0,51\pm 0,85$ mm festzustellen war, $p=0,036$. Posttherapeutisch wiesen die männlichen Probanden außerdem eine signifikant breitere, vestibuläre Knochenlamelle auf als die Frauen, $p=0,031$. Dennoch war kein diesbezüglicher Unterschied der therapiebedingten Änderungen auf der vestibulären Seite festzustellen, $p=0,368$. Analog zur vestibulären Seite war im männlichen Patientengut, posttherapeutisch eine signifikant breitere orale Knochenlamelle auszu-

machen, $p=0,025$. Eine Auflistung der Messwerte und dazugehöriger Standardabweichungen kann der Tabelle 10 entnommen werden.

Tabelle 10: Tabellarische Zusammenstellung der Parameter des transversalen Knochenangebotes in ihren geschlechtsspezifischen Ausprägungen.

Das männliche Patientengut wies mit einigen Ausnahmen breitere Knochenlamellen auf, die sich aber im therapiebedingten Knochenverlust nicht von den Werten der weiblichen Probanden unterschieden.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Transversale Knochenbreite	Geschlecht	Prä-therapeutisch	Post-therapeutisch	Signifikanz*	Therapiebedingte Änderung
Vestibulär, 5 mm apikal der SZG	männlich	1,03±0,8 mm	0,82±0,67 mm	<0,001	-0,2±0,5 mm
	weiblich	0,98±0,79 mm	0,7±0,68 mm	<0,001	-0,28±0,44 mm
Signifikanz**		0,415	0,006		0,183
Oral, 5 mm apikal der SZG	männlich	1,84±0,97 mm	1,53±0,9 mm	<0,001	-0,31±0,58 mm
	weiblich	1,79±1,03 mm	1,47±0,97 mm	<0,001	-0,32±0,55 mm
Signifikanz**		0,576	0,149		0,926
Vestibulär, 10 mm apikal der SZG	männlich	1,94±1,51 mm	1,64±1,35 mm	<0,001	-0,29±0,83 mm
	weiblich	1,74±1,35 mm	1,44±1,16 mm	<0,001	-0,3±0,76 mm
Signifikanz**		0,062	0,031		0,368
Oral, 10 mm apikal der SZG	männlich	3,31±1,65 mm	2,99±1,54 mm	<0,001	-0,32±0,71 mm
	weiblich	3,31±1,89 mm	2,8±1,65 mm	<0,001	-0,51±0,85 mm
Signifikanz**		0,522	0,025		0,036
* Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über den Therapiezeitraum					
** Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über die Kategorien der Geschlechter					

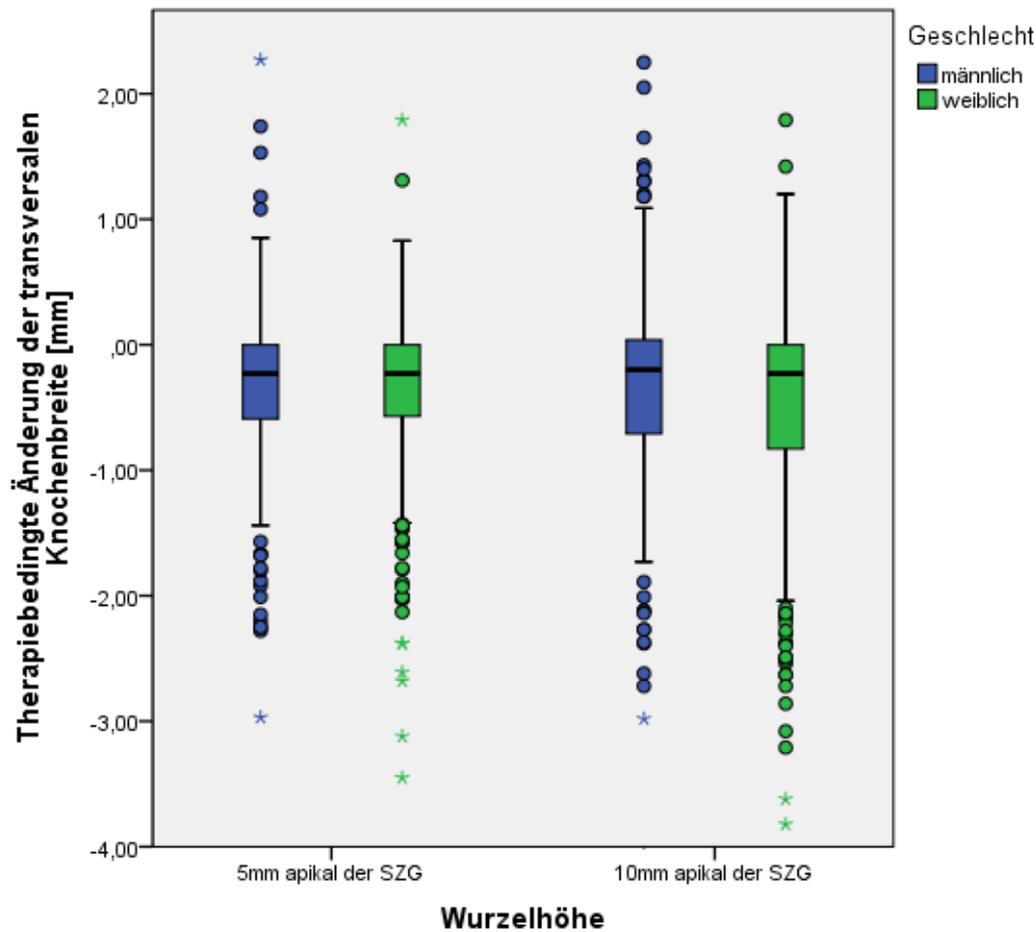


Abb. 30: Geschlechtervergleich des therapiebedingten oralen transversalen Knochenverlustes.

Im apikalen Bereich der oralen Knochenbedeckung wiesen die weiblichen Patienten einen größeren transversalen Knochenverlust auf.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Alter

Vertikales Knochenangebot

Zwischen den Altersgruppen existierten sowohl in der prätherapeutischen, als auch in der posttherapeutischen, vestibulären Defekttiefe signifikante Unterschiede, wohingegen kein solcher Unterschied in der dazugehörigen therapiebedingten Änderung festgestellt werden konnte. Allerdings wiesen die Altersgruppen signifikante Unterschiede hinsichtlich der therapiebedingten Änderung in der oralen Defekttiefe auf, $p < 0,001$. Bei den >30 -Jährigen war die Vergrößerung der oralen Defekttiefe signifikant größer als in Altersgruppe 1 ($p = 0,003$) und Altersgruppe 2 ($p < 0,001$), welche sich untereinander nicht unterschieden. Es wurden therapiebedingte Vergrößerungen der Defekttiefen zwi-

schen 0,5 mm und 0,7 mm gemessen. Außerdem vergrößerten sich die vestibulären und oralen Defekttiefen über den Zeitraum der Therapie in allen Altersgruppen signifikant, jeweils $p < 0,001$.

Die vertikale Knochenhöhe war zu beiden Messzeitpunkten sowohl vestibulär als auch oral in Altersgruppe 1 signifikant kleiner als in Altersgruppe 2 und 3, wobei sie in Altersgruppe 3 wiederum signifikant größer war als in Altersgruppe 1 und 2.

Eine Zusammenstellung der erhobenen Daten kann der Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11: Tabellarische Zusammenstellung des Ausmaßes der Defekttiefen und deren Zusammenhänge hinsichtlich der altersspezifischen Ausprägungen. Bei älteren Patienten wurden sowohl prä- als auch posttherapeutisch tiefere vertikale Defekttiefen gemessen.

Altersgruppen	Mittlere Defekttiefe vestibulär [mm]			Mittlere Defekttiefe oral [mm]		
	prä-therapeutisch	post-therapeutisch	therapiebedingte Änderung	prä-therapeutisch	post-therapeutisch	therapiebedingte Änderung
10 - 15 Jahre	1,25±1,71	1,99±2,23	0,7±0,08	0,64±0,75	1,18±1,08	0,5±0,05
15 - 30 Jahre	1,84±1,94	2,53±2,24	0,7±0,06	1,26±1,47	1,73±1,69	0,5±0,04
>30 Jahre	2,35±2,08	3,38±2,92	1±0,1	1,88±1,40	2,6±1,63	0,7±0,05
Signifikanz*	<0,001	<0,001	0,059	<0,001	<0,001	<0,001
* Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über die Kategorien der Altersgruppen						

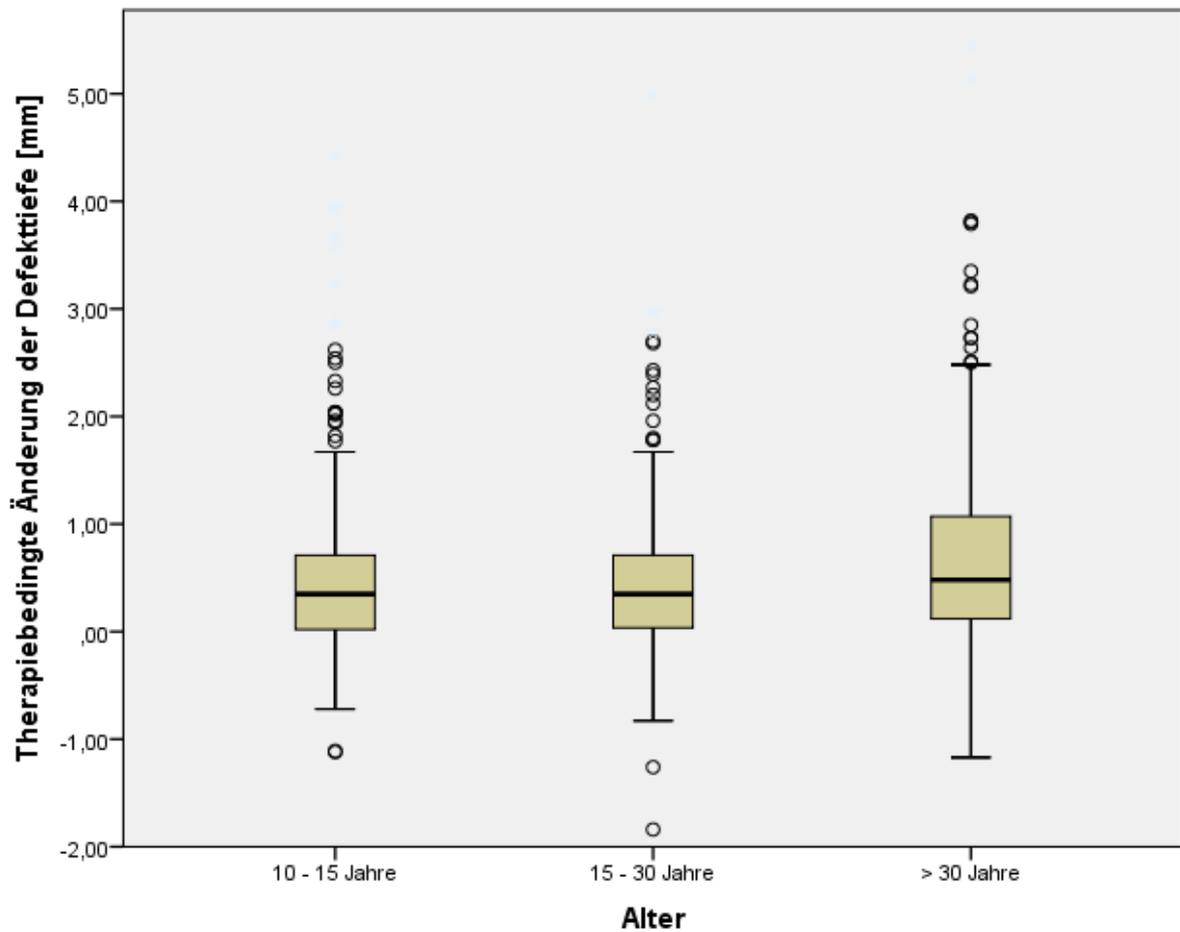


Abb. 31: Altersvergleich des therapiebedingten oralen vertikalen Knochenverlustes.

Bei den >30-jährigen Patienten war im Vergleich zu den anderen Altersgruppen ein erhöhter vertikaler Knochenverlust auf der oralen Zahnseite nachweisbar.

Im Folgenden sollten die unterschiedlichen Altersgruppen auf die Entwicklung klinisch relevanter Defekttiefen untersucht werden.

Ältere Probanden wiesen sowohl prä- als auch posttherapeutisch mehr relevante Defekttiefen auf. Innerhalb derselben Altersgruppe vergrößerte sich der Anteil relevanter Defekttiefen außerdem um einen Wert im zweistelligen Prozentbereich, der bei älteren Patienten größer ausfiel als bei Jüngeren.

Eine Auflistung der Messwerte und dazugehöriger Standardabweichungen kann den Tabellen 12 und 13 entnommen werden.

Tabelle 12: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der vestibulären relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Altersgruppen.

Die älteren Probanden wiesen mehr relevante vestibuläre Defekttiefen auf, wobei der Mittelwert in dieser Gruppe geringer war als bei jüngeren Patienten.

Relevant: Defekttiefe ≥ 2 mm; T1: prätherapeutisch, T2: posttherapeutisch; N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N _{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] \pm Standardabweichung [mm]		Signifikanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
10-15-Jährige	37	74	13,55	27,11	5,05 \pm 1,91	4,96 \pm 2,38	<0,001
15-30-Jährige	99	158	26,68	42,59	4,32 \pm 2,27	4,41 \pm 2,32	<0,001
>30-Jährige	137	202	44,19	65,16	3,86 \pm 2,32	4,49 \pm 3,07	<0,001

Tabelle 13: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der oralen relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Altersgruppen.

Die älteren Probanden wiesen mehr relevante orale Defekttiefen auf, wobei der Mittelwert in dieser Gruppe geringer war als bei jüngeren Patienten.

Relevant: Defekttiefe ≥ 2 mm; T1: prätherapeutisch, T2: posttherapeutisch; N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N _{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] \pm Standardabweichung [mm]		Signifikanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
10-15-Jährige	7	40	2,56	14,65	4,2 \pm 1,7	3,3 \pm 1,25	<0,001
15-30-Jährige	56	94	15,09	25,34	3,87 \pm 2,29	3,77 \pm 2,27	<0,001
>30-Jährige	111	175	35,81	56,45	3,31 \pm 1,34	3,56 \pm 1,56	<0,001

Transversales Knochenangebot

Das transversale Knochenangebot verringerte sich über den Zeitraum der Therapie in allen Altersgruppen signifikant. Dieser Verlust der Knochenbreite war bei den 10- bis 15-Jährigen signifikant größer als bei den älteren Patienten.

5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

In der Altersgruppe der 15- bis 30-Jährigen fiel der therapiebedingte vestibuläre Knochenverlust geringer aus als in Altersgruppe 1, $p=0,001$. Bei den >30-Jährigen betrug die vestibuläre Knochenbreite vor der kieferorthopädischen Therapie 0,84 mm und war damit signifikant kleiner als in Altersgruppe 1 ($p<0,001$) und 2 ($p=0,011$). Die posttherapeutische, vestibuläre Knochenbreite war dabei signifikant kleiner als bei den 15- bis 30-Jährigen ($p=0,02$), unterschied sich aber nicht von den 10- bis 15-Jährigen ($p=0,131$). Der Verlust der Knochenbreite war in Altersgruppe 1 signifikant größer als in Altersgruppe 2 ($p=0,001$) und Altersgruppe 3 ($p=0,017$).

Der orale therapiebedingte Knochenverlust fiel in Altersgruppe 2 signifikant geringer aus als in Altersgruppe 1, $p=0,001$. Die therapiebedingte Änderung der vestibulären Knochenbreite unterschied sich jedoch nicht signifikant von der oralen Wurzelseite, $p=0,241$. Die therapiebedingte Änderung des oralen Knochenangebotes war in Altersgruppe 3 zudem signifikant kleiner als bei den 10- bis 15-Jährigen ($p=0,003$), unterschied sich allerdings nicht signifikant von derjenigen der 15- bis 30-Jährigen ($p=0,835$) sowie dem dazugehörigen Wert auf der vestibulären Seite, $p=0,116$.

10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Die therapiebedingte Änderung der vestibulären Knochenbreite war in Altersgruppe 2 signifikant geringer als in Altersgruppe 1, $p<0,001$. Sie war in Altersgruppe 3 signifikant kleiner als in Altersgruppe 1 ($p<0,001$), unterschied sich aber im Vergleich zu Altersgruppe 2 nicht signifikant, $p=0,562$.

Obwohl sich der therapiebedingte Verlust der oralen Knochenbreite nicht signifikant zwischen den Altersgruppen ($p=0,108$) unterschied, war er signifikant größer als vestibulär ($p<0,001$).

Eine Übersicht der Messwerte und Standardabweichungen kann der Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Tabellarische Zusammenstellung der Parameter des transversalen Knochenangebotes in ihren altersspezifischen Ausprägungen.

Bei jüngeren Patienten waren vor allem vor der kieferorthopädischen Therapie breitere Knochenlamellen nachweisbar, wobei gleichzeitig größere therapiebedingte Verluste auftraten.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Transversale Knochenbreite	Alter [Jahre]	Prä-therapeutisch	Post-therapeutisch	Signifikanz*	Therapiebedingte Änderung
Vestibulär, 5 mm apikal der SZG	10 bis 15	1,16±0,88 mm	0,81±0,75 mm	<0,001	-0,35±0,54 mm
	15 bis 30	1,02±0,83 mm	0,80±0,72 mm	<0,001	-0,21±0,4 mm
	>30	0,84±0,62 mm	0,66±0,54 mm	<0,001	-0,19±0,48 mm
Signifikanz**		<0,001	0,019		0,001
Oral, 5 mm apikal der SZG	10 bis 15	1,98±0,93 mm	1,51±0,8 mm	<0,001	-0,47±0,65 mm
	15 bis 30	1,86±1,04 mm	1,61±1 mm	<0,001	-0,25±0,48 mm
	>30	1,62±0,98 mm	1,35±0,95 mm	<0,001	-0,28±0,56 mm
Signifikanz**		<0,001	<0,001		<0,001
Vestibulär, 10 mm apikal der SZG	10 bis 15	2,44±1,50 mm	1,72±1,17 mm	<0,001	-0,71±0,97 mm
	15 bis 30	1,91±1,5 mm	1,72±1,44 mm	<0,001	-0,19±0,65 mm
	>30	1,24±0,97 mm	1,16±0,98 mm	<0,001	-0,08±0,64 mm
Signifikanz**		<0,001	<0,001		<0,001
Oral, 10mm apikal der SZG	10 bis 15	3,27±1,77 mm	2,78±1,58 mm	<0,001	-0,49±0,83 mm
	15 bis 30	3,45±1,69 mm	3,03±1,59 mm	<0,001	-0,42±0,71 mm
	>30	3,17±1,89 mm	2,80±1,63 mm	<0,001	-0,36±0,85 mm
Signifikanz**		0,015	0,030		0,108
* Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über den Therapiezeitraum					
** Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über die Kategorien des Alters					

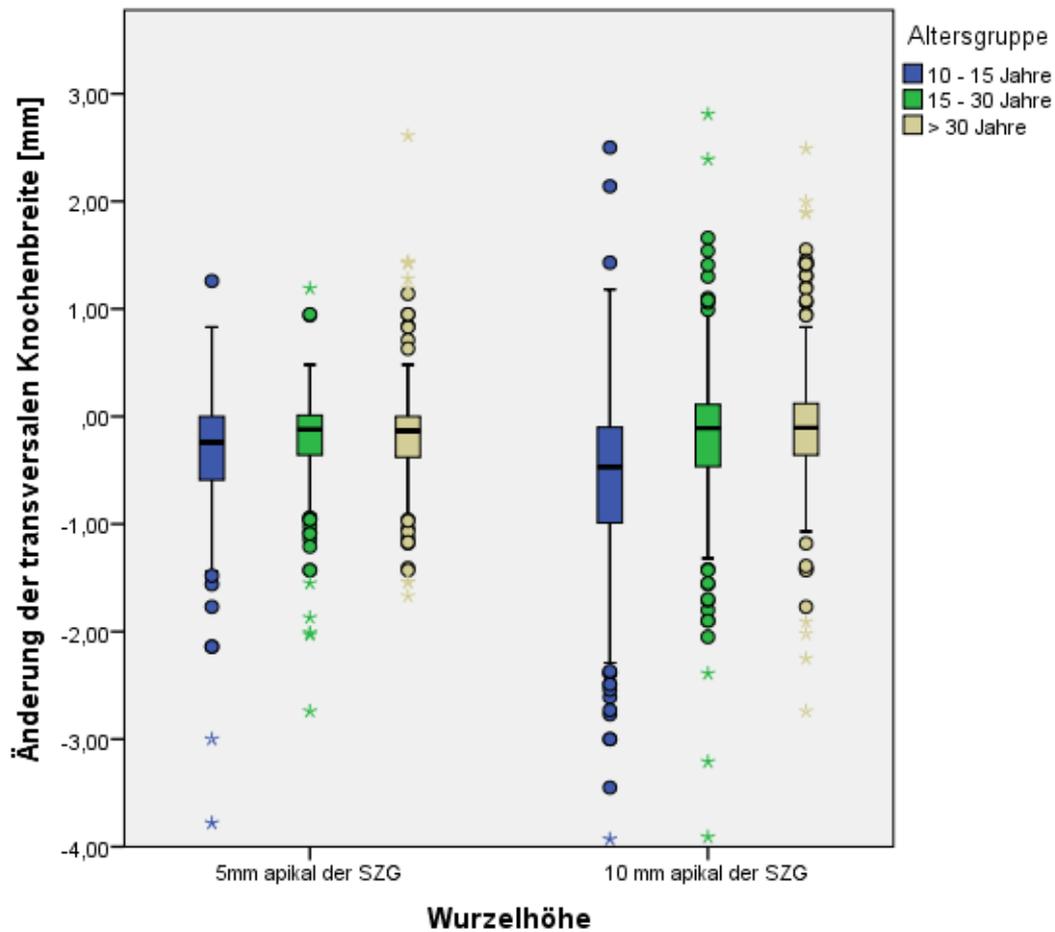


Abb. 32: Vergleich des therapiebedingten Verlustes der vestibulären Knochenbreite zwischen den Altersgruppen.

Der therapiebedingte Verlust in der Breite der knöchernen Wurzelbedeckung war bei den 10- bis 15-Jährigen signifikant größer als bei den anderen Altersgruppen.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze

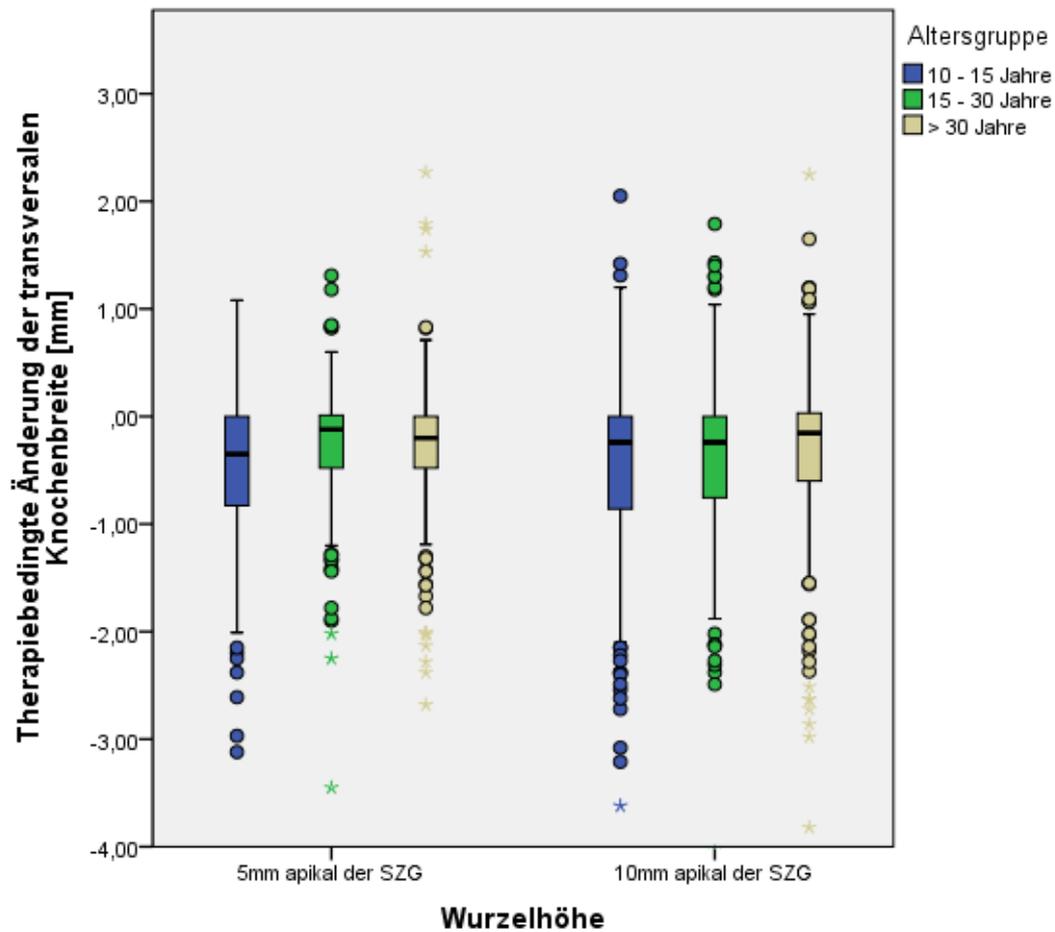


Abb. 33: Vergleich des therapiebedingten Verlustes der oralen Knochenbreite zwischen den Altersgruppen.

Der therapiebedingte Verlust in der Breite der knöchernen Wurzelbedeckung war bei den 10- bis 15-Jährigen im zervikalen Bereich größer als bei den anderen Altersgruppen, wohingegen es im apikalen Bereich keinen Unterschied gab.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Die Nullhypothese „Therapeutisch bedingte Veränderungen des peridental Knochenangebotes weisen keine signifikante Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht der Patienten auf“ konnte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden.

4.5. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Kiefer und Zahngruppe

Kiefer

Vertikales Knochenangebot

Die vestibuläre Knochenhöhe war im Unterkiefer sowohl prä- als auch posttherapeutisch signifikant geringer als im Oberkiefer und sank über den Zeitraum der Therapie stärker. Auf der oralen Knochenseite war kein diesbezüglicher Unterschied zwischen den Kiefern feststellbar.

Die oralen Defekttiefen waren hinsichtlich aller Parameter des vertikalen Knochenangebotes sowohl im Oberkiefer als auch im Unterkiefer signifikant kleiner als auf der vestibulären Seite, jeweils $p < 0,001$. Eine genaue Auflistung der Messwerte und dazugehörigen Standardabweichungen kann der Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 15: Tabellarische Zusammenstellung des Ausmaßes der Defekttiefen im Ober- und Unterkiefer sowie deren Zusammenhänge hinsichtlich der kieferspezifischen Ausprägungen.

Sowohl oral als auch vestibulär unterschieden sich die prä- und zugehörigen posttherapeutischen Werte innerhalb der Altersgruppen signifikant.

	Mittlere Defekttiefe vestibulär			Mittlere Defekttiefe oral		
	prä-therapeutisch	post-therapeutisch	therapiebedingte Änderung	prä-therapeutisch	post-therapeutisch	therapiebedingte Änderung
Oberkiefer [mm]	1,53±1,6	2,29±2,46	0,76±1,64	1,16±1,14	1,74±1,32	0,58±0,75
Unterkiefer [mm]	2,14±2,23	3,01±2,55	0,87±1,29	1,40±1,55	1,97±1,86	0,57±0,83
Signifikanz*	0,019	<0,001	0,002	0,056	0,691	0,322
* Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über die Kategorien der Kiefer						

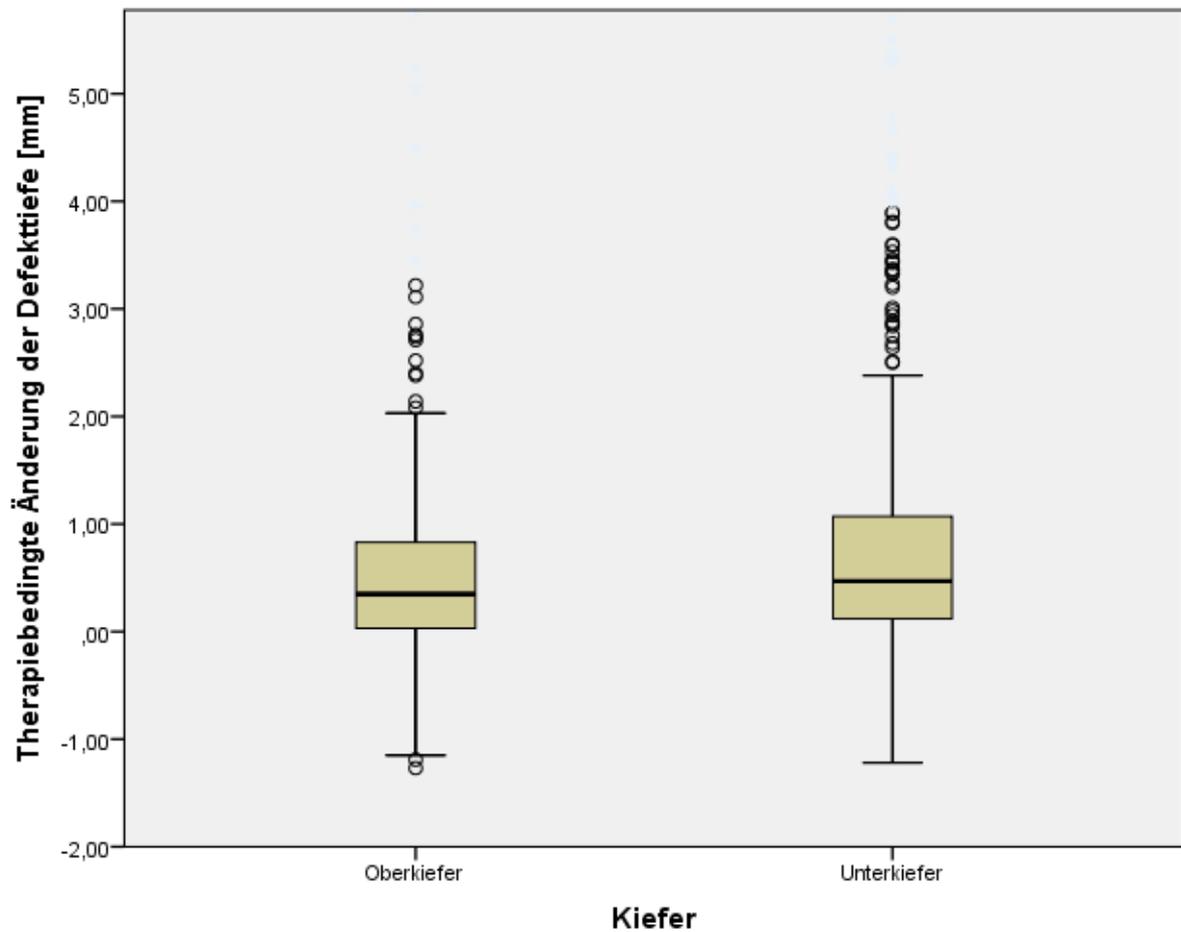


Abb. 34: Vergleich des therapiebedingten vestibulären vertikalen Knochenverlustes zwischen den Kiefern.

Im Unterkiefer war ein größerer therapiebedingter vestibulärer vertikaler Knochenverlust feststellbar.

Im Folgenden sollten die unterschiedlichen Altersgruppen auf die Entwicklung klinisch relevanter Defekttiefen untersucht werden.

Sowohl auf der vestibulären, als auch auf der oralen Seite der Zähne kam es über den Zeitraum der Therapie zu einer vergleichbaren Zunahme von klinisch relevanten Defekttiefen. Im Unterkiefer wurden solche Defekttiefen prätherapeutisch sowie posttherapeutisch häufiger gemessen als im Oberkiefer.

Eine Zusammenstellung der Auftrittshäufigkeit sowie der zugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen kann den Tabellen 16 und 17 entnommen werden.

Tabelle 16: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der vestibulären relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Kiefer.

Im Unterkiefer waren relevante vestibuläre Defekttiefen häufiger als im Oberkiefer, wobei kein Unterschied hinsichtlich der therapiebedingten Änderungen existierte.

Relevant: Defekttiefe ≥ 2 mm; T1: prätherapeutisch, T2: posttherapeutisch; N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N _{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] \pm Standardabweichung [mm]		Signifikanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
Oberkiefer	114	192	24,26	40,85	3,58 \pm 2,66	5,43 \pm 4,14	<0,001
Unterkiefer	159	242	32,85	50,00	4,76 \pm 1,94	5,57 \pm 2,21	<0,001

Tabelle 17: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der oralen relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Kiefer.

Im Unterkiefer waren relevante orale Defekttiefen häufiger als im Oberkiefer, wobei kein Unterschied hinsichtlich der therapiebedingten Änderungen existierte.

Relevant: Defekttiefe ≥ 2 mm; T1: prätherapeutisch; T2: posttherapeutisch; N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N _{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] \pm Standardabweichung [mm]		Signifikanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
Oberkiefer	75	149	15,96	31,70	3,18 \pm 1,44	3,26 \pm 1,24	<0,001
Unterkiefer	99	160	20,45	33,06	3,79 \pm 1,89	4,01 \pm 2,02	<0,001

Transversales Knochenangebot

Das transversale Knochenangebot verringerte sich über den Zeitraum der Therapie in beiden Kiefern signifikant. Dieser Verlust an peridentaler Knochenbreite war auf der oralen Zahnseite im Oberkiefer größer als im Unterkiefer.

5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Obwohl sich die therapiebedingte Änderung des vestibulären Knochenangebotes nicht signifikant zwischen den Kiefern unterschied ($p=0,763$), war die posttherapeutische Knochenbreite im Unterkiefer signifikant kleiner als im Oberkiefer ($p<0,001$). Im Unterkiefer unterschieden sich auf der oralen Seite weder die prätherapeutischen ($p=0,453$) noch die posttherapeutischen Knochenbreiten ($p=0,203$) signifikant von den jeweiligen Werten im Oberkiefer, wobei sie signifikant größer waren als auf der vestibulären Seite des Unterkiefers, jeweils $p<0,001$. Der therapiebedingte orale Knochenverlust ist im Unterkiefer signifikant geringer als im Oberkiefer ($p<0,001$), unterschied sich aber nicht signifikant von der vestibulären Seite im selben Kiefer ($p=0,744$).

10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Die posttherapeutische vestibuläre Knochenbreite war im Unterkiefer signifikant größer als im Oberkiefer sowie 5 mm weiter zervikal (jeweils $p<0,001$), wobei sich der therapiebedingte Knochenverlust weder zwischen den Kiefern ($p=0,633$) noch zwischen den beiden Abständen apikal der Schmelz-Zement-Grenze signifikant unterschied ($p=0,088$). Die posttherapeutische orale Knochenbreite war im Unterkiefer jedoch signifikant kleiner als im Oberkiefer, wobei der dazugehörige therapiebedingte Knochenverlust wiederum im Oberkiefer größer war. Eine Übersicht der Messwerte und Standardabweichungen kann der Tabelle 18 entnommen werden.

Tabelle 18: Tabellarische Zusammenstellung der Parameter des transversalen Knochenangebotes in ihren kieferspezifischen Ausprägungen.

Eine durchgängig breitere knöcherner Wurzelbedeckung konnte keinem Kiefer zugeordnet werden.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze; OK: Oberkiefer; UK: Unterkiefer

Transversale Knochenbreite	Kiefer	Prätherapeutisch	Posttherapeutisch	Signifikanz*	Therapiebedingte Änderung
Vestibulär, 5 mm apikal der SZG	OK	1,29±0,84 mm	1,04±0,72 mm	<0,001	-0,25±0,5 mm
	UK	0,73±0,63 mm	0,49±0,50 mm	<0,001	-0,24±0,45 mm
Signifikanz**		<0,001	<0,001		0,763
Oral, 5 mm apikal der SZG	OK	1,81±0,91 mm	1,41±0,75 mm	<0,001	-0,4±0,62 mm
	UK	1,81±1,08 mm	1,57±1,08 mm	<0,001	-0,24±0,5 mm
Signifikanz**		0,453	0,203		<0,001
Vestibulär, 10 mm apikal der SZG	OK	1,51±1,37 mm	1,21±1,16 mm	<0,001	-0,3±0,75 mm
	UK	2,13±1,41 mm	1,84±1,26 mm	<0,001	-0,3±0,83 mm
Signifikanz**		<0,001	<0,001		0,633
Oral, 10 mm apikal der SZG	OK	3,86±2,01 mm	3,32±1,72 mm	<0,001	-0,54±0,92 mm
	UK	2,79±1,35 mm	2,48±1,36 mm	<0,001	-0,31±0,63 mm
Signifikanz**		<0,001	<0,001		0,017
* Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über den Therapiezeitraum					
** Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über die Kategorien der Kiefer					

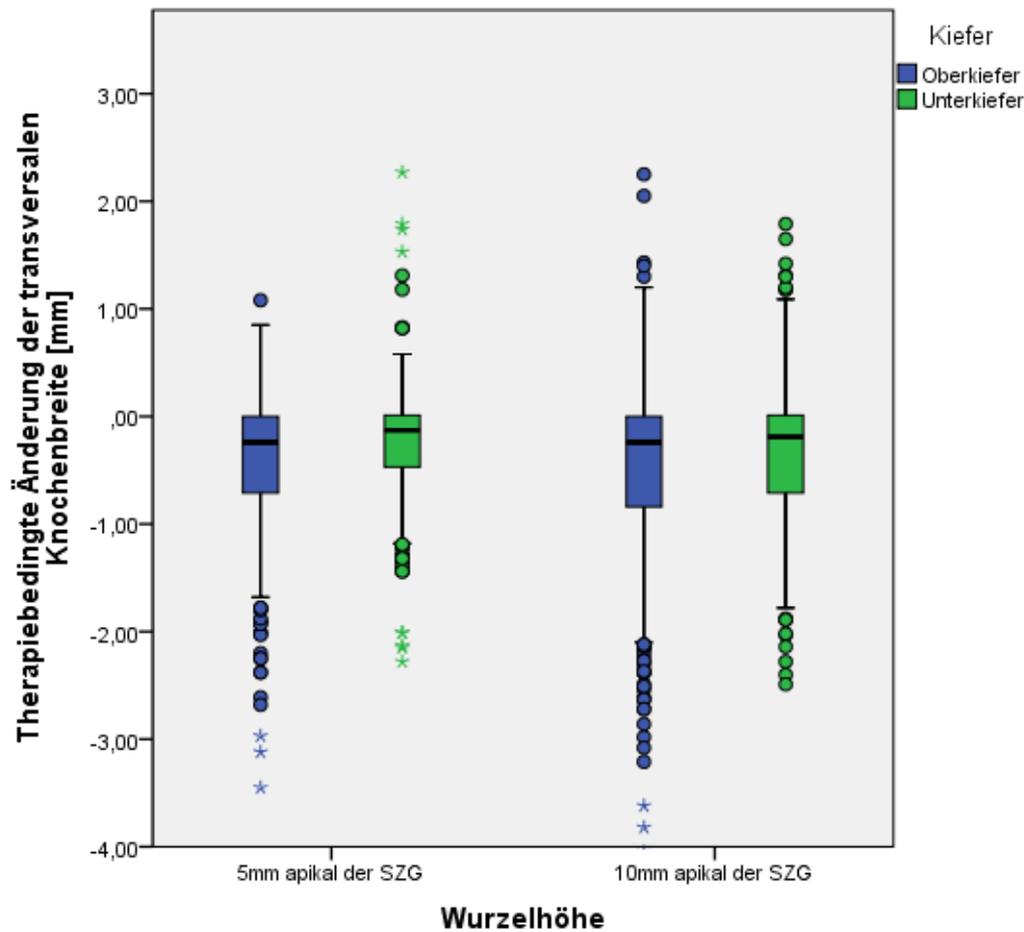


Abb. 35: Vergleich des therapiebedingten Verlustes der oralen Knochenbreite zwischen den Kiefern.

Der therapiebedingte Verlust in der Breite der knöchernen Wurzelbedeckung war im Oberkiefer signifikant größer als im Unterkiefer.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Zahngruppen

Vertikales Knochenangebot

Im Vergleich zwischen den Zahngruppen waren es vor allem die Unterkieferschneidezähne, die durch einen erhöhten therapiebedingten vertikalen Knochenverlust auffielen. Sowohl prä- als auch posttherapeutisch wiesen vor allem die Unterkieferschneidezähne und Unterkiefereckzähne ein vermindertes vertikales vestibuläres Knochenangebot auf, wohingegen es bei den Unterkiefermolaren, Oberkiefermolaren und Oberkieferschneidezähnen vergleichsweise hoch war. Zudem wurde der größte therapiebedingte ves-

tibuläre vertikale Knochenverlust bei den Unterkieferschneidezähnen und Unterkiefer-eckzähnen ermittelt.

Auf der oralen Zahnseite wiesen vor allem die Unterkieferschneidezähne vergleichs-weise tiefe Defekttiefen auf, wobei die Unterkiefereckzähne, Unterkiefermolaren und Unterkieferprämolaren ein vergleichsweise höheres vertikales Knochenangebot aufwiesen. Auch der größte orale therapiebedingte vertikale Knochenverlust wurde bei den Unterkieferschneidezähnen gemessen.

Eine Auflistung der Mittelwerte und dazugehöriger Standardabweichungen kann der Tabelle 19 entnommen werden.

Tabelle 19: Tabellarische Zusammenstellung des Ausmaßes der Defekttiefen und deren Zusammenhänge hinsichtlich der zahngruppenspezifischen Ausprägungen.

Vestibulär wurden vor allem in der Unterkieferfront, oral bei den Unterkieferschneidezähnen und Oberkieferprämolaren größere Defekttiefen gemessen.

Zahngruppe	Mittlere Defekttiefe vestibulär			Mittlere Defekttiefe oral		
	prä-therapeutisch	post-therapeutisch	therapiebedingte Änderung	prä-therapeutisch	post-therapeutisch	therapiebedingte Änderung
Oberkiefer Molar [mm]	1,22±0,9	1,66±1,16	0,44±0,68	1,22±1,13	1,75±1,14	0,52±0,46
Oberkiefer Prämolar [mm]	1,55±1,54	2,25±2,36	0,69±1,44	1,17±0,88	1,78±1,07	0,61±0,71
Oberkiefer Eckzahn [mm]	2,1±2,57	3,5±3,94	1,4±2,72	0,93±0,88	1,51±1,19	0,57±0,83
Oberkiefer Schneidezahn [mm]	1,4±1,27	2,09±1,95	0,69±1,42	1,22±1,43	1,8±1,62	0,59±0,85
Unterkiefer Molar [mm]	1,05±0,89	1,38±1,04	0,33±0,46	0,98±0,75	1,3±0,84	0,32±0,41

Unterkiefer Prämolar [mm]	1,93±1,95	2,71±2,26	0,78±1,14	0,93±0,68	1,33±0,92	0,41±0,59
Unterkiefer Eckzahn [mm]	3,07±3,03	4,03±3,03	0,96±1,47	0,89±0,93	1,29±1,07	0,4±0,64
Unterkiefer Schneidezahn [mm]	2,38±2,24	3,55±2,64	1,16±1,48	2,27±2,13	3,17±2,44	0,9±1,1
Teststatistik (T)	T(7)= 45,709	T(7)= 99,045	T(7)= 44,946	T(7)= 81,539	T(7)= 118,642	T(7)= 44,851
Signifikanz*	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

* Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über die Kategorien der Zahngruppe

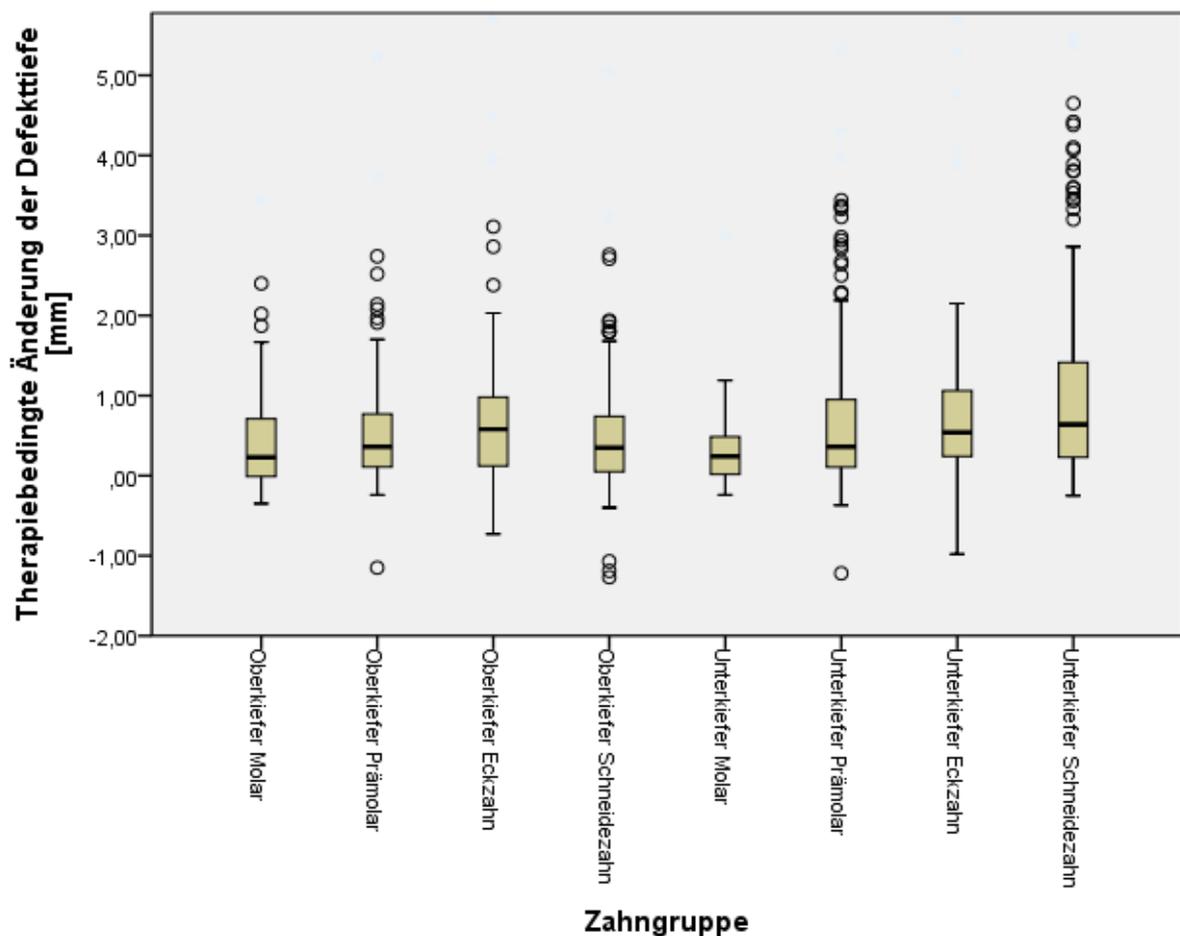


Abb. 36: Vergleich des therapiebedingten vestibulären Knochenverlustes hinsichtlich der Zahngruppen.

Der therapiebedingte vestibuläre vertikale Knochenverlust war bei den Unterkieferschneidezähnen und Unterkiefereckzähnen vergleichsweise hoch, wohingegen er bei den Unterkiefermolaren gering war.

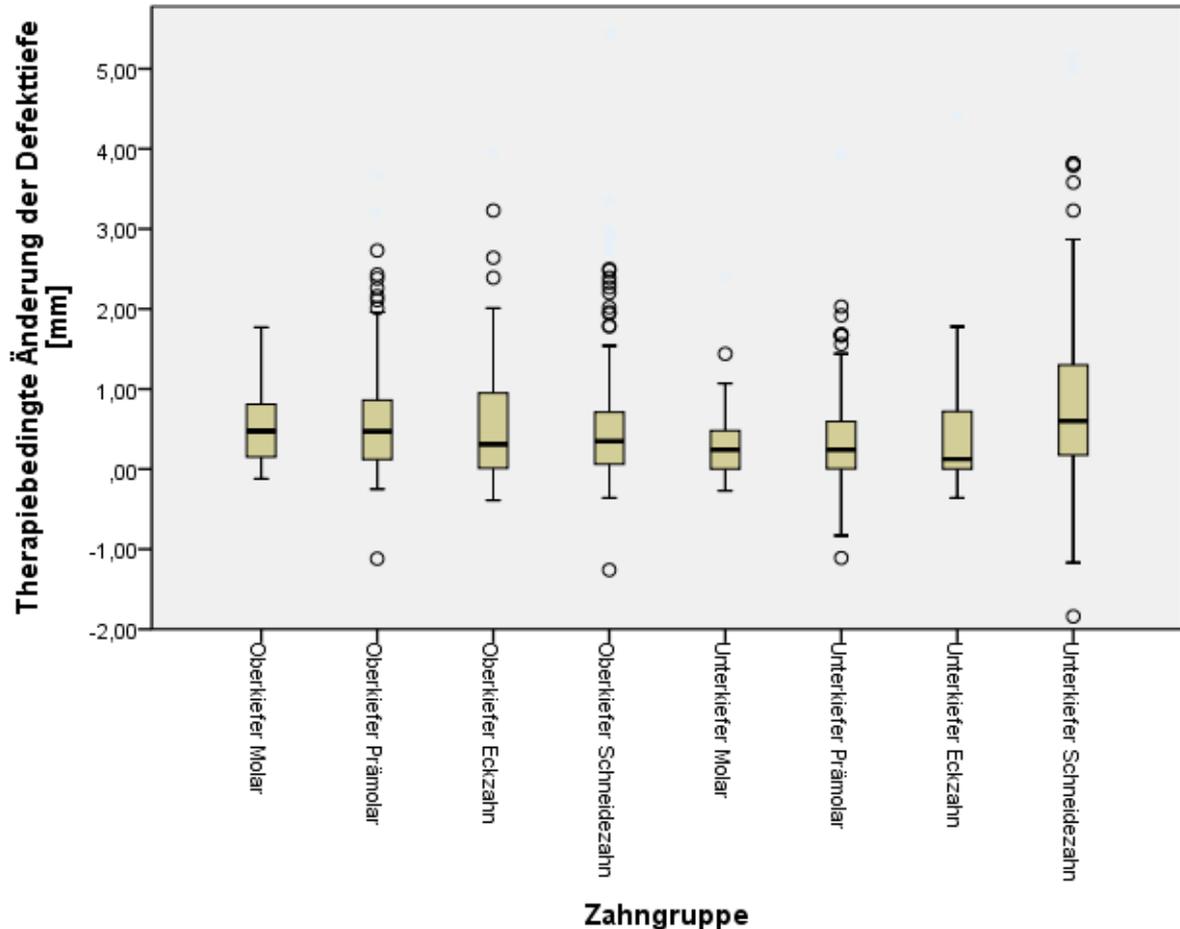


Abb. 37: Vergleich des therapiebedingten oralen Knochenverlustes hinsichtlich der Zahngruppen.

Der therapiebedingte orale vertikale Knochenverlust war bei den Unterkieferschneidezähnen vergleichsweise hoch.

Im Folgenden sollten die unterschiedlichen Zahngruppen auf die Entwicklung klinisch relevanter Defekttiefen untersucht werden.

Der relevante Anteil der prätherapeutischen, vestibulären Defekttiefen war bei den Prämolaren, Eckzähnen und Schneidezähnen des Ober- und Unterkiefers größer als 20 %. Der relevante Anteil der vestibulären Defekttiefen betrug posttherapeutisch bei allen Zahngruppen mehr als 20 % und war bei den Oberkiefereckzähnen mit 58,67 % innerhalb der Zahngruppen am größten. Er nahm bei den Oberkiefereckzähnen, Unter-

kieferprämolaren, Unterkiefer Eckzähnen und Unterkieferschneidezähnen mehr als 50 % ein. Der Mittelwert des relevanten Anteils war bei den Unterkiefer Eckzähnen signifikant größer als bei allen anderen Zahngruppen, ausgenommen der Unterkieferschneidezähne, von denen er sich nicht signifikant unterschied, $p < 0,001$ bis $p = 0,011$.

Eine Auflistung der ermittelten Häufigkeiten und zugehöriger Mittelwerte sowie Standardabweichungen kann der Tabelle 20 entnommen werden.

Tabelle 20: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der vestibulären relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Zahngruppen.

Bei den Oberkiefer Eckzähnen traten im relevanten Anteil der vestibulären Defekttiefen die größte prozentuale Zunahme sowie der größte therapiebedingte Knochenverlust auf.

Relevant: Defekttiefe ≥ 2 mm; T1: prätherapeutisch; T2: posttherapeutisch; N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N_{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] \pm Standardabweichung [mm]		Signifikanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
Oberkiefer Molar	15	26	18,29	31,71	2,7 \pm 0,67	3,08 \pm 0,92	<0,001
Oberkiefer Prämolare	40	61	27,59	42,07	3,33 \pm 1,88	3,93 \pm 2,85	<0,001
Oberkiefer Eckzahn	24	44	32,00	58,67	4,24 \pm 3,7	5,08 \pm 4,53	<0,001
Oberkiefer Schneidezahn	35	61	20,83	36,31	3,22 \pm 1,64	3,82 \pm 2,34	<0,001
Unterkiefer Molar	11	18	13,75	22,50	2,72 \pm 0,82	2,85 \pm 1,06	0,001
Unterkiefer Prämolare	50	78	33,11	51,66	4,15 \pm 1,9	4,32 \pm 2,08	<0,001
Unterkiefer Eckzahn	31	46	37,80	56,10	6,53 \pm 2,12	6,17 \pm 2,39	<0,001

Unterkiefer Schneidezahn	67	100	39,18	58,48	4,71±1,9	5,23±2,24	<0,001
-----------------------------	----	-----	-------	-------	----------	-----------	--------

Oral waren hinsichtlich der prätherapeutischen im Gegensatz zur vestibulären Seite nur die Unterkieferschneidezähne mit einem relevanten Anteil von mehr als 20 % vertreten. Lediglich bei den Unterkieferschneidezähnen nahm der relevante Anteil der oralen posttherapeutischen Defekttiefen mehr als 50 % ein.

Eine Auflistung der ermittelten Häufigkeiten und zugehöriger Mittelwerte sowie Standardabweichungen kann der Tabelle 21 entnommen werden.

Tabelle 21: Tabellarische Übersicht über die zahlenmäßige, prozentuale und metrische Veränderung der oralen relevanten Defekttiefen für die verschiedenen Zahngruppen.

Im relevanten Anteil der oralen Defekttiefen trat bei den Oberkieferprämolaren die größte prozentuale Zunahme des Anteils und bei den Unterkieferschneidezähnen der größte therapiebedingte Knochenverlust auf.

Relevant: Defekttiefe ≥ 2 mm; T1: prätherapeutisch, T2: posttherapeutisch;
N: Stichprobenanzahl

	N		Anteil an N _{gesamt} [%]		Mittelwert [mm] ± Standard- abweichung [mm]		Signifi- kanz
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
Oberkiefer Molar	13	28	15,85	34,15	3,09±1,63	2,87±1,25	<0,001
Oberkiefer Prämolarmolar	20	49	13,79	33,79	2,86±0,91	2,97±0,91	<0,001
Oberkiefer Eckzahn	9	21	12,00	28,00	2,75±0,86	3,12±0,85	<0,001
Oberkiefer Schneidezahn	33	51	19,64	30,36	3,52±1,69	3,74±1,63	<0,001
Unterkiefer Molar	9	14	11,25	17,50	2,64±0,54	2,86±0,59	0,004
Unterkiefer Prämolarmolar	15	34	9,93	22,52	2,37±0,22	2,8±0,54	<0,001
Unterkiefer Eckzahn	8	14	9,76	17,07	3,08±1,15	3,1±1,16	0,009

Unterkiefer Schneidezahn	67	98	39,18	57,31	4,35±2,02	4,58±2,36	<0,001
-----------------------------	----	----	-------	-------	-----------	-----------	--------

Transversales Knochenangebot

Das transversale Knochenangebot verringerte sich über den Zeitraum der Therapie bei den Oberkieferprämolaren und den Oberkiefermolaren vergleichsweise stärker als bei den anderen Zahngruppen.

5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Die Unterkieferschneidezähne und Unterkiefereckzähne waren sowohl prä- als auch posttherapeutisch durch vergleichsweise kleine vestibuläre Knochenbreiten gekennzeichnet.

Auch auf der oralen Zahnseite wurden prä- und posttherapeutisch bei den Unterkieferschneidezähnen vergleichsweise kleine Knochenbreiten gemessen.

Der therapiebedingte transversale Knochenverlust war oral bei den Oberkieferschneidezähnen signifikant größer als bei den Unterkieferschneidezähnen und den Unterkieferprämolaren. Der therapiebedingte Knochenverlust war bei den Oberkieferprämolaren, den Oberkiefereckzähnen und den Oberkieferschneidezähnen oral zudem signifikant größer als vestibulär, $p < 0,001$ bis $p = 0,026$.

10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze

Die vestibuläre Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze war bei den Oberkieferschneidezähnen, den Oberkiefereckzähnen, den Oberkieferprämolaren und den Unterkiefereckzähnen vergleichsweise gering, wohingegen sie bei den Oberkiefer- und Unterkiefermolaren vergleichsweise hoch war. Der therapiebedingte Knochenverlust war auf der vestibulären Seite bei den Oberkiefermolaren signifikant größer als bei den Unterkieferschneidezähnen, den Oberkieferprämolaren und den Oberkieferschneidezähnen.

Auf der oralen Seite war die Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze bei den Oberkiefermolaren, den Unterkiefereckzähnen und den Unterkieferschneidezähnen signifikant geringer als bei den restlichen Zahngruppen. Die Knochenbreite war auf der oralen Seite bei allen Zahngruppen, ausgenommen den Oberkiefermolaren und den Unterkieferschneidezähnen, signifikant größer als vestibulär, jeweils $p < 0,001$. Bei den Oberkiefermolaren war die vestibuläre Knochenbreite prätherapeutisch größer als oral, wobei posttherapeutisch kein solcher Unterschied feststellbar war. Die Unterkie-

ferschneidezähne wiesen diesbezüglich prätherapeutisch keinen Unterschied auf, die vestibuläre Knochenbreite stellte sich hier jedoch posttherapeutisch größer dar als oral. Eine Übersicht der Messwerte und dazugehöriger Standardabweichungen kann der Tabelle 22 entnommen werden.

Tabelle 22: Tabellarische Zusammenstellung der Parameter des transversalen Knochenangebotes in ihren zahngruppenspezifischen Ausprägungen. Bereits prätherapeutisch existierende Breitenunterschiede zwischen den Zahngruppen blieben über den Zeitraum der Therapie bestehen, wobei oral und vestibulär unterschiedliche Zahngruppen durch breitere oder schmalere Knochenbreiten auffielen.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze; OK: Oberkiefer; UK: Unterkiefer

Knochenbreite	Zahngruppe	Prätherapeutisch	Posttherapeutisch	Signifikanz*	Therapiebedingte Änderung
Vestibulär, 5 mm apikal der SZG	OK Molar	1,78±1 mm	1,44±0,89 mm	<0,001	-0,35±0,48 mm
	OK Prämolare	1,57±0,92 mm	1,29±0,81 mm	<0,001	-0,28±0,49 mm
	OK Eckzahn	0,8±0,37 mm	0,65±0,4 mm	0,001	-0,15±0,44 mm
	OK Schneidezahn	1,02±0,6 mm	0,81±0,44 mm	<0,001	-0,21±0,53 mm
	UK Molar	1,41±0,73 mm	1,05±0,56 mm	<0,001	-0,36±0,59 mm
	UK Prämolare	0,75±0,51 mm	0,54±0,44 mm	<0,001	-0,21±0,45 mm
	UK Eckzahn	0,38±0,37 mm	0,19±0,25 mm	<0,001	-0,2±0,29 mm
	UK Schneidezahn	0,55±0,51 mm	0,32±0,37 mm	<0,001	-0,23±0,42 mm
Signifikanz**		<0,001	<0,001		0,065
Oral, 5 mm apikal der SZG	OK Molar	1,58±0,71 mm	1,34±0,63 mm	<0,001	-0,23±0,48 mm
	OK Prämolare	1,91±1 mm	1,44±0,77 mm	<0,001	-0,48±0,73 mm
	OK Eckzahn	1,93±0,75 mm	1,55±0,59 mm	<0,001	-0,38±0,59 mm
	OK Schneidezahn	1,79±0,97 mm	1,35±0,85 mm	<0,001	-0,44±0,59 mm
	UK Molar	2,42±0,84 mm	2,23±0,85 mm	<0,001	-0,18±0,49 mm
	UK Prämolare	2,58±0,99 mm	2,31±1,01 mm	<0,001	-0,27±0,61 mm
	UK Eckzahn	1,63±0,67 mm	1,37±0,64 mm	<0,001	-0,26±0,42 mm

	UK Schneidezahn	0,9±0,61 mm	0,67±0,59 mm	<0,001	-0,23±0,42 mm
Signifi- kanz**		<0,001	<0,001		0,001
Vestibulär, 10 mm api- kal der SZG	OK Molar	2,58±1,91 mm	1,92±1,61 mm	<0,001	-0,66±0,93 mm
	OK Prämolare	1,53±1,28 mm	1,33±1,29 mm	<0,001	-0,2±0,56 mm
	OK Eckzahn	0,78±0,37 mm	0,57±0,36 mm	<0,001	-0,21±0,39 mm
	OK Schneidezahn	1,31±1,07 mm	1,05±0,74 mm	<0,001	-0,26±0,88 mm
	UK Molar	2,93±1,35 mm	2,37±1,12 mm	<0,001	-0,57±0,93 mm
	UK Prämolare	2,01±0,91 mm	1,73±0,99 mm	<0,001	-0,29±0,73 mm
	UK Eckzahn	1,42±1,06 mm	1,15±0,9 mm	<0,001	-0,27±0,58 mm
	UK Schneidezahn	2,21±1,74 mm	2,03±1,53 mm	0,005	-0,18±0,94 mm
Signifi- kanz**		<0,001	<0,001		<0,001
Oral, 10 mm api- kal der SZG	OK Molar	1,79±1,05 mm	1,64±1,04 mm	<0,001	-0,15±0,46 mm
	OK Prämolare	4,58±2,03 mm	3,82±1,73 mm	<0,001	-0,75±1,05 mm
	OK Eckzahn	4,54±1,52 mm	3,95±1,24 mm	<0,001	-0,59±0,82 mm
	OK Schneidezahn	3,97±1,85 mm	3,43±1,66 mm	<0,001	-0,54±0,96 mm
	UK Molar	3,5±1,26 mm	3,34±1,15 mm	0,004	-0,16±0,59 mm
	UK Prämolare	3,6±1,29 mm	3,3±1,27 mm	<0,001	-0,3±0,66 mm
	UK Eckzahn	2,38±0,96 mm	2,07±1,05 mm	<0,001	-0,31±0,53 mm
	UK Schneidezahn	1,89±0,9 mm	1,51±0,86 mm	<0,001	-0,38±0,67 mm
Signifi- kanz**		<0,001	<0,001		0,001
* Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über den Therapiezeitraum					
** Asymptotische Signifikanz für gleiche Verteilung über die Kategorien der Zahngruppen					

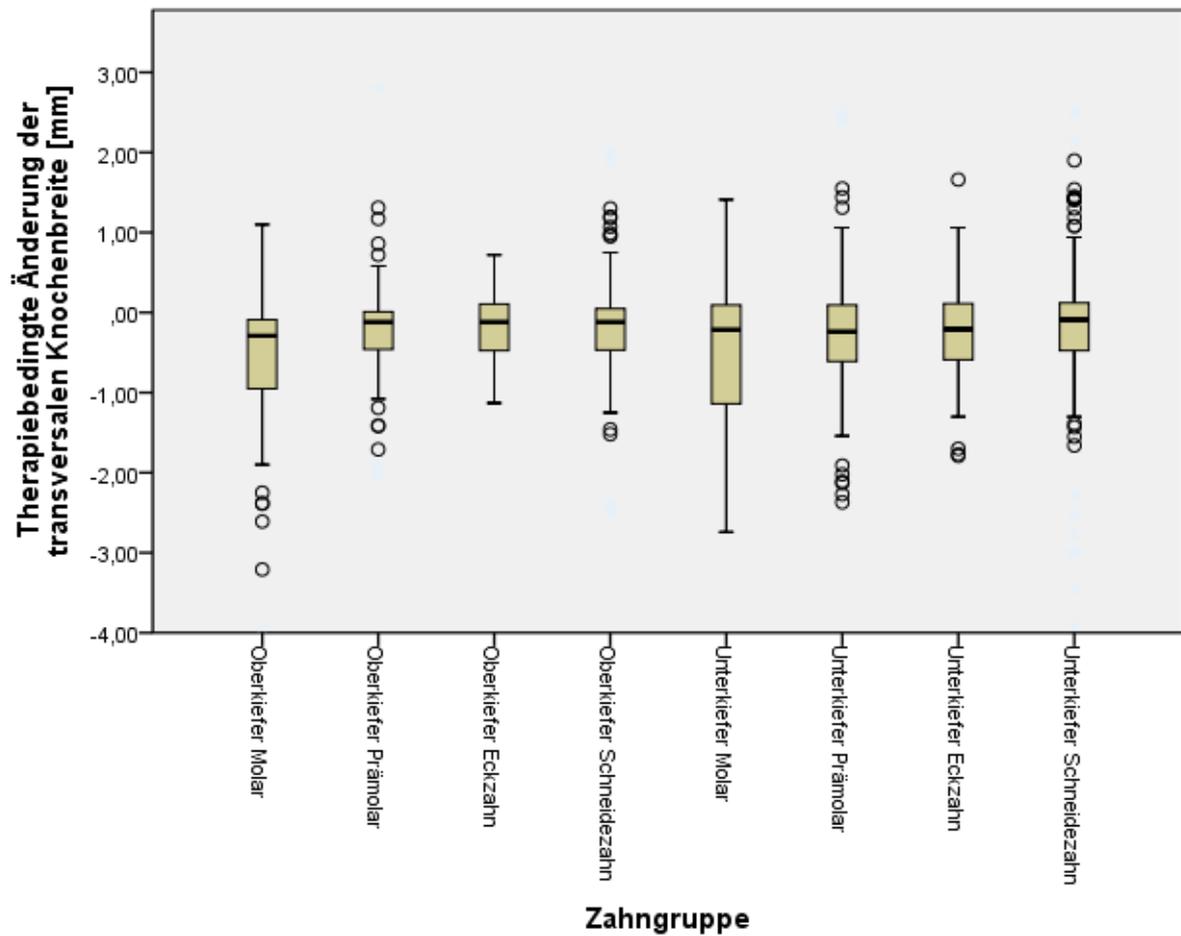


Abb. 38: Vergleich des therapiebedingten Verlustes der vestibulären Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze zwischen den Zahngruppen.

Der therapiebedingte vestibuläre transversale Knochenverlust 10 mm apikal der SZG war bei den Oberkiefermolaren vergleichsweise hoch. SZG: Schmelz-Zement-Grenze

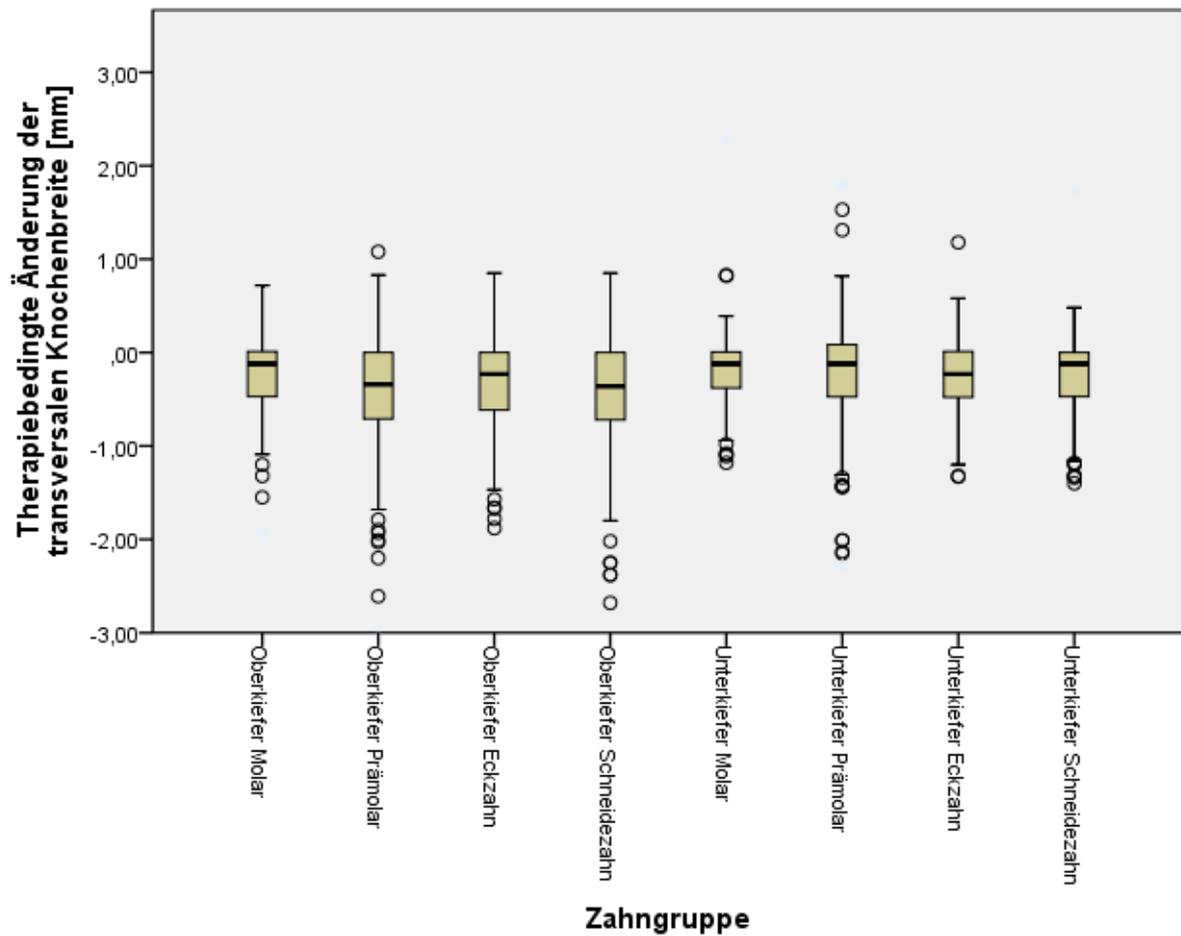


Abb. 39: Vergleich des therapiebedingten Verlustes der oralen Knochenbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze zwischen den Zahngruppen. Der therapiebedingte orale transversale Knochenverlust 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze war bei den Oberkieferprämolaren und Oberkieferschneidezähnen vergleichsweise hoch. SZG: Schmelz-Zement-Grenze

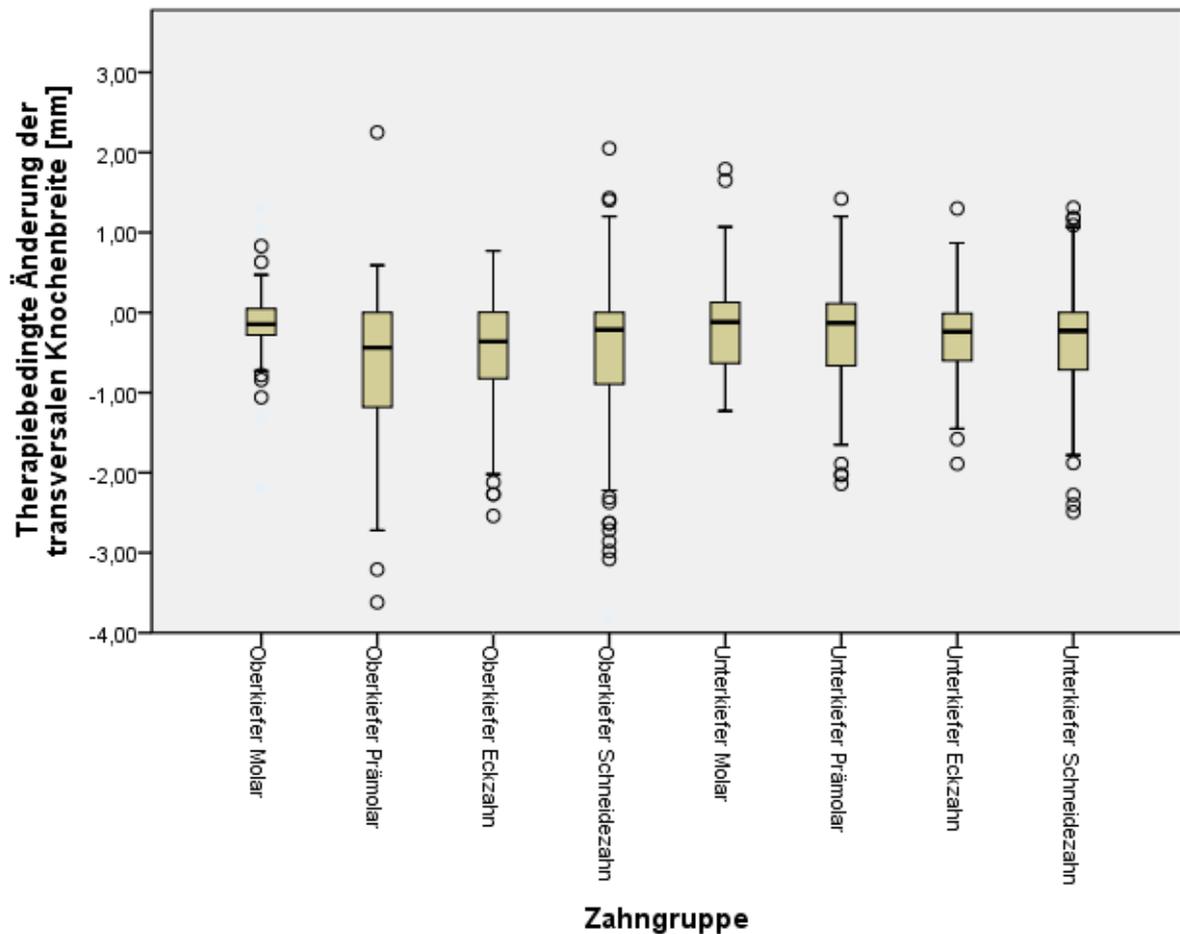


Abb. 40: Vergleich des therapiebedingten Verlustes der oralen Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze zwischen den Zahngruppen.

Der therapiebedingte orale transversale Knochenverlust 10 mm apikal der SZG war bei den Oberkieferprämolaren vergleichsweise hoch. SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Die Nullhypothese „Therapeutisch bedingte Veränderungen des peridental Knochenangebotes weisen keine signifikante Abhängigkeit von der Zugehörigkeit zu einem Kiefer oder spezieller Zahngruppen auf“ konnte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden.

4.6. Korrelation zwischen Ausgangssituation und therapeutischem Effekt

Es konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der prätherapeutischen vestibulären Defekttiefe und der therapiebedingten Änderung im vestibulären vertikalen Knochenangebot festgestellt werden.

Der therapiebedingte, vestibuläre, vertikale Knochenverlust nahm bei den unterschiedlichen prätherapeutischen Defekttiefen Ausprägungen zwischen 0,63 mm und 1,88 mm ein, unterschied sich aber nicht signifikant zwischen den Gruppen, $p=0,146$.

Allerdings war ein direkter Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der prä- und posttherapeutischen vertikalen Knochenhöhe existent. Je größer die Vorschädigung im vertikalen Knochenangebot, desto größer stellte sich die posttherapeutisch gemessene Defekttiefe dar.

Eine Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen der posttherapeutischen Defekttiefen und der therapiebedingten Knochenverluste in Bezug auf die Kategorien der vertikalen Vorschädigung kann der Tabelle 23 entnommen werden.

Tabelle 23: Tabellarische Zusammenstellung der posttherapeutischen, vestibulären, vertikalen Defekttiefe und des zugehörigen therapiebedingten Knochenverlustes hinsichtlich ihres prätherapeutischen Ausgangszustandes. Zähne mit verschiedenen vestibulären vertikalen Vorschädigungen unterschieden sich hinsichtlich ihres therapiebedingten vertikalen Knochenverlustes nicht.

N: Stichprobenanzahl

Prätherapeutische, vestibuläre, vertikale Knochendehiszenzen	Gültig (N=)	Posttherapeutische, vestibuläre, vertikale Knochendehiszenzen; Mittelwert [mm] ± Standardabweichung [mm]	Therapiebedingter, vestibulärer, vertikaler Knochenverlust; Mittelwert [mm] ± Standardabweichung [mm]
$x < 0,5$ mm	197	1,06±1,14	0,75±1,12
0,5 <x< 1 mm	212	1,39±1,17	0,63±1,15
1 <x< 1,5 mm	153	1,88±1,12	0,66±1,09
1,5 <x< 2 mm	121	2,58±1,61	0,87±1,58
2 <x< 2,5 mm	74	3,19±1,72	0,98±1,72
2,5 <x< 3 mm	44	3,59±1,47	0,84±1,43
3 <x< 3,5 mm	22	5,13±2,67	1,88±2,66
3,5 <x< 4 mm	19	5,5±2,9	1,78±2,9

4	<x< 4,5 mm	13	5,99±4,28	1,81±4,27
	x> 4,5 mm	99	7,48±2,27	0,84±1,31
	Teststatistik (T)		T(9)= 935,88	T(9)= 13,392
	Signifikanz		<0,001	0,146

Die Nullhypothese „Zwischen dem prätherapeutisch vorhandenen vertikalen Knochenangebot und dem Ausmaß der therapeutisch bedingten vertikalen Knochenveränderungen gibt es keinen signifikanten Zusammenhang“ konnte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden.

4.7. Korrelation zwischen horizontalen und vertikalen Therapieeffekten

Es konnten keine eindeutigen Korrelationen zwischen dem vestibulären, therapiebedingten Knochenverlust und den Änderungen in den transversalen Parametern festgestellt werden, $p=0,153$ bis $p=0,795$. Zwischen der Änderung der oralen Defekttiefe und der transversalen Parameter konnten allerdings leichte lineare Zusammenhänge nachgewiesen werden. Für den Zusammenhang zwischen dem therapiebedingten, oralen Knochenverlust und der Änderung der oralen Knochenbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze ergab sich eine Pearson-Korrelation von $-0,184$, mit einer 2-seitigen Signifikanz von $p<0,001$. Des Weiteren ergab sich für den Zusammenhang des oralen, therapiebedingten Knochenverlustes und der Änderung der vestibulären Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze eine Pearson-Korrelation von $0,087$ mit einem p-Wert von $0,007$. Für die Änderung der oralen Knochenbreite auf diesem Niveau betrug die Korrelation $-0,071$, bei einer Signifikanz von $p=0,028$.

Eine Übersicht der Ausmaße des Zusammenhangs der therapiebedingten vertikalen Knochenverluste und der Änderung der Knochenbreite kann der Tabelle 24 entnommen werden.

Tabelle 24: Tabellarische Zusammenstellung der Korrelationen von den therapiebedingten Änderungen in den Parametern des vertikalen und transversalen Knochenangebotes.

Auf der oralen Zahnseite gab es leichte lineare Zusammenhänge zwischen den therapiebedingten Knochenverlusten im vertikalen und horizontalen Knochenangebot.

N: Stichprobenanzahl; SZG: Schmelz-Zement-Grenze

Änderung der Knochenbreite		Therapiebedingter, vertikaler Knochenverlust					
		Vestibulär			Oral		
		Korrelation nach Pearson	Signifikanz	N	Korrelation nach Pearson	Signifikanz	N
Vestibulär	5 mm apikal der SZG	-0,460	0,153	954	0,053	0,104	954
	10 mm apikal der SZG	-0,023	0,484	954	0,087*	0,007	954
Oral	5 mm apikal der SZG	0,010	0,753	954	-0,184**	<0,001	954
	10 mm apikal der SZG	0,013	0,692	954	-0,071*	0,028	954
Gesamt	5 mm apikal der SZG	-0,022	0,491	954	-0,111**	0,001	954
	10 mm apikal der SZG	-0,008	0,795	954	0,014	0,676	954
* Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant							
** Korrelation ist auf dem Niveau von 0,001 (2-seitig) signifikant							

Die Nullhypothese „Zwischen der therapeutisch bedingten Differenz im horizontalen Knochenangebot und der therapeutisch bedingten Veränderung des vertikalen Knochenangebotes gibt es keinen signifikanten Zusammenhang“ konnte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht vollständig bestätigt werden.

4.8. Korrelation zwischen therapeutischer Zahnbewegung und Therapieeffekten

Es war keine signifikante Korrelation zwischen der Änderung der vestibulo-oralen Inklination und dem therapiebedingten, vertikalen Knochenverlust auf der oralen oder vestibulären Seite nachweisbar, $p=0,14$ und $0,061$. Für den Zusammenhang der Änderung der Inklination und der Änderung der oralen Knochenbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze betrug die Korrelation nach Pearson $0,306$, wobei sie insgesamt auf dieser Höhe $0,232$ maß, jeweils $p<0,001$. Vestibulär sank das Ausmaß des Knochenangebots 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze mit einem Korrelationskoeffizienten von $-0,293$, wohingegen er oral mit selbigem Abstand $0,456$ maß, jeweils $p<0,001$. Auch der Zusammenhang zur gesamten Knochenbreite ergab eine Pearson-Korrelation von $0,142$, $p<0,001$.

Eine Übersicht der Ausmaße des Zusammenhangs der Inklinationsänderung und der therapiebedingten Änderung im vertikalen und horizontalen Knochenangebot kann der Tabelle 25 entnommen werden.

Tabelle 25: Tabellarische Zusammenstellung der Korrelationen von der therapiebedingten Inklinationsänderung und den Parametern des vertikalen und transversalen Knochenangebotes.

Eine therapiebedingte Inklinationsänderung korrelierte mit Änderungen im transversalen Knochenangebot, wohingegen keine Korrelation mit einem vertikalen Knochenverlust feststellbar war.

SZG: Schmelz-Zement-Grenze

		Änderung der vestibulo-oralen Inklination		
		Korrelation nach Pearson	Signifikanz	N
Therapiebedingter, vertikaler Knochenverlust vestibulär		0,061	0,061	954
Therapiebedingter, vertikaler Knochenverlust oral		-0,048	0,140	954
Änderung der Knochenbreite vestibulär	5 mm apikal der SZG	-0,018	0,586	954
	10 mm apikal der SZG	-0,293**	<0,001	954
Änderung der	5 mm apikal der SZG	0,306**	<0,001	954

Knochenbreite oral	10 mm apikal der SZG	0,456**	<0,001	954
Änderung der Knochenbreite gesamt	5 mm apikal der SZG	0,232**	<0,001	954
	10 mm apikal der SZG	0,142**	<0,001	954
** Korrelation ist auf dem Niveau von 0,001 (2-seitig) signifikant				

Die Nullhypothese „Zwischen der therapeutisch bedingten Differenz in der Inklination und der therapeutisch bedingten Veränderung des peridental Knochenangebotes gibt es keinen signifikanten Zusammenhang“ konnte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden.

5. Diskussion

5.1. Diskussion der Methoden

Da sich das Patientengut retrospektiv aus tatsächlich kieferorthopädisch behandelten Patienten zusammensetzt, kann von klinisch aussagekräftigen Daten ausgegangen werden. Es wurde auf eine Balance hinsichtlich der Geschlechter- und Altersverteilung geachtet. Die zentralen Einschlusskriterien einer Voxelgröße unter $0,25 \text{ mm}^3$ sowie die ausreichende Identifizierbarkeit von Referenzpunkten sollten die Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit optimieren. Eine Studie konnte zeigen, dass die mittlere Abweichung der Defekthöhen der Dehiszenzen bei $0,125$ und $0,2 \text{ mm}^3$ unter $0,1 \text{ mm}$ beträgt, wohingegen sie bei $0,25 \text{ mm}^3$ bei $0,17 \text{ mm}$ liegt (Schattmann 2011). Datensätze, bei denen der Zeitraum zwischen prä- und posttherapeutischen digitalen Volumentomographien unter 12 Monaten lag, wurden nicht berücksichtigt. Darüber hinaus sind keine Abhängigkeiten zwischen der Dauer der kieferorthopädischen Behandlung und dem Abstand zwischen der Schmelz-Zement-Grenze und dem marginalen Knochenrand bekannt (Bondemark 1998), weshalb dahingehend keine weiterführenden Einteilungen vorgenommen wurden. Da sich das peridentale Knochenangebot direkt nach orthodontischer Zahnbewegung noch in einem Zustand des Umbaus befindet, ist es ratsam, eine Retentionsphase abzuwarten. Erst nach der Stabilisierung des knöchernen Zustandes sollten Messungen an Zahn und beteiligten Hartgeweben mit den Ausgangswerten verglichen werden, da ein während oder direkt nach der Behandlung gemessener Knochenverlust nur vorübergehender Natur sein kann (Aass & Gjermo 1992; Fuhrmann 2002). Der mittlere Zeitraum zwischen Ausgliederung der Multibracket-Apparatur und Anfertigung einer 3-dimensionalen Röntgenaufnahme beläuft sich auf 1,1 Monate. Obwohl dieser Zeitraum bei 35 von 43 Patienten weniger als 1 Monat beträgt, muss beachtet werden, dass die letzten 3 Monate vor Entfernung der Apparaturen von Feinjustierung und Retention geprägt sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Zeitraum die Alveole sowie umgebende knöcherne Strukturen hinreichend konsolidieren.

Die Patienten unterschieden sich in Bezug auf das kieferorthopädische Behandlungskonzept und in gewissem Maße auf das prätherapeutische Knochenangebot, so dass nur eine eingeschränkte Vergleichbarkeit gegeben ist. Die digitalen Volumentomogramme wurden nach einem bereits beschriebenen Standardprotokoll durchgeführt. Differenzen in der Patientenausrichtung können im Gegensatz zur Projektion auf einen

zweidimensionalen Film durch Reorientierung des Datensatzes kompensiert werden. Allerdings stellten Untersuchungen anhand von Computertomographien fest, dass die Identifizierbarkeit von knöchernen Defekten bei einem zum Defekt senkrechten Schichtverlauf steigt. Ein eher paralleler Schichtverlauf erschwert dagegen die Darstellbarkeit (Fuhrmann 1996a). Da die verwendeten Datensätze allerdings von echten Menschen stammen und die üblichen Unsicherheiten in Positionierung und Aufrechterhaltung der eingestellten Position bedacht werden müssen, ist auch hier ein Potential für Ungenauigkeiten gegeben.

Die eingeschränkte Vergleichbarkeit wurde durch Korrekturen der Ausrichtung, der Helligkeit oder des Kontrastes weitestgehend minimiert. An dieser Stelle sollte festgehalten werden, dass solche Korrekturen selten und nur in sehr geringem Umfang notwendig waren. Die Datenerhebung wurde in der Mehrfachprojektionsrekonstruktion durchgeführt. Die Messung in der multiplanaren Ansicht hat sich gegenüber der Volume Render-Ansicht als vorteilhaft erwiesen (Leung et al. 2010; Schattmann 2011). Dadurch werden weniger falsch negative Ergebnisse produziert. Als Grundproblematik von Mehrfachmessungen ist das Wiederauffinden gemeinsamer Bezugsebenen zu bedenken. Die theoretischen Grenzen der Darstellbarkeit von knöchernen Strukturen im DVT sind dann erreicht, wenn die darzustellende Struktur schmäler als die Kantenlänge des verwendeten Voxels ist (Ballrick et al. 2008). Fuhrmann et al. (Fuhrmann et al. 1995) beschrieben die Qualität des CBCT-Scans bei einer kortikalen Breite unter 0,5 mm als relativ akkurat. In der Praxis scheinen allerdings bereits Strukturen unter 0,4 mm Breite bei einer Voxelgröße von 0,25 mm³ nicht mehr hinreichend erkennbar zu sein (Schattmann 2011). Als mögliche Ursache wird vor allem der im Vergleich zum CT erhöhte Rauschpegel erwähnt (Kalender & Kyriakou 2007; Pauwels et al. 2012).

Die linearen Parameter des vertikalen und horizontalen Knochenangebotes sind in beschriebener Form bereits in anderen Arbeiten verwendet worden und können als reproduzierbare Referenzpunkte angesehen werden (Ballrick et al. 2008; Batenhorst 1974; Fleiner et al. 2012; Leung et al. 2010; Mengel et al. 2005; Misch et al. 2006; Tugnait, Clerehugh & Hirschmann 2000; Vandenberghe et al. 2008, 2007). Bereits kleinere Fehler in der Ortsbestimmung der Schmelz-Zement-Grenze oder des marginalen Knochenrandes können zur Unter- oder Überschätzung eines vertikalen Defektes führen (Vandenberghe et al. 2008). Eine Restdifferenz zwischen röntgenologischen Daten und den tatsächlichen anatomischen Verhältnissen muss klinisch akzeptiert werden (Vandenberghe et al. 2008, 2007). Da nur jeweils eine Defekttiefe in der gesamten me-

sio-distalen Breite des Zahnes vestibulär und oral erfasst wird, findet keine ganzheitliche Beschreibung der alveolären Defekte eines Zahnes statt. Es können also keine parodontologischen Aussagen über den vorliegenden Zustand abgeleitet werden (Mengel et al. 2005, 2006; Reddy 1992).

Wenn man davon ausgeht, dass zum Zeitpunkt der posttherapeutischen DVT-Aufnahmen noch nicht remineralisierte Knochenabschnitte beziehungsweise weniger mineralisierter Geflechtknochen im Bereich des Parodontalspalt es vorliegen, ist es sinnvoll, das transversale Knochenangebot von der lateralen Zahnbegrenzung bis zum lateralen Knochenrand zu ermitteln, anstatt die reine Knochenbreite zu messen. Somit ergeben sich zwar keine tatsächlichen Knochenbreiten aber die therapiebedingte Änderung dieses Parameters wird exakter beschrieben, obwohl durch laterale Wurzelresorptionen auch bei dieser Messmethodik Unsicherheiten bestehen bleiben. Ansonsten ist bekannt, dass vestibuläre und orale Knochenbreite sowohl im CT (Fuhrmann 1996b) als auch im DVT (Loubele et al. 2008; Mol & Balasundaram 2008) quantitativ eingeschätzt werden können. Es existiert bereits ein Vorschlag zur Standardisierung der Datenerhebung der vestibulären und oralen Knochenbreiten (Ferreira, Garib & Cotrim-Ferreira 2010). Darin wird beschrieben, dass die Schmelz-Zement-Grenze an einem bleibenden Molaren als Referenz für die Datenerhebung an allen Zähnen eines Kiefers dienen soll. Wir haben uns dennoch dafür entschieden, für jeden Zahn eine separate Referenz zu wählen um die Genauigkeit der Mehrfachmessung zu erhöhen. Da unsere Priorität in der möglichst genauen Ermittlung der therapiebedingten Knochenveränderung für jeden einzelnen Zahn liegt, müssen resultierende Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit von Prävalenzen mit anderen Studien in Kauf genommen werden. Die vestibulo-orale Inklination wurde als Winkel zwischen der Zahnachse und der Okklusionsebene festgelegt. Die Zahnachse wurde mittels eindeutige Referenzpunkte am Zahn ebenfalls frei definiert. Die Genauigkeit dieser Winkelmessung war aufgrund der Wahl der verwendeten Schichtdicken eingeschränkt. Da sie 1,5 mm maß, waren unerwünschte Überlagerungen unumgänglich. Würde man allerdings eine schmalere Schichtdicke wählen, so wären unter der beschriebenen Messmethodik der beiden Referenzpunkte Wurzel- und Höckerspitze nur in sehr wenigen Fällen in einer Schicht auffindbar. Sie liefert dabei nur sehr limitierte Informationen über die Position eines Zahnes im Kiefer. Die Ermittlung solcher Angaben hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Da sich eine an Zahnpunkten aufgespannte Ebene wie die Okklusionsebene allerdings im Zuge der kieferorthopädischen Therapie teilweise stark ändern kann, sind Messun-

gen mit ihr als Referenzebene nur eingeschränkt aussagekräftig. Zentrales Ziel dieser Untersuchung war jedoch lediglich die Ermittlung eines richtungsweisenden Anhaltspunkts auf etwaige Zusammenhänge. In zukünftigen Arbeiten sollten reliablere Referenzebenen zur Beschreibung von Zahnbewegungen verwendet werden. Chang et al. entwickelten beispielsweise dreidimensionale Computermodelle der Kiefer um Zahnbewegungen in allen Ebenen zu detektieren (Chang et al. 2012). Radiologische Messungen sollten in zukünftigen Studien zudem durch klinische Parameter ergänzt werden.

5.2. Diskussion der Ergebnisse

5.2.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Parameter

Studien haben gezeigt, dass bei Messungen in einem DVT-Datensatz nur kleine systemische Fehler zu erwarten sind. Dabei werden die untersuchten Strukturen in der Regel leicht unterschätzt (Baumgaertel et al. 2009; Lascala et al. 2004; Loubele et al. 2008; Pinsky et al. 2006). Diese Abweichung wird erst dann signifikant, wenn man unterschiedliche Messungen kombiniert. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die erhobenen Daten eine sehr exakte Beschreibung der anatomischen Gegebenheiten darstellen.

Die Reliabilität für die vestibuläre Knochenhöhe und Knochenbreite überstieg sogar noch die in der Literatur beschriebene Zuverlässigkeit (Menezes et al. 2010; Timock et al. 2011).

5.2.2. Ausmaß der therapeutischen Inklinationsänderung

Die Verteilungen der vestibulo-oralen Inklinationen vor und nach der kieferorthopädischen Behandlung waren laut Kolmogorov-Smirnov-Test Normalverteilungen ($p=0.143$, $p=0.144$). Aufgrund der Normalverteilung der Inklinationswerte vor und nach der kieferorthopädischen Behandlung war es möglich, den T-Test für verbundene Stichproben zum Vergleich der Mittelwerte zu verwenden.

Die therapiebedingte Änderung der Inklination betrug $0,8^\circ \pm 5,6^\circ$. Wenngleich sich der Mittelwert im positiven Bereich befand, konnte aufgrund der starken Streuung keine eindeutige Tendenz im Sinne einer relativen Kippung der Zähne nach oral deklariert werden. Eine ähnlich große Streuung dieses Parameters war bei Patienten vor kieferorthopädischer Behandlung bereits bekannt (Weigang 2014). Bei vergleichbarer Messme-

thodik wurde eine mittlere prätherapeutische Inklination von $80,49^{\circ} \pm 15,45^{\circ}$ gemessen, welche leicht über den korrespondierenden Werten in dieser Studie liegt.

5.2.3. Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderungen

Vertikales Knochenangebot

Es kann festgehalten werden, dass es über den Zeitraum der Therapie bei der überwiegenden Mehrheit der untersuchten Zähne zur signifikanten Vergrößerung der Defekttiefen kam. Die vestibuläre prätherapeutische Defekttiefe betrug im Mittel 1,84 mm, auf der oralen Seite maß sie 1,28 mm. Diese Werte lagen damit etwas über den in anderen Studien ermittelten Daten (Boyle, Via & McFall 1973; Suomi et al. 1971), werden allerdings noch nicht als klinisch relevante Dehiszenztiefen bezeichnet. Dies änderte sich über den Zeitraum der Therapie, nachdem die mittlere vestibuläre Defekttiefe 2,65 mm maß. Die mittlere therapiebedingte Vergrößerung der Defekttiefen betrug vestibulär $0,82 \pm 1,47$ mm und oral $0,57 \pm 0,79$ mm. Diese Werte überstiegen in der Literatur erwähnte Korrelate leicht (Bollen et al. 2008; Bondemark 1998; Hollender et al. 1980; Janson et al. 2003; Øgaard 1988; Zachrisson & Alnaes 1974). Diese Ergebnisse bestätigen jene Studien, die feststellten, dass die posttherapeutische peridentale Knochenhöhe signifikant geringer ist als vor kieferorthopädischer Therapie (Bondemark & Kurol 1997; Brown 1973; Hamp, Lundström & Nyman 1982; Hollender et al. 1980; Janson et al. 2003; Øgaard 1988; Polson & Reed 1984; Sjølien & Zachrisson 1973; Tirk et al. 1967; Trossello & Gianelly 1979; Zachrisson & Alnaes 1973, 1974). Bei einer durchschnittlichen Behandlungsdauer von 20 Monaten und einer beschriebenen jährlichen Attachmentverlustrate von etwa 0,1 mm (Hugoson & Laurell 2000; Loe et al. 1978) lagen die Werte über dieser natürlichen Altersinvolution. Der therapiebedingte, vertikale Knochenverlust war vestibulär zudem ausgeprägter als oral. Der Anteil klinisch relevanter Defekttiefen stieg über den Zeitraum der Therapie auf der vestibulären Seite von 28,62 % auf 45,49 % und oral von 18,24 % auf 32,39 % an. Die Prävalenz der prätherapeutischen Defekttiefen über 2 mm liegt in der Literatur zwischen 23 % und 61 % (Baljoon et al. 2003; Evangelista et al. 2010; Nielsen, Glavind & Karhing 1980; Persson et al. 1998; Weigang 2014; Wouters et al. 1989), wobei auffällt, dass ein hoher Prozentsatz der Patienten zwar Dehiszenzen aufweist, diese allerdings nur selten mehr als 2 Zähne betreffen (Baljoon et al. 2003; Papapanou, Wennström & Gröndahl 1988; Rupprecht et al. 2001). Auf der oralen Seite war die Dehiszenztiefe sowohl prä- als auch posttherapeutisch signifikant kleiner als vestibulär. Die höhere Prävalenz auf der

vestibulären Seite wurde bereits in anderen Studien belegt (Edel 1981; Enhos et al. 2012; Evangelista et al. 2010; Larato 1970; Rupprecht et al. 2001; Volchansky & Cleaton-Jones 1978; Yagci et al. 2011). Besonders auffällig war die große individuelle Variation in der vertikalen Knochenhöhe, die zu einer hohen Streuung der Messwerte führte (Zachrisson & Alnaes 1974). Eine therapiebedingte Verkleinerung der vertikalen Defekttiefen konnte vestibulär bei 15,7 % und oral bei 12,9 % festgestellt werden, wobei der quantitative Knochengewinn so gering ausfällt, dass er wahrscheinlich Folge von Messungenauigkeiten ist. Dennoch sind in entsprechender Literatur durchaus Fälle mit einer signifikanten Verkleinerung der vertikalen Defekttiefe beschrieben, deren Ursache weitestgehend unbekannt ist. Eventuell lagen bei diesen Patienten initial isolierte vertikale Defekte vor, die ein höheres Potential zur Ausheilung besitzen. Außerdem ist bekannt, dass die Korrektur von Zahnstellungen bei extremen Labialständen in das Zentrum des Alveolarfortsatzes hinein eine vertikale Knochenapposition zur Folge haben kann (Engelking & Zachrisson 1982). Aber selbst in diesen Fällen tritt in den wenigsten Fällen eine Regeneration des parodontalen Halteapparates und der Weichgewebe ein.

Transversales Knochenangebot

Im Laufe der kieferorthopädischen Behandlung kam es zu einer signifikanten Verringerung in allen Parametern des transversalen Knochenangebotes. Es ist bekannt, dass der therapiebedingte Verlust an transversalem Knochen vor allem auf der Seite stattfindet, zu welcher der Zahn bewegt wird (Mulie & Ten Hove 1976; Sarikaya et al. 2002; Ten Hove & Mulie 1976; Vardimon et al. 1998; Wainwright 1973; Wehrbein et al. 1996, 1995). Auf dieser Seite tritt der Knochenverlust vor allem im zervikalen und mittleren Wurzelbereich auf (Sarikaya et al. 2002).

Andere Autoren berichten darüber, dass die vestibulo-orale Knochenbreite über den Zeitraum der Therapie konstant bleibt und sich nur die Relation des vestibulären Knochens zur oralen Knochenbreite verschiebt (DeAngelis 1970; Edwards 1976). Da in der vorliegenden Studie ein therapiebedingter transversaler Gesamtbreitenverlust von 0,56 mm und 0,69 mm auf den beiden Wurzelhöhen festgestellt wurde, konnte die oben erwähnte Theorie nicht bestätigt werden. Der therapiebedingte Knochenverlust betrug vestibulär 0,24 mm und 0,29 mm. Die therapiebedingte Änderung der Knochenbreite unterschied sich vestibulär und in der gesamten Knochenbreite hinsichtlich des Abstandes zur Schmelz-Zement-Grenze nicht signifikant. Nur bei der oralen Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze war die therapiebedingte Änderung der

Knochenbreite signifikant größer als bei allen anderen Parametern des transversalen Knochenangebotes. Dies widersprach anderen Studien, die keinen Unterschied hinsichtlich der Resorptionsaktivität auf unterschiedlichen Zahnleveln ermitteln konnten (Melsen 1999). Prinzipiell ist bekannt, dass im zervikalen Bereich des Alveolarknochens eher kortikale Strukturen vorherrschen, wohingegen im intermedialen und apikalen Bereich auch spongiöse Knochenanteile zu finden sind. Diese beiden Knochenanteile weisen unterschiedliche Mechanismen der Remodellierung auf (Oers et al. 2008; Roberts et al. 2006). Knochendichtemessungen haben gezeigt, dass die größte Reduktion der Dichte nach kieferorthopädischer Behandlung im zervikalen Bereich liegt (Chang et al. 2012), was allerdings auch durch Faktoren wie Art der Zahnbewegung und Dauer der Retention beeinflusst wird. Grundproblematik der transversalen Messung der Knochenbreite ist, dass weniger mineralisierter Geflechtknochen als Abwesenheit einer knöchernen Begrenzung missinterpretiert werden kann. Außerdem kann ein Wert von Null nicht immer als Dehiszenz gewertet werden, da es sich auch um eine Fenestration mit koronaler Knochenbedeckung handeln kann. Die Unterscheidung wurde in dieser Arbeit absichtlich unterlassen, da nur die therapiebedingte Änderung der Knochenbreite untersucht werden sollte. Die Ausbildung und Position von Fenestrationsen als Maximalform des transversalen Knochenverlustes ist abhängig von der Art und Richtung der Zahnbewegung. So haben Fuhrmann et al. herausgefunden, dass bei starken vestibulären Zahnkippen oder translatorischen Bewegungen Fenestrationsen knapp über der fazialen Wurzelspitze entstehen (Fuhrmann 1996c). Es gibt Autoren, die die Vermutung äußerten, dass sich die kortikale Knochenbegrenzung nach einer gewissen Zeit wieder regeneriert (Batenhorst 1974; Baxter 1967; Ingber 1976, 1974; Ten Hoeve & Mulie 1976), wobei andere histologische Studien keine solche Wiederherstellung feststellen konnten (Engelking & Zachrisson 1982; Karring et al. 1982; Wingard & Bowers 1976). Wieder andere Autoren konnten die Wiederherstellung der knöchernen Umgebung mit dem Auftreten eines Rezidivs assoziieren (Duterloo 1975; Edwards 1976; Wainwright 1973).

Die Messungsgenauigkeit im Bereich von 0,5 mm wird für die transversale Knochendichtemessung relativiert, da eine Knochendicke unter 0,5 mm als „Quasidefekt“ betrachtet werden kann (Evangelista et al. 2010; Handelman 1996).

5.2.4. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Alter und Geschlecht

Geschlecht

Vertikales Knochenangebot

Hinsichtlich des vertikalen Knochenangebotes und des therapiebedingten Knochenverlustes waren keine Unterschiede zwischen den Geschlechtern nachweisbar. Es wurde bereits in anderen Studien darauf hingewiesen, dass es keine geschlechtsspezifischen Unterschiede hinsichtlich der Prävalenz von knöchernen Dehiszenzen gibt (Aass & Gjermo 1992; Bondemark 1998; Bondemark & Kurol 1997; Hausmann et al. 1989; Kennedy et al. 1983; Nelson & Artun 1997; Trossello & Gianelly 1979; Weigang 2014; Zachrisson & Alnaes 1974). Der Anteil der relevanten Defekttiefen fiel in der vorliegenden Studie sowohl für Frauen als auch für Männer auf der oralen Seite geringer aus als vestibulär. Betrachtet man nur die relevanten Defekttiefen, so kam es über den therapeutischen Zeitraum zu einer Vergrößerung der Defekttiefen. Eine Ausnahme bildeten die relevanten oralen Defekttiefen, die sich ausschließlich bei den Frauen verkleinert haben. Obwohl wir keine geschlechtsspezifischen Unterschiede hinsichtlich der prätherapeutischen Defekttiefen feststellen konnten, gibt es Studien, die eine größere mittlere Defekttiefe bei Männern detektierten (Albandar & Rise 1986; Dummer et al. 1995; Gjermo et al. 1984; Weigang 2014). Allerdings konnten auch andere Autoren keinen Unterschied im Ausmaß der Defekttiefen zwischen kieferorthopädisch behandelten Männern und Frauen feststellen (Aass & Gjermo 1992; Bondemark & Kurol 1997; Hausmann et al. 1989; Kennedy et al. 1983; Nelson & Artun 1997; Trossello & Gianelly 1979).

Transversales Knochenangebot

Vor kieferorthopädischer Intervention wiesen die Männer 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze eine größere Gesamtknochenbreite auf als die Frauen, wenngleich darüber hinaus keine diesbezüglichen Unterschiede auszumachen waren. Auch posttherapeutisch wiesen die Männer breitere Knochenbreiten auf als die Frauen. Die orale Knochenbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze bildete dabei eine Ausnahme. Der weibliche Patientenanteil zeichnete sich in den Parametern der Gesamtknochenbreite und der oralen Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze außerdem durch größere therapiebedingte transversale Knochenverluste aus. Lampley et al. berichteten ebenfalls darüber, dass Frauen häufiger von Fenestrationsen betroffen sind

(Lampley 2010). Andere Autoren konnten keine geschlechtsspezifischen Unterschiede hinsichtlich der Knochenbreiten feststellen (Ferreira 2010).

Alter

Vertikales Knochenangebot

Der Anteil mit prätherapeutischen vestibulären Defekttiefen <2 mm verhielt sich in den jeweiligen Altersgruppen hinsichtlich der prozentualen Verteilung umgekehrt proportional. Außerdem wiesen sowohl die prätherapeutischen, als auch die posttherapeutischen Defekttiefen in den Altersgruppen mit höherem Durchschnittsalter vestibulär und oral größere mittlere Dehiszenzen auf als bei den jüngeren Patienten. Der therapiebedingte Verlust an vertikalem Knochen war bei den >30 -Jährigen vestibulär und oral signifikant größer als in den anderen beiden Altersgruppen, zwischen denen es dahingehend keine Unterschiede gab. Des Weiteren fiel auf, dass die relevanten Anteile der Defekttiefen über den Zeitraum der Therapie bei den <15 -Jährigen von 13,55 % auf 27,11 %, bei den 15- bis 30-Jährigen von 26,68 % auf 42,59 % und bei den >30 -Jährigen von 44,19 % auf 65,16 % signifikant anstiegen. Der prätherapeutische Anteil relevanter Defekttiefen lag hierbei über entsprechenden Werten aus der Literatur. Bei 18- bis 35-jährigen Probanden wurden Werte zwischen 0,7 und 1,5 %, bei 36- bis 68-Jährigen Werte zwischen 4,3 und 8,5 % beschrieben (Albandar & Rise 1986).

Die mittleren Defekttiefen vergrößerten sich außerdem über den Zeitraum der Therapie in Altersgruppe 2 und 3, nicht aber bei den <15 -Jährigen. Obwohl sowohl prä- als auch posttherapeutisch mit steigendem Alter auch größere Defekttiefen zu finden waren und der therapiebedingte Knochenverlust bei den Patienten über 30-Jahren signifikant größer war als in Altersgruppe 1 und 2, wiesen die Gruppen höheren Alters signifikant kleinere relevante Defekttiefen auf als jüngere Patienten. Dies steht im Gegensatz zur altersbedingten, allgemeinen Vergrößerung der Defekttiefen. Eine mögliche Ursache könnte der Zuwachs von ehemals nicht relevanten Defekttiefen über 2 mm sein, der zu einer Reduktion des Mittelwertes führen musste. Der therapiebedingte Knochenverlust nahm für die drei Altersgruppen Werte zwischen 0,5 mm und 1 mm an, was sich mit Beobachtungen aus anderen Studien deckt (Harris & Baker 1990).

In der Literatur ist ein Zusammenhang zwischen erhöhtem Alter und einer gesteigerten Prävalenz sowie Dehiszenztiefe beschrieben (Baljoon et al. 2003; Harris & Baker 1990; Nelson & Artun 1997; Weigang 2014). Ab dem dreißigsten Lebensjahr scheint die natürliche und kontinuierliche Resorption des Knochens diametrale Appositionsvorgänge

zu übersteigen (Hugoson & Laurell 2000). Persson et al. beschrieben einen kontinuierlichen Anstieg der Defekttiefen bis zum fünfundvierzigsten Lebensjahr, der anschließend konstant blieb (Persson et al. 1998). Außerdem wurde ein erhöhter mittlerer, jährlicher Knochenverlust für Patienten der Altersgruppe der 33- bis 56-Jährigen nachgewiesen (Albandar & Rise 1986).

Bei Kindern und Jugendlichen kann eine erhöhte Potenz festgestellt werden, den schädigenden Einflüssen einer festsitzenden kieferorthopädischen Therapie entgegenzuwirken (Baxter 1967; Zachrisson & Alnaes 1973), weshalb die biologischen Möglichkeiten für eine Zahnbewegung bei steigendem Alter abnehmen (Göz 1990; Reitan 1954, 1974). Im Alter verändert sich das parodontale Gewebe auch histologisch. Es tritt vermehrt dichter Lamellenknochen auf, der spongiöse Knochenanteil enthält schmalere Freiräume und weniger Zellen (Reitan 1954, 1989; Weiss 1972). Studien mit klinischen Parametern ermittelten einen mittleren jährlichen Attachmentverlust von 0,08 mm bis 0,3 mm (Axelsson & Lindhe 1978; Haffajee, Socransky & Goodson 1983; Loe et al. 1978; Suomi & Greene 1971), wohingegen radiographische Messungen einen mittleren jährlichen Knochenverlust von 0,07 mm ergaben (Rohner, Cimasoni & Vuagnat 1983; Suomi et al. 1971). Diese Vorgänge müssen bei der Evaluation von therapiebedingten Knochenverlusten bedacht werden. Der natürliche Attachmentverlust scheint bei kieferorthopädischen Patienten aber unter den Werten der Durchschnittsbevölkerung zu liegen, da eine strenge Kontrolle der Mundhygiene erfolgt. Ein klinisch signifikanter Knochenverlust wird bei Jugendlichen und sehr jungen Erwachsenen nur äußerst selten beobachtet (Aass & Albandar 1988; Albandar & Rise 1986; Dummer et al. 1995; Polson & Reed 1984). Studien beschreiben, dass das Auftreten von Fenestrationen und vertikalem Knochenverlust bei erwachsenen Patienten während einer kieferorthopädischen Therapie minimal ist, sodass der Nutzen einer solchen Behandlung die Risiken dennoch überwiegt (Brezniak & Wasserstein 1993; Handelman 1996; Harris & Baker 1990; Lupi, Handelman & Sadowsky 1996; Sjølien & Zachrisson 1973). Die Ursache der erhöhten Defekttiefen liegt wahrscheinlich in dem größeren Zeitraum idiopathischen Knochenverlustes.

Transversales Knochenangebot

Über den Zeitraum der Therapie kam es in allen Altersgruppen zu einer signifikanten Verkleinerung aller Parameter des transversalen Knochenangebotes. Prätherapeutisch bestanden auf der oralen Seite größere Knochenbreiten als vestibulär, was sich im Lau-

fe der Therapie nicht änderte. Mit höherem Durchschnittsalter sanken die mittleren Knochenbreiten, wobei es zwischen Altersgruppe 1 und 2 posttherapeutisch keine Unterschiede gab. Die einzige Ausnahme bildet die orale Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze. Im Gegensatz dazu war der transversale Knochenverlust bei allen Parametern außer eben erwähnter Ausnahme in Altersgruppe 1 jeweils größer als bei den 15- bis 30-Jährigen und >30-Jährigen. Darüber hinaus war er 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze oral insgesamt größer als vestibulär. Zehn Millimeter apikal der Schmelz-Zement-Grenze verhielt es sich umgekehrt.

Leichte Unterschiede zwischen den oralen und vestibulären Knochenbreiten wurden hinsichtlich unterschiedlicher Altersgruppen bereits in der Literatur beschrieben (Ferreira 2010). Die Prävalenz von Fenestrationen nimmt außerdem mit steigendem Alter zu (Lampley 2010).

5.2.5. Abhängigkeit der Knochenveränderungen von Kiefer und Zahngruppe

Kiefer

Vertikales Knochenangebot

Sowohl die prä- und posttherapeutischen Defekttiefen, als auch der therapiebedingte Knochenverlust waren hinsichtlich des vertikalen Knochenangebotes vestibulär ausgeprägter als oral. Zudem waren diese Parameter auf der vestibulären Seite im Unterkiefer wiederum größer als im Oberkiefer, wohingegen sie sich auf der oralen Seite nicht unterschieden. Auf der vestibulären Seite betrug der therapiebedingte Knochenverlust im Oberkiefer 0,76 mm und im Unterkiefer 0,87 mm. Das orale vertikale Knochenangebot sank im Laufe der kieferorthopädischen Behandlung zwischen 0,57 mm und 0,58 mm. Betrachtet man nur die relevanten Defekttiefen, so fällt auf, dass wieder sowohl vor- als auch nach kieferorthopädischer Intervention deutlich mehr vestibuläre Defekttiefen ≥ 2 mm vorhanden waren. Auf der vestibulären Seite im Oberkiefer vergrößerte sich der Anteil der relevanten Defekttiefen von 24,26 % auf 40,85 %. Der relevante Anteil des vestibulären Knochenangebotes im Unterkiefer stieg von 32,85 % auf 50 %. Oral stieg der relevante Anteil der Dehiszenzen im Oberkiefer von 15,96 % auf 31,7 %, wobei er im Unterkiefer von 20,45 % auf 33,06 % stieg. Signifikante Unterschiede im prätherapeutischen vertikalen Knochenangebot zwischen den Kiefern und insbesondere auf der vestibulären Seite wurden bereits in anderen Studien beschrieben (Abdelmalek & Bissada 1973; Albandar & Rise 1986; Davies et al. 1974; Edel 1981; Enhos et al. 2012; Evangelista et al. 2010; Ezawa et al. 1987; Fuhrmann 1996a; Larato

1972, 1970; Rupprecht et al. 2001; Urbani & Lombardo 1990; Volchansky & Cleaton-Jones 1978; Yagci et al. 2011). Allerdings gibt es auch Studien, die Hinweise liefern, dass es in bestimmten Personengruppen keinen Unterschied hinsichtlich der Prävalenz von Dehiszenzen zwischen den Kiefern gibt oder auch, dass Dehiszenzen im Oberkiefer tiefer sein können als im Unterkiefer (Weigang 2014). Bondemark et al. konnten außerdem keinen klinisch relevanten Unterschied zwischen den posttherapeutischen Defekttiefen im Oberkiefer und Unterkiefer feststellen (Bondemark, 1998).

Transversales Knochenangebot

Die vestibuläre prä- und posttherapeutische Knochenbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze war im Oberkiefer größer als im Unterkiefer, wobei es sich 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze genau umgekehrt verhielt. Ferreira et al. entdeckten ebenfalls, dass sich die zervikale vestibuläre Knochenlamelle im Oberkiefer breiter darstellt als im Unterkiefer (Ferreira 2010). Die orale Knochenbreite war 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze im Oberkiefer ausgeprägter als im Unterkiefer. Außerdem war der therapiebedingte Knochenverlust auf der oralen Seite sowie in der Gesamtbreite im Oberkiefer größer als im Unterkiefer. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Erfahrungen anderer Autoren, die eine erhöhte Prävalenz von Fenestrationsen im Oberkiefer feststellten (Abdelmalek & Bissada 1973; Davies et al. 1974; Edel 1981; Enhos et al. 2012; Evangelista et al. 2010; Ezawa et al. 1987; Fuhrmann 1996a; Larato 1972, 1970; Rupprecht et al. 2001; Urbani & Lombardo 1990; Volchansky & Cleaton-Jones 1978; Yagci et al. 2011).

Zahngruppe

Vertikales Knochenangebot

Es kann festgehalten werden, dass prätherapeutisch vestibulär lediglich die Unterkieferschneidezähne und die Unterkiefereckzähne sowie oral ausschließlich die Unterkieferschneidezähne signifikant größere Defekttiefen aufwiesen als andere Zahngruppen. Nach kieferorthopädischer Intervention verhalten sich die Zahngruppen diesbezüglich heterogener. Vestibulär stellten sich die Defekttiefen der Unterkieferschneidezähne, Unterkiefereckzähne und Oberkiefereckzähne als signifikant größer heraus als bei den Unterkiefermolaren, den Oberkiefermolaren und den Oberkieferprämolaren. Zudem wiesen die Unterkiefer- und Oberkiefermolaren kleinere Defekttiefen auf als die Unterkieferprämolaren. Auf der oralen Seite waren die Defekttiefen der Unterkieferschneide-

zähne immer noch signifikant größer als bei allen anderen Zahngruppen, wobei die Oberkieferprämolaren zusätzlich tiefere Defekte aufwiesen als die Unterkiefer Eckzähne, Unterkiefermolaren und Unterkieferprämolaren. Die therapiebedingte Änderung war bei den Unterkieferschneidezähnen vestibulär mit -1,16 mm außerdem größer als bei den Unterkiefer- und Oberkiefermolaren, den Oberkieferprämolaren sowie den Oberkieferschneidezähnen. Auf der oralen Seite waren es ebenfalls die Unterkieferschneidezähne, bei denen sie signifikant größer ausfiel als bei den Unterkiefermolaren, den Unterkiefer Eckzähnen, den Unterkieferprämolaren und den Oberkieferschneidezähnen. Die größten Defekttiefen der klinisch relevanten Anteile waren vestibulär bei den Unterkieferschneidezähnen und Unterkiefer Eckzähnen sowie oral bei den Unterkieferschneidezähnen zu finden. Die größte prozentuale Zunahme des relevanten Anteiles war vestibulär bei den Oberkiefer Eckzähnen mit 26,67 % und oral bei den Oberkieferprämolaren mit 20 % zu verzeichnen. Den größten therapiebedingten Knochenverlust wiesen vestibulär ebenfalls die Oberkiefer Eckzähne und oral die Unterkieferschneidezähne auf. Als besonders gefährdete Zahngruppen wiesen die Oberkiefer Eckzähne, die Unterkieferprämolaren, die Unterkiefer Eckzähne und die Unterkieferschneidezähne auf der vestibulären Seite prätherapeutisch mehr als 30 %, posttherapeutisch mehr als 50 % relevante Dehiszenztiefen auf und imponieren durch einen mittleren therapiebedingten Zuwachs an relevanten Defekttiefen von mehr als 18 %. Dies widerspricht Studien, die ein überwiegendes Auftreten von vertikalen Defekten im posterioren Bereich, vor allem des Oberkiefers, beschreiben (Abdelmalek & Bissada 1973; Baljoon et al. 2003; Edel 1981; Larato 1970; Stahl, Cantor & Zwig 1963) und stimmt größtenteils mit Autoren überein, die das vermehrte Auftreten von vestibulären Dehiszenzen im Front- und Eckzahnbereich vor allem im Unterkiefer detektierten (Abdelmalek & Bissada 1973; Albandar & Rise 1986; Edel 1981; Elliott & Bowers 1963; Enhos et al. 2012; Fuhrmann 2002; Larato 1970; Loe et al. 1992; Lupi et al. 1996; Papapanou et al. 1988; Ramfjord 1961; Rohner et al. 1983; Rupprecht et al. 2001; Schei et al. 1959; Stahl et al. 1963; Yagci et al. 2011), obwohl sie meist auch eine erhöhte Prävalenz an Oberkiefermolaren ausmachten, die in dieser Arbeit nicht aufgedeckt werden konnte. Die vorliegende Arbeit liefert Prävalenzen für prätherapeutisch klinisch relevante Dehiszenzen, die sehr stark den Ergebnissen von Evangelista et al. ähneln. Sie beschreiben die Unterkieferfrontzähne mit Prävalenzen von 17,13 % bis 24,33 % und die Oberkiefer Eckzähne, die ersten Oberkieferprämolaren sowie die ersten Oberkiefermolaren mit Häufigkeiten von 17,13 % bis 18,45 % als die vornehmlich betroffenen Zahngruppen. Auf der oralen Sei-

te fielen vor allem die Unterkieferschneidezähne, die Oberkiefereckzähne und die ersten Oberkieferprämolaren durch eine erhöhte Prävalenz auf (Evangelista et al. 2010). Yagci et al. lieferten vergleichbare Ergebnisse (Yagci et al. 2011).

Vor allem Frontzahnbewegungen im Unterkiefer erfordern aufgrund von möglichen therapiebedingten Knochenverlusten eine besondere Vorsicht (Årtun & Krogstad 1987; Dorfman 1978; Evangelista et al. 2010; Melsen & Allais 2005; Mostafa, El Sharaby & El Beialy 2009; Ruf, Hansen & Pancherz 1998; Wehrbein et al. 1996; Yared, Zenobio & Pacheco 2006). Die Forderung nach einer dreidimensionalen Einschätzung der knöchernen Grundlagen bei Patienten mit einem hohen Bedarf an therapeutischer Zahn- bewegung in Richtung bukkal und prätherapeutisch schmaler befestigter Gingiva erscheint in Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse als gerechtfertigt (Evangelista et al. 2010; Mostafa et al. 2009).

Transversales Knochenangebot

Es fiel auf, dass 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze vor kieferorthopädischer Behandlung vestibulär vor allem die Unterkieferschneidezähne und Unterkiefereckzähne signifikant kleinere Knochenbreiten aufwiesen als die übrigen Zahngruppen, wobei oral insbesondere die Unterkieferprämolaren durch ihre große Knochenbreite imponierten. 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze waren es vestibulär vornehmlich die Oberkiefereckzähne und oral die Oberkiefermolaren, die Unterkieferschneidezähne und Unterkiefereckzähne, bei denen kleinere prätherapeutische Knochenbreiten nachweisbar waren. Über den Zeitraum der Therapie blieben vorher signifikant kleinere Knochenbreiten erhalten, es kamen allerdings zusätzliche Zahngruppen hinzu. Es entstanden also mehr Unterschiede zwischen ihnen. Oral und vestibulär waren es unterschiedliche Zahngruppen, die signifikant kleinere oder größere Knochenbreiten aufwiesen. Mit einigen Ausnahmen waren sowohl prä- als auch posttherapeutisch oral breitere Knochenbreiten als vestibulär vorzufinden, was bereits in anderen Studien beschrieben wurde (Ferreira 2010; Garib et al. 2010; Kim, Park & Kook 2009). Der therapiebedingte Knochenverlust war 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze vor allem oral bei den Oberkieferprämolaren und 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze größer als bei Zahngruppen mit initial kleinen Knochenbreiten wie den Unterkieferschneidezähnen und –eckzähnen. 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze war er vestibulär insbesondere bei den Oberkiefermolaren und oral bei den Oberkieferprämolaren stark ausgeprägt, wenngleich es keinen Unterschied zwischen den Zahngruppen in der diesbe-

züglichen Gesamtbreite gab. Bei einigen Zahngruppen war der therapiebedingte Verlust an transversalem Knochen auf der oralen Seite ausgeprägter als vestibulär. Außerdem war er bei den Oberkiefermolaren, Oberkieferprämolaren und Oberkiefer Eckzähnen hinsichtlich der Gesamtknochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze größer als 5 mm weiter zervikal. Es gibt momentan wenige Studien, die direkte Knochenbreiten radiologisch evaluierten. Allerdings konnte bestätigt werden, dass das anteriore Zahnsegment des Oberkiefers breitere orale Knochendicken aufweist als der Unterkiefer (Ferreira 2010). Die prätherapeutischen Knochenbreiten erschienen in ihrer Studie etwas kleiner als in dieser Studie, wobei hierbei eine etwas andere Messmethodik gewählt wurde. Oftmals wurden Untersuchungen zur Häufigkeit und zum Ausmaß von Fenestrationen unternommen. Am häufigsten waren obere erste Prämolaren und erste Molaren, laterale Inzisivi sowie Eckzähne von Fenestrationen betroffen (Abdelmalek & Bissada 1973; Davies et al. 1974; Edel 1981; Elliott & Bowers 1963; Enhos et al. 2012; Evangelista et al. 2010; Yagci et al. 2011). Dieses Phänomen konnte durch die vorliegenden Ergebnisse nicht belegt werden.

5.2.6. Korrelation zwischen Ausgangssituation und therapeutischem Effekt

Durch die univariate Varianzanalyse wurde der Effekt prätherapeutischer, vestibulärer Defekttiefen auf den therapiebedingten, vestibulären Knochenverlust geprüft. Insgesamt erklärte das Modell 0,4 % (beziehungsweise korrigiert 0,3 %) der Varianz in der abhängigen Variable des therapiebedingten Knochenverlustes. Es ergab sich keine signifikante Varianzaufklärung durch das Gesamtmodell ($F=3,798$; $df=1$; $p=0,052$). Es konnte also ebenfalls kein signifikanter Effekt der Kovariaten nachgewiesen werden.

Viele Studien evaluierten den therapiebedingten Knochenverlust über den Vergleich gleichaltriger Patienten mit beziehungsweise ohne ehemalige kieferorthopädische Intervention. Dabei blieb die Frage offen, ob beobachtete Unterschiede nicht schon vor der Behandlung existierten (Polson & Reed 1984; Sjølien & Zachrisson 1973; Zachrisson & Alnaes 1974). In der vorliegenden Studie konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der vertikalen vestibulären Vorschädigung und der Größe des therapiebedingten Knochenverlustes nachgewiesen werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit Beschreibungen aus anderen Studien (Hollender et al. 1980; Lindhe, Haffaiee & Socransky 1983). Gleichwohl beobachteten andere Autoren bei reduziertem initialen Knochen- beziehungsweise Attachmentniveau einen erhöhten therapiebedingten Knochenverlust oder behandlungsbedingte Nebenwirkungen (Diedrich, Wehrbein &

Schneider 1992; Fuhrmann 1996c; Melsen, Agerbæk & Markenstam 1989; Nelson & Artun 1997; Wehrbein et al. 1996, 1995). Außerdem wurde bei parodontal vorgeschädigten Patienten festgestellt, dass der physiologische Knochenverlust bei initialen Vorschäden steigt, wodurch wiederum ein erhöhtes Risiko zur Ausbildung schwerer knöcherner Defekte resultiert (Albandar & Rise 1986; Rohner et al. 1983). Dass dieser Zusammenhang bei kieferorthopädischen Patienten nicht nachgewiesen werden konnte, kann einerseits an dem gesteigerten Hygieneaufwand liegen, andererseits ist das junge Durchschnittsalter mit der dementsprechend höheren regenerativen Potenz zu bedenken.

5.2.7. Korrelation zwischen horizontalen und vertikalen Therapieeffekten

Ein positiver vertikaler, therapiebedingter Knochenverlust auf der oralen Seite war in leichtem Maße linear mit einer negativen Änderung in der oralen transversalen Knochenbreite, sowie der Änderung der gesamten Knochenbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze korreliert. Außerdem existierte eine Wechselbeziehung zwischen einer positiven Änderung der vestibulären und einer negativen Änderung der oralen Knochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze.

Es muss also davon ausgegangen werden, dass die therapiebedingte Änderung der Gesamtbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze und der oralen Knochenbreiten negativ mit dem oralen, vertikalen Knochenverlust korrelieren. Vergrößern sich die oralen Knochendehiszenzen, ist mit einer Verkleinerung der oralen Knochenbreiten zu rechnen. Dieser Zusammenhang konnte für die vestibuläre Seite nicht nachgewiesen werden. Eine zu geringe Stichprobenanzahl mit entsprechenden Bewegungsmustern kommt als Ursache dafür in Betracht. Auch andere Autoren haben eine Korrelation des Ausmaßes an transversalem Knochenverlust mit einem vertikalen Knochenabbau hergestellt (Persson et al. 1998). In der Literatur wird die Prädisposition zur Ausbildung von Dehiszenzen mit einem geringen transversalen Knochenangebot und einer exzentrischen Zahnstellung assoziiert (Fuhrmann 1996c).

5.2.8. Korrelation zwischen Zahnbewegung und Therapieeffekten

Eine positive Inklinationsänderung, also eine relative Kippung der Zahnkrone nach oral, korrelierte in gewissem Grad linear mit einer positiven Änderung in der oralen Knochenbreite sowie in der Gesamtknochenbreite 5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze.

Eine positive Inklinationsänderung, also ein vestibulärer Wurzeltorque, korrelierte also mit einer Verkleinerung der vestibulären und einer Vergrößerung der oralen Knochenbreite sowie der Gesamtknochenbreite 10 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die therapiebedingte Änderung der vestibulo-orale Inklination zwar keine Korrelation mit dem Ausmaß der therapiebedingten Änderung im vertikalen aber durchaus mit derjenigen im transversalen Knochenangebot aufwies. Die Knochenfläche, in die eine Wurzel gekippt wird, schien im apikalen Bereich dünner zu werden. An der entgegengesetzten Seite verbreiterte sich die Knochenlamelle sowohl im zervikalen als auch im apikalen Bereich. Diese Beobachtung stimmt mit den Erkenntnissen anderer Autoren überein, die die größte Reduktion der Knochendichte an den Knochenabschnitten beschrieben, in welche der Zahn bewegt wird (Chang et al. 2012). Auf der entgegengesetzten Seite konnte darüber hinaus eine Dichtezunahme registriert werden. In einer neueren Studie konnte weder ein linearer- noch ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen der Zahninklination und dem Ausmaß von Knochendehiszenzen nachgewiesen werden (Weigang 2014). Die Evaluation der Inklinationsänderung ist sinnvoll, da das Maß der rein horizontalen beziehungsweise vertikalen Zahnbewegung nicht immer mit dem Maß des therapiebedingten Knochenverlustes assoziiert ist (Nelson & Artun 1997) und die Morphologie des Alveolarfortsatzes durch die Inklination der Zähne signifikant beeinflusst wird (Yamada et al. 2007; Yu et al. 2009). Dies ist vor allem dann zu bedenken, wenn die Inklinationsänderung als Alternative zur Extraktionstherapie erwogen wird.

5.3. Schlussfolgerungen

Die Forderung nach einer dreidimensionalen Einschätzung der individuellen knöchernen Grundlagen bei Patienten mit einem erhöhten Bedarf an therapeutischer Zahnbewegung in Richtung bukkal und prätherapeutisch schmaler befestigter Gingiva erscheint in Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse als gerechtfertigt, da selbst der durchschnittliche kieferorthopädische Patient eine therapiebedingte Reduktion im vertikalen und transversalen Knochenangebot aufweist. Das Geschlecht beeinflusst den Knochenverlust nicht, allerdings kann anhand der vorliegenden Ergebnisse bei den Patienten über 30 Jahren ein erhöhter radiologischer Diagnosebedarf abgeleitet werden. Obwohl keine statistische Signifikanz für die Probanden unter 15 Jahren vorliegt, weist auch diese Altersgruppe durch die große Streuung der Messwerte auf das Vorhandensein von Individuen mit einem erhöhten Risiko für therapiebedingten Knochenverlust hin. Durch das neue IADR-Konzept in der DVT-Technologie kann allerdings auch das Knochenangebot dieser Patienten heutzutage strahlungsarm untersucht werden. Die vestibuläre Knochenlamelle ist insbesondere bei den Oberkiefer Eckzähnen, Unterkieferprämolaren, Unterkiefer Eckzähnen sowie den Unterkieferschneidezähnen von therapiebedingtem Knochenverlust betroffen und sollte daher in diesen Bereichen bei der Therapieplanung besonders berücksichtigt werden. Bei Patienten mit parodontaler Vorschädigung ist keine erhöhte therapiebedingte Knochenreduktion zu erwarten. Eine therapeutische Inklinationsänderung der Zähne scheint mit gesteigerten Abbauprozessen im transversalen Knochenangebot zu korrelieren. Von einer erhöhten Änderung der vertikalen Defekttiefen muss im Gegensatz dazu nicht ausgegangen werden. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse erscheint es sinnvoll, die von Andrews postulierten sechs Schlüssel der normalen Okklusion um das peridentale Knochenangebot als siebente Komponente zu erweitern.

6. Literaturverzeichnis

- Aass, A., Albandar, J. (1988). Variation in prevalence of radiographic alveolar bone loss in subgroups of 14-year-old schoolchildren in Oslo. *Journal of Clinical Periodontology*, 15(2), 130–133.
- Aass, A., Gjermo, P. (1992). Changes in radiographic bone level in orthodontically treated teenagers over a 4-year period. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 20(2), 90–93.
- Abdelmalek, R., Bissada, N. (1973). Incidence and distribution of alveolar bony dehiscence and fenestration in dry human Egyptian jaws. *Journal of Periodontology*, 44(9), 586–588.
- Aboudara, C., Hatcher, D., Nielsen, I., Miller, A. (2003). A three-dimensional evaluation of the upper airway in adolescents. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 6(s1), 173–175.
- Ahlqvist, J., Eliasson, S., Welander, U. (1986). The effect of projection errors on cephalometric length measurements. *The European Journal of Orthodontics*, 8(3), 141–148.
- Ainamo, A., Ainamo, J., Poikkeus, R. (1981). Continuous widening of the band of attached gingiva from 23 to 65 years of age. *Journal of Periodontal Research*, 16(6), 595–599.
- Akesson, L. (1991). Panoramic radiography in the assessment of the marginal bone level. *Swedish Dental Journal. Supplement*, 78(1), 1–129.
- Akesson, L., Håkansson, J., Rohlin, M., Zöger, B. (1993). An evaluation of image quality for the assessment of the marginal bone level in panoramic radiography. A comparison of radiographs from different dental clinics. *Swedish Dental Journal*, 17(1-2), 9–21.
- Albandar, J., Rise, J. (1986). Radiographic quantification of alveolar bone level changes. *Journal of Clinical Periodontology*, 13(3), 195–200.
- Alstad, S., Zachrisson, B. U. (1979). Longitudinal study of periodontal condition associated with orthodontic treatment in adolescents. *American Journal of Orthodontics*, 76(3), 277–286. doi:10.1016/0002-9416(79)90024-1.
- Altman, D. (1991). *Practical Statistics for Medical Research* (Vol. 1990, p. 168). CRC Press.
- Anatome Inc. (2011). *InvivoDental 5 . 1 Reference Manual*.
- Årtun, J., Krogstad, O. (1987). Periodontal status of mandibular incisors following excessive proclination A study in adults with surgically treated mandibular

- prognathism. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 91(3), 225–232.
- Årtun, J., Krogstad, O., Little, R. M. (1990). Stability of mandibular incisors following excessive proclination: a study in adults with surgically treated mandibular prognathism. *The Angle Orthodontist*, 60(2), 99–106.
- Årtun, J., Urbye, K. S. (1988). The effect of orthodontic treatment on periodontal bone support in patients with advanced loss of marginal periodontium. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 93(2), 143–148.
- Atack, N., Sandy, J., Addy, M. (1996). Periodontal and Microbiological Changes Associated With the Placement of Orthodontic Appliances. A Review*. *Journal of Periodontology*, 67(2), 78–85.
- Axelsson, P., Lindhe, J. (1978). Effect of controlled oral hygiene procedures on caries and periodontal disease in adults. *Journal of Clinical Periodontology*, 5(2), 133–151.
- Baker, D. L., Seymour, G. J. (1976). The possible pathogenesis of gingival recession. A histological study of induced recession in the rat. *Journal of Clinical Periodontology*, 3(4), 208–219.
- Baljoon, M., Natto, S., Bergstrom, J. (2003). Occurrence of vertical bone defects in dentally aware individuals. *Acta Odontologica*, 61(1), 47–51.
- Ballrick, J. W., Palomo, J. M., Ruch, E., Amberman, B. D., Hans, M. G. (2008). Image distortion and spatial resolution of a commercially available cone-beam computed tomography machine. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 134(4), 573–582.
- Batenhorst, K. (1974). Tissue changes resulting from facial tipping and extrusion of incisors in monkeys. *Journal of Periodontology*, 45(9), 660–668.
- Baumgaertel, S., Palomo, J. M., Palomo, L., Hans, M. G. (2009). Reliability and accuracy of cone-beam computed tomography dental measurements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 136(1), 19–25.
- Baumrind, S., Korn, E. L., Isaacson, R. J., West, E. E., Molthen, R. (1983). Superimpositional assessment of treatment-associated changes in the temporomandibular joint and the mandibular symphysis. *American Journal of Orthodontics*, 84(6), 443–465.
- Baumrind, S., Miller, D., Molthen, R. (1976). The reliability of head film measurements: 3. Tracing superimposition. *American Journal of Orthodontics*, 70(6), 617–644.
- Baxter, D. (1967). The Effect Of Orthodontic Treatment On Alveolar Bone Adjacent To The Cemento-Enamel Junction. *The Angle Orthodontist*, 37(1), 35–47.

- Bien, S. M. (1966). Hydrodynamic damping of tooth movement. *Journal of Dental Research*, 45(3), 907–914.
- Bollen, A., Cunha-Cruz, J., Bakko, D. W., Huang, G. J., Hujoel, P. P. (2008). The effects of orthodontic therapy on periodontal health: a systematic review of controlled evidence. *The Journal of the American Dental Association*, 139(4), 413–422.
- Bondemark, L. (1998). Interdental bone changes after orthodontic treatment: a 5-year longitudinal study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 114(1), 25–31.
- Bondemark, L., Kurol, J. (1997). Proximal alveolar bone level after orthodontic treatment with magnets, superelastic coils and straight-wire appliances. *The Angle Orthodontist*, 67(1), 7–14.
- Bosshardt, D. D., Schroeder, H. E. (1992). Initial formation of cellular intrinsic fiber cementum in developing human teeth. *Cell and Tissue Research*, 267(2), 321–335.
- Bosshardt, D. D., Selvig, K. A. (1997). Dental cementum: the dynamic tissue covering of the root. *Periodontology 2000*, 13(1), 41–75.
- Bosshardt, D. D., Schroeder, H. E. (1991). Establishment of acellular extrinsic fiber cementum on human teeth. *Cell and Tissue Research*, 263(2), 325–336.
- Boyle, W. D., Via, W. F., McFall, W. T. (1973). Radiographic analysis of alveolar crest height and age. *Journal of Periodontology*, 44(4), 236–243.
- Brezniak, N., Wasserstein, A. (1993). Root resorption after orthodontic treatment: Part 1. Literature review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 103(1), 62–66.
- Brezniak, N., Wasserstein, A. (1993). Root resorption after orthodontic treatment: Part 2. Literature review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 103(2), 138–146.
- Brown, I. S. (1973). The Effect of Orthodontic Therapy on Certain Types of Periodontal Defects I—Clinical Findings. *Journal of Periodontology*, 44(12), 742–756.
- Buchner, H. (1949). An Answer To Some Criticisms of Treatment Following Bicuspid Extractions*. *The Angle Orthodontist*, 19(1), 23–47.
- Burket, L. W. (1963). The effects of orthodontic treatment on the soft periodontal tissues. *American Journal of Orthodontics*, 49(9), 660–671.
- Carter, L., Calamel, A., Haller, A., Aguirre, A. (1998). Seasonal variation in maxillary antral pseudocysts in a general clinic population. *Dentomaxillofacial Radiology*, 27(1), 22–24.

- Chang, H.-W., Huang, H.-L., Yu, J.-H., Hsu, J.-T., Li, Y.-F., Wu, Y.-F. (2012). Effects of orthodontic tooth movement on alveolar bone density. *Clinical Oral Investigations*, 16(3), 679–688.
- Chung, C. B., Tsiklakis, K., Donta, et al. (2005). Dose reduction in maxillofacial imaging using low dose Cone Beam CT. *European Journal of Radiology*, 56(3), 413–417.
- Cohnen, M., Kemper, J., Möbes, O., Pawelzik, J., Mödder, U. (2002). Radiation dose in dental radiology. *European Radiology*, 12(3), 634–637.
- Dahlberg, G. (1940). *Statistical methods for medical and biological students. Statistical Methods for Medical and Biological Students* (p. 232). London: George Allen & Unwin Ltd.
- Dalchow, C., Weber, A. (2006). Digital volume tomography: radiologic examinations of the temporal bone. *American Journal of Roentgenology*, 186(2), 416–423.
- Davies, R. M., Downer, M. C., Hull, P. S., Lennon, M. A. (1974). Alveolar defects in human skulls. *Journal of Clinical Periodontology*, 1(2), 107–111.
- DeAngelis, V. (1970). Observations on the response of alveolar bone to orthodontic force. *American Journal of Orthodontics*, 58(3), 284–294.
- Deutschland, B. (1973). Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung - RöV). *Bundesgesetzbl. Teil I*, 18, 1–43.
- Diedrich, P. (1990). Biomechanische Prinzipien für orthodontische Bewegungen bei reduziertem Attachment. *Dtsch. Zahnärztl*, 45, 78–91.
- Diedrich, P. (1995). Probleme und Risiken bei der Bewegung von Unterkieferfrontzähnen. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 56(3), 148–156.
- Diedrich, P. (1996). Präprothetische Kieferorthopädie. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 57(2), 102–116.
- Diedrich, P. (2000). *Praxis der Zahnheilkunde. Studienausgabe Bd. 11/I, Kieferorthopädie I - Orofaziale Entwicklung und Diagnostik.* (Urban & Fischer, Ed.) *Praxis der Zahnheilkunde. Urban und Fischer Verlag, ...* (4th ed., Vol. 4, pp. 1–330). München.
- Diedrich, P. (2000). *Praxis der Zahnheilkunde. Studienausgabe Bd. 11/II, Kieferorthopädie II - Therapie.* (E. GmbH, Ed.) (4th ed., Vol. 2000, pp. 1–401). München: Urban & Fischer.
- Diedrich, P., Wehrbein, H., Schneider, B. (1992). Zur Problematik der orthodontischen Intrusion parodontal erkrankter Zähne. *Parodontologie*, 2, 87–102.
- Dorfman, H. S. (1978). Mucogingival changes resulting from mandibular incisor tooth movement. *American Journal of Orthodontics*, 74(3), 286–297.

- Dreyer, C. (1970). The stability of the dentition and the integrity of its supporting structures. *American Journal of Orthodontics*, 58(5), 433–447.
- Düker, J. (2000). *Röntgendiagnostik mit der Panoramaschichtaufnahme* (p. 407). Georg Thieme Verlag.
- Dummer, P. M. H., Jenkins, S. M., Newcombe, R. G., Addy, M., Kingdon, A. (1995). An assessment of approximal bone height in the posterior segments of 15–16-year-old children using bitewing radiographs. *Journal of Oral Rehabilitation*, 22(4), 249–255.
- Duterloo, H. (1975). The impact of orthodontic treatment procedures on the remodelling of alveolar bone. *Studieweek*, 66, 5–23.
- Edel, A. (1981). Alveolar bone fenestrations and dehiscences in dry Bedouin jaws. *Journal of Clinical Periodontology*, 8(6), 491–499.
- Edwards, J. G. (1976). A study of the anterior portion of the palate as it relates to orthodontic therapy. *American Journal of Orthodontics*, 69(3), 249–273.
- Eickholz, P., Dannewitz, B. (2012). Glossar der Grundbegriffe für die Praxis Anatomie des Parodonts. *Parodontologie*, 23(4), 415–420.
- Eickholz, P., Hausmann, E. (2000). Accuracy of radiographic assessment of interproximal bone loss in intrabony defects using linear measurements. *European Journal of Oral Sciences*, 108(1), 70–73.
- Eley, B. M., Cox, S. W. (1998). Advances in periodontal diagnosis. 1. Traditional clinical methods of diagnosis. *British Dental Journal*, 184(1), 12–16.
- Eliasson, L. A., Hugoson, A., Kurol, J., Siwe, H. (1982). The effects of orthodontic treatment on periodontal tissues in patients with reduced periodontal support. *The European Journal of Orthodontics*, 4(1), 1–9.
- Elliott, J., Bowers, G. (1963). Alveolar dehiscence and fenestration. *Periodontics*, 1, 245–248.
- Engelking, G., Zachrisson, B. U. (1982). Effects of incisor repositioning on monkey periodontium after expansion through the cortical plate. *American Journal of Orthodontics*, 82(1), 23–32.
- Enhos, S., Uysal, T., Yagci, A., Veli, İ., Ucar, F. I., Ozer, T. (2012). Dehiscence and fenestration in patients with different vertical growth patterns assessed with cone-beam computed tomography. *The Angle Orthodontist*, 82(5), 868–874.
- Ens, S., Ulrici, J., Hell, E., Buzug, T. M. (2010). Automatic detection of patient motion in cone-beam computed tomography. In *Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2010 IEEE International Symposium on. IEEE* (pp. 1257–1260). IEEE.

- Evangelista, K., Vasconcelos, K. D. F., Bumann, A., Hirsch, E., Nitka, M., Silva, M. A. G. (2010). Dehiscence and fenestration in patients with Class I and Class II Division 1 malocclusion assessed with cone-beam computed tomography. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 138(2), 133–135.
- Evans, C. A. (2013). Clinical recommendations regarding use of cone beam computed tomography in orthodontics. Position statement by the American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology*, 116, 238–257.
- Ezawa, T., Sano, H., Kaneko, K., Hiruma, S., Fujikawa, K., Murai, S. (1987). The correlation between the presence of dehiscence or fenestration and the severity of tooth attrition in contemporary dry Japanese adult skulls--Part I. *The Journal of Nihon University School of Dentistry*, 29(1), 27–34.
- Feneis, H. (1952). Anatomy and physiology of the normal gingiva. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 7(8), 467–476.
- Fernandes, L. M., Øgaard, B., Skoglund, L. (1998). Pain and discomfort experienced after placement of a conventional or a superelastic NiTi aligning archwire. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 59(6), 331–339.
- Ferreira, M. C. (2010). Avaliação da espessura das tábuas ósseas alveolar vestibular e lingual dos maxilares, por meio da Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico (Cone Beam). *Unicid.br*.
- Ferreira, M. C., Garib, D., Cotrim-Ferreira, F. (2010). Padronização de um método para mensuração das tábuas ósseas vestibular e lingual dos maxilares na Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico (Cone Beam); Method standardization of buccal and palatal arch bone plate measurement using Cone Beam Computed Tom. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 15(1), 49.e1–49.e7.
- Fleiner, J., Hannig, C., Schulze, D., Stricker, A., Jacobs, R. (2012). Digital method for quantification of circumferential periodontal bone level using cone beam CT. *Clinical Oral Investigations*, 1–8.
- Fleischer-Peters, A. (1963). Die Anwendung von Röntgenübersichtsaufnahmen in der Kieferorthopädie. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 24(2), 150–155.
- Folio, J., Rams, T. E., Keyes, P. H. (1985). Orthodontic therapy in patients with juvenile periodontitis: Clinical and microbiologic effects. *American Journal of Orthodontics*, 87(5), 421–431.
- Freisfeld, M., Drescher, D., Kobe, D., Schüller, H. (1998). Assessment of the space for the lower wisdom teeth. *Journal of Orofacial Orthopedics/ Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 59(1), 17–28.
- Frost, H. M. (1965). The Laws of Bone Structure. *The American Journal of the Medical Sciences*, 249(2), 245.

- Fu, K.-Y., Zhang, W.-L., Liu, D.-G., Chen, H.-M., Ma, X.-C. (2007). Cone beam computed tomography in the diagnosis of temporomandibular joint osteoarthritis. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi = Zhonghua Kouqiang Yixue Zazhi = Chinese Journal of Stomatology*, 42(7), 417–420.
- Fuhrmann, R. (1996a). Three-dimensional interpretation of alveolar bone dehiscences. An anatomical-radiological study--Part I. *Journal of Orofacial Orthopedics= Fortschritte Der Kieferorthopädie: Organ/official Journal Deutsche Gesellschaft Für Kieferorthopädie*, 57(2), 62–74.
- Fuhrmann, R. (1996b). Three-dimensional interpretation of labiolingual bone width of the lower incisors. Part II. *Journal of Orofacial Orthopedics= Fortschritte Der Kieferorthopädie : Organ/official Journal Deutsche Gesellschaft Für Kieferorthopädie*, 57(3), 168–185.
- Fuhrmann, R. (1996c). Three-dimensional interpretation of periodontal lesions and remodeling during orthodontic treatment. Part III. *Journal of Orofacial Orthopedics= Fortschritte Der Kieferorthopädie: Organ/official Journal Deutsche Gesellschaft Für Kieferorthopädie*, 57(4), 224–237.
- Fuhrmann, R. (2002). Three-dimensional evaluation of periodontal remodeling during orthodontic treatment. *Seminars in Orthodontics*, 8(1), 23–28.
- Fuhrmann, R., Schnappauf, A., Diedrich, P. (1995). Three-dimensional imaging of craniomaxillofacial structures with a standard personal computer. *Dentomaxillofacial Radiology*, 24(4), 260–263.
- Fuhrmann, R., Bücken, A., Diedrich, P. (1997). Furcation involvement: comparison of dental radiographs and HR-CT-slices in human specimens. *Journal of Periodontal Research*, 32(5), 409–418.
- Fuhrmann, R., Bücken, A., Diedrich, P. (1995). Assessment of alveolar bone loss with high resolution computed tomography. *Journal of Periodontal Research*, 30(4), 258–263.
- Fuhrmann, R., Wehrbein, H., Langen, H. J., Diedrich, P. (1995). Assessment of the dentate alveolar process with high resolution computed tomography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 24(1), 50–54.
- Fuhrmann, R., Bücken, A., Diedrich, P. (1997). Dreidimensionale Interpretation des parodontalen Knochenabbaus. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 52, 112–118.
- Fuhrmann, R., Feifel, H., Schnappauf, A., Diedrich, P. (1996). Integration of three-dimensional cephalometry and 3D-skull models in combined orthodontic/surgical treatment planning. *Journal of Orofacial Orthopedics= Fortschritte Der Kieferorthopädie: Organ/official Journal Deutsche Gesellschaft Für Kieferorthopädie*, 57(1), 32–45.

- Fuhrmann, R., Klein, H. M., Wehrbein, H., Guenther, R. W. (1993). High resolution computer tomography of facial and oral bone dehiscences. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 48(1), 242.
- Fuhrmann, R., Langen, H.-J., Günther, R., Diedrich, P. (1994). Radiologische Diagnostik artifizierlicher intraalveolärer Knochendefekte. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 49, 336.
- Galanski, M. (1974). Panorama-Röntgenaufnahmen der Kiefer [Anatomie und Indikationsstellung]. *Röntgen Bl*, 27, 523.
- Gargiulo, A. W., Wentz, F. M., Orban, B. (1961). Dimensions and relations of the dentogingival junction in humans. *Journal of Periodontology*, 32(3), 261–267.
- Garib, D. G., Yatabe, M. S., Ozawa, T. O., Silva Filho, O. G. D. (2010). Alveolar bone morphology under the perspective of the computed tomography: defining the biological limits of tooth movement. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 15(5), 192–205.
- Gjeramo, P., Bellini, H., Santos, V. P., Martins, J. G., Ferracyoli, J. R. (1984). Prevalence of bone loss in a group of Brazilian teenagers assessed on bite-wing radiographs. *Journal of Clinical Periodontology*, 11(2), 104–113.
- Goldman, H. M., Cohen, D. W. (1968). *Periodontal therapy* (p. 1072). Saint Louis: C. V. Mosby Co.
- Gomes-Filho, I. S., Sarmiento, V. A., De Castro, M. S., et al. (2007). Radiographic features of periodontal bone defects: evaluation of digitized images. *Dentomaxillofacial Radiology*, 36(5), 256–262.
- Göz, G. (1989). Zelluläre Reaktionen auf kieferorthopädische Kraftapplikation. *Sonderheft Fortschr Kieferorthop*, 50, 56.
- Göz, G. (1990). Die Altersabhängigkeit der Gewebereaktion bei Zahnbewegungen. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 51(1), 4–7.
- Göz, G. R., Bacher, M., Ney, T., Axmann-Krczmar, D., Hartmann, U. (1992). Die transversale Dehnung mit Plattenapparaturen-intermolare Stabilität und Bedeutung für gingivale Rezessionen. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 53(6), 344–348.
- Göz, G., Rakosi, T. (1989). Die Veränderung der klinischen Kronenlänge unter Multibandbehandlung. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 50(5), 367–376.
- Graber, L. W., Vanarsdall, R. L., Vig, K. W. (2011). *Orthodontics: current principles and techniques* (p. 1104). Elsevier Health Sciences.
- Graber, T. M. (1966). Panoramic Radiography. *Angle Orthodontist*, 36(4), 293–311.
- Greenberg, J., Laster, L., Listgarten, M. A. (1976). Transgingival probing as a potential estimator of alveolar bone level. *Journal of Periodontology*, 47(9), 514–517.

- Grünheid, T., Kolbeck Schieck, J. R., Pliska, B. T., Ahmad, M., Larson, B. E. (2012). Dosimetry of a cone-beam computed tomography machine compared with a digital x-ray machine in orthodontic imaging. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 141(4), 436–443.
- Guerrero, M. E., Jacobs, R., Loubele, M., Schutyser, F., Suetens, P., van Steenberghe, D. (2006). State-of-the-art on cone beam CT imaging for preoperative planning of implant placement. *Clinical Oral Investigations*, 10(1), 1–7.
- Haffajee, A. D., Socransky, S. S., Goodson, J. M. (1983). Comparison of different data analyses for detecting changes in attachment level. *Journal of Clinical Periodontology*, 10(3), 298–310.
- Halazonetis, D. J. (2005). From 2-dimensional cephalograms to 3-dimensional computed tomography scans. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 127(5), 627–637.
- Hamp, S.-E., Lundström, F., Nyman, S. (1982). Periodontal conditions in adolescents subjected to multiband orthodontic treatment with controlled oral hygiene. *The European Journal of Orthodontics*, 4(2), 77–86.
- Handelman, C. S. (1996). The anterior alveolus: its importance in limiting orthodontic treatment and its influence on the occurrence of iatrogenic sequelae. *The Angle Orthodontist*, 66(2), 95–110.
- Harris, E. F., Baker, W. C. (1990). Loss of root length and creastal bone height before and during treatment in adolescent and adult orthodontic patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(5), 463–469. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889540605816567>
- Harris, E. F., Baker, W. C. (1990). Loss of root length and crestal bone height before and during treatment in adolescent and adult orthodontic patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(5), 463–469.
- Hassell, T. M. (1993). Tissues and cells of the periodontium. *Periodontology 2000*, 3(1), 9–38.
- Hausmann, E., Allen, K., Christersson, L., Genco, R. J. (1989). Effect of x-ray beam vertical angulation on radiographic alveolar crest level measurement. *Journal of Periodontal Research*, 24(1), 8–19.
- Hausmann, E., Clerehugh, V. (1991). What alveolar crest level on a bite-wing radiograph represents bone loss? *Journal of Periodontology*, 62(9), 570–572.
- Hechler, S. L. (2008). Cone-beam CT: applications in orthodontics. *Dental Clinics of North America*, 52(4), 809–823.
- Heintze, S., Miethke, R. (1993). Kieferorthopädie und Kariesrisiko. *Prakt Kieferorthop*, 7, 31–46.

- Hiller, J., Funk, C., Kasperl, S. (2009). Vergleich von Fächerstrahl- und Kegelstrahl-Computertomographie-Messungen am Beispiel eines Zylinderkopfsegmentes. In *DGZfP-Jahrestagung 2009* (pp. 1–6).
- Hirsch, E., Wolf, U., Heinicke, F., Silva, M. A. G. (2008). Dosimetry of the cone beam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3D Accuitomo in different fields of view. *Dentomaxillofacial Radiology*, 37(5), 268–273.
- Hirschfelder, U. (1994). Radiologische Übersichtsdarstellung des Gebisses: Dental-CT versus Orthopantomographie. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 55(1), 14–20.
- Holberg, C., Steinhäuser, S., Geis, P., Rudzki-Janson, I. (2005). Cone-beam computed tomography in orthodontics: benefits and limitations. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 66(6), 434–444.
- Hollender, L., Rönnerman, A., Thilander, B. (1980). Root resorption, marginal bone support and clinical crown length in orthodontically treated patients. *The European Journal of Orthodontics*, 2(4), 197–205.
- Honda, K., Larheim, T. A., Maruhashi, K., Matsumoto, K., Iwai, K. (2006). Osseous abnormalities of the mandibular condyle: diagnostic reliability of cone beam computed tomography compared with helical computed tomography based on an autopsy material. *Dentomaxillofacial Radiology*, 35(3), 152–157.
- Houston, W. J. (1983). The analysis of errors in orthodontic measurements. *American Journal of Orthodontics*, 83(5), 382–390.
- Huettner, R. (1960). Experimental histologic study of the effects of orthodontic movement on the gingiva and periodontal membrane in the macaca Rhesus monkey. *Am. J. Orthodont*, 46, 929.
- Hugoson, A., Laurell, L. (2000). A prospective longitudinal study on periodontal bone height changes in a Swedish population. *Journal of Clinical Periodontology*, 27(9), 665–674.
- Imaging Sciences International Inc. (2006). Fächerstrahl-Volumentomographie- und Panorama-Dentalbildgebungssystem IMAGING SCIENCES INTERNATIONAL, INC. 1910.
- Ingber, J. (1974). Forced eruption: Part I. A method of treating isolated one and two wall infrabony osseous defects-Rationale and case report. *Journal of Periodontology*, 45(4), 199–206.
- Ingber, J. S. (1976). Forced Eruption: Part II. A Method of Treating Nonrestorable Teeth—Periodontal and Restorative Considerations*. *Journal of Periodontology*, 47(4), 203–216.
- Israel, H. (1968). Continuing growth in the human cranial skeleton. *Archives of Oral Biology*, 13(1), 133–137.

- Israel, H. (1970). Continuing growth in sella turcica with age. *American Journal of Roentgenology*, 108(3), 516–527.
- Jacobsen, N., Hensten-Pettersen, A. (1989). Occupational health problems and adverse patient reactions in orthodontics. *The European Journal of Orthodontics*, 11(3), 254–264.
- Jacobson, O. (1952). Clinical significance of root resorption. *American Journal of Orthodontics*, 38(9), 687–696.
- Jancosek, G. T. (1965). Clinical Effects of Orthodontic Treatment on Periodontal Soft Tissues. *American Journal of Orthodontics*, 51(4), 305.
- Janson, G., Bombonatti, R., Brandão, A. G., Henriques, J. F. C., de Freitas, M. R. (2003). Comparative radiographic evaluation of the alveolar bone crest after orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 124(2), 157–164.
- Kalender, W. A., Kyriakou, Y. (2007). Flat-detector computed tomography (FD-CT). *European Radiology*, 17(11), 2767–2779.
- Kalkwarf, K. L., Krejci, R. F., Pao, Y. C. (1986). Effect of apical root resorption on periodontal support. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 56(3), 317–319.
- Källestål, C., Matsson, L. (1989). Criteria for assessment of interproximal bone loss on bite-wing radiographs in adolescents. *Journal of Clinical Periodontology*, 16(5), 300–304.
- Kaltenbach und Voigt GmbH. (2009). KaVo 3D eXam Benutzerhandbuch.
- Karring, T., Nyman, S., Thilander, B., Magnusson, I. (1982). Bone regeneration in orthodontically produced alveolar bone dehiscences. *Journal of Periodontal Research*, 17(3), 309–315.
- Kennedy, D. B., Joondeph, D. R., Osterberg, S. K., Little, R. M. (1983). The effect of extraction and orthodontic treatment on dentoalveolar support. *American Journal of Orthodontics*, 84(3), 183–190.
- Kim, T., Obst, C., Zehaczek, S., Geenen, C. (2008). Detection of bone loss with different X-ray techniques in periodontal patients. *Journal of Periodontology*, 79(7), 1141–1149.
- Kim, Y., Park, J. U., Kook, Y.-A. (2009). Alveolar bone loss around incisors in surgical skeletal Class III patients: a retrospective 3-D CBCT study. *The Angle Orthodontist*, 79(4), 676–682.
- Kloehn, J., Pfeifer, J. (1974). The effect of orthodontic treatment on the periodontium. *The Angle Orthodontist*, 44(2), 127–134.

- Körper, K. H. (1962). Die elastische deformierung menschlicher Zähne. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 17(1), 691–695.
- Körper, K. H. (1969). Impulsform des Zahnkontaktes - dynamische Beanspruchung des Parodontiums. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 1969, 24.
- Lampley, J. L. (2010). *Prevalence and Distribution of Facial Alveolar Bone Fenestrations in the Anterior Dentition: a Cone Beam Computed Tomography Analysis*. University of Southern California.
- Larato, D. C. (1970). Alveolar plate fenestrations and dehiscences of the human skull. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 29(6), 816–819.
- Larato, D. C. (1972). Alveolar plate defects in children's skulls. *Journal of Periodontology*, 43(8), 502.
- Lascala, C. A., Panella, J., Marques, M. M. (2004). Analysis of the accuracy of linear measurements obtained by cone beam computed tomography (CBCT-NewTom). *Dento Maxillo Facial Radiology*, 33(5), 291–294.
- Leung, C. C., Palomo, L., Griffith, R., Hans, M. G. (2010). Accuracy and reliability of cone-beam computed tomography for measuring alveolar bone height and detecting bony dehiscences and fenestrations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 137(4), 109–119.
- Lindhe, J., Haffaiee, A. D., Socransky, S. S. (1983). Progression of periodontal disease in adult subjects in the absence of periodontal therapy. *Journal of Clinical Periodontology*, 10(4), 433–442.
- Lindhe, J., Lang, N., Karring, T. (2009). *Clinical periodontology and implant dentistry*. (J. W. & Sons, Ed.) (pp. 3–48).
- Listgarten, M., Lang, N., Schroeder, H. E., Schroeder, A. (1991). Periodontal tissues and their counterparts around endosseous implants. *Clinical Oral Implants Research*, 2(1), 1–19.
- Löe, H., Ånerud, Å., Boysen, H. (1992). The Natural History of Periodontal Disease in Man: Prevalence, Severity, and Extent of Gingival Recession*. *Journal of Periodontology*, 63(6), 489–495.
- Löe, H., Ånerud, Å., Boysen, H., Smith, M. (1978). The Natural History of Periodontal Disease in Man. The Rate of Periodontal Destruction Before 40 Years of Age*. *Journal of Periodontology*, 49(12), 607–620.
- Löst, C. (1984). Depth of alveolar bone dehiscences in relation to gingival recessions. *Journal of Clinical Periodontology*, 11(9), 583–589.
- Löst, C., Gerhardt, K. D. (1984). Kasuistischer Beitrag über mögliche Zusammenhänge zwischen orthodontischen Bewegungen und gingivalen Rezessionen. *Zahnärztl Welt*, 93,460.

- Löst, C., Nüssle, W. (1988). Periodontal ultrasonic diagnosis: experiments on thin bony platelets and on a simulated periodontal ligament space. *Journal of Periodontal Research*, 23(6), 347–351.
- Loubele, M., Bogaerts, R., Van Dijck, E., et al. (2009). Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *European Journal of Radiology*, 71(3), 461–468.
- Loubele, M., Van Assche, N., Carpentier, K., et al. (2008). Comparative localized linear accuracy of small-field cone-beam CT and multislice CT for alveolar bone measurements. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 105(4), 512–518.
- Ludlow, J. B., Davies-Ludlow, L. E., Brooks, S. L., Howerton, W. B. (2006). Dosimetry of 3 CBCT devices for oral and maxillofacial radiology: CB Mercuray, NewTom 3G and i-CAT. *Dentomaxillofacial Radiology*, 35(4), 219–226.
- Ludlow, J., Ivanovic, M. (2008). Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 106(1), 106–114.
- Lupi, J. E., Handelman, C. S., Sadowsky, C. (1996). Prevalence and severity of apical root resorption and alveolar bone loss in orthodontically treated adults. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 109(1), 28–37.
- Mah, J. K., Huang, J. C., Choo, H. (2010). Practical Applications of Cone-Beam Computed Tomography in Orthodontics. *The Journal of the American Dental Association*, 141(suppl 3), 7S–13S.
- Maki, K., Inou, N., Takanishi, A., Miller, A. (2003). Computer-assisted simulations in orthodontic diagnosis and the application of a new cone beam X-ray computed tomography. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 6(s1), 95–101.
- Massler, M. (1954). Changes in the lamina dura during tooth movement. *American Journal of Orthodontics*, 40(5), 364–372.
- Maushardt, R. (1968). Untersuchung über die parodontalen Verhältnisse nach Prämolarenextraktion und kieferorthopädischem Lückenschluß. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 29(2), 219–224.
- Melsen, B. (1983). Behandlungsprobleme bei erwachsenen Patienten. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 44(1), 12–27.
- Melsen, B. (1999). Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement. *The Angle Orthodontist*, 69(2), 151–158.
- Melsen, B., Agerbæk, N., Markenstam, G. (1989). Intrusion of incisors in adult patients with marginal bone loss. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(3), 232–241.

- Melsen, B., Allais, D. (2005). Factors of importance for the development of dehiscences during labial movement of mandibular incisors: a retrospective study of adult orthodontic patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 127(5), 552–561.
- Menezes, C., Janson, G., Massaro, C. D. S., Cambiaghi, L., Garib, D. (2010). Reproducibility of bone plate thickness measurements with cone-beam computed tomography using different image acquisition protocols. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 15(5), 143–149.
- Mengel, R., Candir, M., Shiratori, K., Flores-de-Jacoby, L. (2005). Digital volume tomography in the diagnosis of periodontal defects: an in vitro study on native pig and human mandibles. *Journal of Periodontology*, 76(5), 665–673.
- Mengel, R., Kruse, B., Flores-de-Jacoby, L. (2006). Digital volume tomography in the diagnosis of periimplant defects: an in vitro study on native pig mandibles. *Journal of Periodontology*, 77(7), 1234–1241.
- Mirabella, A. D., Årtun, J. (1995). Risk factors for apical root resorption of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 108(1), 48–55.
- Misch, K. A., Yi, E. S., Sarment, D. P. (2006). Accuracy of cone beam computed tomography for periodontal defect measurements. *Journal of Periodontology*, 77(7), 1261–1266.
- Mitchell, L. (1992). Decalcification during orthodontic treatment with fixed appliances--an overview. *Journal of Orthodontics*, 19(3), 199–205.
- Mol, A. (2004). Imaging methods in periodontology. *Periodontology 2000*, 34(1), 34–48.
- Mol, A., Balasundaram, A. (2008). In vitro cone beam computed tomography imaging of periodontal bone. *Dentomaxillofacial Radiology*, 37(6), 319–324.
- Mora, M. A., Mol, A., Tyndall, D. A., Rivera, E. M. (2007). In vitro assessment of local computed tomography for the detection of longitudinal tooth fractures. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 103(6), 825–829.
- Moskow, B. S., Baden, E. (1966). Unusual gingival characteristics having a familial tendency: a case report. *Periodontics*, 5(5), 259–264.
- Mostafa, Y. A., El Sharaby, F. A., El Beialy, A. R. (2009). Do alveolar bone defects merit orthodontists' respect? *World Journal of Orthodontics*, 10(1), 16–20.
- Mühlemann, H., Rateitschak, K. (1963). Mechanische und elektronische Zahnbeweglichkeitsmessungen. *DZZ*, 22(1), 50–57.

- Mulie, R. M., Ten Hove, A. (1976). The limitations of tooth movement within the symphysis, studied with laminagraphy and standardized occlusal films. *Journal of Clinical Orthodontics : JCO*, 10(12), 882–893.
- Nelson, P. A., Artun, J. (1997). Alveolar bone loss of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 111(3), 328–334.
- Nielsen, I. M., Glavind, L., Karhing, T. (1980). Interproximal periodontal intrabony defects. *Journal of Clinical Periodontology*, 7(3), 187–198.
- Noujeim, M., Prihoda, T., Langlais, R., Nummikoski, P. (2009). Evaluation of high-resolution cone beam computed tomography in the detection of simulated interradicular bone lesions. *Dentomaxillofacial Radiology*, 38(3), 156–162.
- Oers, R. van, Ruimerman, R., Tanck, E., Hilbers, P. A., Huiskes, R. (2008). A unified theory for osteonal and hemi-osteonal remodeling. *Bone*, 42(2), 250–259.
- Øgaard, B. (1988). Marginal bone support and tooth lengths in 19-year-olds following orthodontic treatment. *The European Journal of Orthodontics*, 10(1), 180–186.
- Øgaard, B. (1989). Incidence of filled surfaces from 10-18 years of age in an orthodontically treated and untreated group in Norway. *The European Journal of Orthodontics*, 11(2), 116–119.
- Oppenheim, A. (1942). Human tissue response to orthodontic intervention of short and long duration. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*, 28(5), 263–301.
- Oppenheim, A. (1944). A possibility for physiologic orthodontic movement. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*, 30(7), 345–368.
- Owin, K., Diedrich, P. (1990). Veränderung parodontaler Parameter während der kieferorthopädischen Behandlung. *Dtsch Zahnärztl*, 1990(1), 45.
- Papapanou, P. N., Wennström, J. L., Gröndahl, K. (1988). Periodontal status in relation to age and tooth type. *Journal of Clinical Periodontology*, 15(7), 469–478.
- Pasler, F. (2008). *Zahnärztliche Radiologie* (5th ed., pp. 27, 48). Thieme.
- Pasler, F., Visser, H. (2000). *Zahnmedizinische Radiologie: bildgebende Verfahren*. (Thieme, Ed.) (Vol. 5, pp. 1–331). Stuttgart.
- Patcas, R., Müller, L., Ullrich, O., Peltomäki, T. (2012). Accuracy of cone-beam computed tomography at different resolutions assessed on the bony covering of the mandibular anterior teeth. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 141(1), 41–50.
- Patel, A., Sandler, J. (2009). Richtlinien für Röntgenaufnahmen in der kieferorthopädischen Praxis. *Informationen Aus Orthodontie & Kieferorthopädie*, 41(01), 51–60.

- Pauwels, R., Beinsberger, J., Collaert, B., et al. (2012). Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. *European Journal of Radiology*, 81(2), 267–271.
- Persson, R. E., Hollender, L. G., Laurell, L., Persson, G. R. (1998). Horizontal alveolar bone loss and vertical bone defects in an adult patient population. *Journal of Periodontology*, 69(3), 348–356.
- Phillips, J. (1955). Apical Root Resorption Under Orthodontic Therapy*. *The Angle Orthodontist*, 25(1), 1–22.
- Picton, D. C. A. (1965). On the part played by the socket in tooth support. *Archives of Oral Biology*, 10(6), 945–955.
- Picton, D. C. A. (1969). The effect of external forces on the periodontium. *Biology of the Periodontium*, 1(1), 363–419.
- Pinsky, H. M., Dyda, S., Pinsky, R. W., Misch, K. A., Sarment, D. P. (2006). Accuracy of three-dimensional measurements using cone-beam CT. *Dentomaxillofacial Radiology*, 35(6), 410–416.
- Pistorius, A., Patrosio, C., Willershausen, B., Mildenerger, P., Rippin, G. (2001). Periodontal probing in comparison to diagnosis by CT-Scan. *International Dental Journal*, 51(5), 339–347.
- Polson, A. M., Reed, B. E. (1984). Long-term effect of orthodontic treatment on crestal alveolar bone levels. *Journal of Periodontology*, 55(1), 28–34.
- Polson, A. M., Subtelny, J. D., Meitner, S. W., et al. (1988). Long-term periodontal status after orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 93(1), 51–58.
- Ramadan, A., Mitchell, D. (1962). A roentgenographic study of experimental bone destruction. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 15(8), 934–943.
- Ramfjord, S. (1961). The periodontal status of boys 11 to 17 years old in Bombay, India. *Journal of Periodontology*, 32(3), 237–248.
- Rateitschak, K. H., Herzog-Specht, F., Hotz, R. (1968). Reaktion und Regeneration des Parodonts auf Behandlung mit festsitzenden Apparaten und abnehmbaren Platten. *Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 29(3-4), 415–435.
- Rateitschak, K., Rateitschak, E., Wolf, H. F. (2004). *Farbatlant der Zahnmedizin. Band 1: Parodontologie* (3. Auflage., pp. 14, 16). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Reddy, M. S. (1992). Radiographic Methods in the Evaluation of Periodontal Therapy*. *Journal of Periodontology*, 63(12 suppl), 1078–1084.
- Reed, B. E., Polson, A. M., Subtelny, J. D. (1985). Long-term periodontal status of teeth moved into extraction sites. *American Journal of Orthodontics*, 88(3), 203–208.

- Rees, T. D., Biggs, N. L., Collings, C. K. (1971). Radiographic interpretation of periodontal osseous lesions. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 32(1), 141–153.
- Reháč, R. (1935). Die Veränderung der Gewebe in Röntgenbild nach orthodontischer Beanspruchung der Zähne. *Ztschr. F. Stomatol*, 33(1), 1424–1440.
- Reitan, K. (1954). Tissue reaction as related to the age factor. *Dent Rec*, 74(1), 271.
- Reitan, K. (1957). Some factors determining the evaluation of forces in orthodontics. *American Journal of Orthodontics*, 43(1), 32–45.
- Reitan, K. (1967). Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics*, 53(10), 721–745.
- Reitan, K. (1974). Initial tissue behavior during apical root resorption. *The Angle Orthodontist*, 44(1), 68–82.
- Reitan, K. (1989). Biomechanische Prinzipien der Gewebsreaktion. In *Grundlagen und moderne Techniken der Kieferorthopädie* (pp. 149–270). Michigan: Quintessenz.
- Richardson, P. S. (1997). Selective periapical radiology compared to panoramic screening. *Primary Dental Care : Journal of the Faculty of General Dental Practitioners (UK)*, 4(3), 95–99.
- Roberts, W. (2000). Bone physiology, metabolism, and biomechanics in orthodontic practice. In *Orthodontics: Current Principles and Techniques* (3rd ed., pp. 225–227). St. Louis, USA: Mosby, Inc.
- Roberts, W. E., Epker, B. N., Burr, D. B., Hartsfield, J. K., Roberts, J. A. (2006). Remodeling of mineralized tissues, part II: control and pathophysiology. *Seminars in Orthodontics*, 12(4), 238–253.
- Rohner, F., Cimasoni, G., Vuagnat, P. (1983). Longitudinal radiographical study on the rate of alveolar bone loss in patients of a dental school. *Journal of Clinical Periodontology*, 10(6), 643–651.
- Rothman, S. L. G. (1998). *Dental applications of computerized tomography: surgical planning for implant placement* (p. 246). Quintessence Pub. Co.
- Ruf, S., Hansen, K., Pancherz, H. (1998). Does orthodontic proclination of lower incisors in children and adolescents cause gingival recession? *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 114(1), 100–106.
- Rupprecht, R. D., Horning, G. M., Nicoll, B. K., Cohen, M. E. (2001). Prevalence of dehiscences and fenestrations in modern American skulls. *Journal of Periodontology*, 72(6), 722–729.
- Sadowsky, C., BeGole, E. a. (1981). Long-term effects of orthodontic treatment on periodontal health. *American Journal of Orthodontics*, 80(2), 156–172.

- Sarikaya, S., Haydar, B., Ciğer, S., Ariyürek, M. (2002). Changes in alveolar bone thickness due to retraction of anterior teeth. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 122(1), 15–26.
- Schattmann, S. (2011). *Dentale Volumetomographie in der Diagnostik vestibulärer parodontaler Defekte Experimentelle Untersuchungen an Formalin-fixierten menschlichen Unterkiefern*. 2011. Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin.
- Schei, O., Waerhaug, J., Lovdal, A., Arno, A. (1959). Alveolar bone loss as related to oral hygiene and age. *Journal of Periodontology*, 30(1), 7–16.
- Scheurer, P. A., Firestone, A. R., Bürgin, W. B. (1996). Perception of pain as a result of orthodontic treatment with fixed appliances. *The European Journal of Orthodontics*, 18(4), 18, 349.
- Schluger, S. (1968). Periodontal aspects of orthodontic treatment. *JPO: The Journal of Practical Orthodontics*, 2(3), 111–117.
- Schroeder, H. (1991). *Oral structural biology. Embryologie, structure and function of normal hard and soft tissues of the oral cavity and temporomandibular joints*. (Thieme-Flexibook, Ed.) (p. 424). Stuttgart.
- Schroeder, H. E., Listgarten, M. a. (1997). The gingival tissues: the architecture of periodontal protection. *Periodontology 2000*, 13(1), 91–120.
- Schulze, D., Heiland, M., Thurmann, H., Adam, G. (2004). Radiation exposure during midfacial imaging using 4- and 16-slice computed tomography, cone beam computed tomography systems and conventional radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 33(2), 83–86.
- Schulze, R., Berndt, D., D’Hoedt, B. (2010). On cone-beam computed tomography artifacts induced by titanium implants. *Clinical Oral Implants Research*, 21(1), 100–107.
- Schulze, R., Heil, U., Gross, D., et al. (2011). Artefacts in CBCT: a review. *Dentomaxillofacial Radiology*, 40(5), 265–273.
- Silva, M. A. G., Wolf, U., Heinicke, F., Bumann, A., Visser, H., Hirsch, E. (2008). Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: a radiation dose evaluation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 133(5), 640.e1–640.e5.
- Siriwat, P. P., Jarabak, J. R. (1985). Malocclusion and Facial Morphology Is there a Relationship? An epidemiologic study. *The Angle Orthodontist*, 55(2), 127–138.
- Sitzmann, F. (1988, October 24). Bildgebende Verfahren in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. In: Ketterl, W. (Hrsg.) *Grundlagen der Zahn-, Mund und Kieferheilkunde I. AfCS-Nature Molecule Pages*. München-Wien-Baltimore: Urban & Schwarzenberg.

- Sjølien, T., Zachrisson, B. (1973). Periodontal bone support and tooth length in orthodontically treated and untreated persons. *American Journal of Orthodontics*, 64(1), 28–37.
- Skotnický, F. (1972). Problem der Projektionsverzerrung bei Fernröntgenaufnahmen des Schädels. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 33(3), 277–303.
- Sleighter, C. (1971). A clinical assessment of light and heavy forces in the closure of extraction spaces. *The Angle Orthodontist*, 41(1), 66–75.
- Soğur, E., Baksi, B. G., Gröndahl, H.-G. (2007). Imaging of root canal fillings: a comparison of subjective image quality between limited cone-beam CT, storage phosphor and film radiography. *International Endodontic Journal*, 40(3), 179–185.
- Spitzer, W., Müller-Richter, U. (1997). Diagnostik durch aktuelle bildgebende Verfahren. In *Praxis der Zahnheilkunde: Mund- Kiefer- Gesichtschirurgie; 1, Band 10* (3rd ed., pp. 1–17). Urban & Schwarzenberg.
- Stahl, S., Cantor, M., Zwig, E. (1963). Fenestrations of the labial alveolar plate in human skulls. *Periodontics*, 1(1), 99–102.
- Storey, E. (1953). Bone changes associated with tooth movement. A radiographic study. *Austral. J. Dent.*, 57(1), 57–64.
- Stuteville, O. (1937). Injuries to the teeth and supporting structures caused by various orthodontic appliances and methods of preventing these injuries. *J Am Dent Assoc*, 14(1), 1494–1507.
- Suomalainen, A. (2010). *Cone beam computed tomography in oral radiology*. University of Helsinki.
- Suomi, J. D., West, J. D., Chang, J. J., McClendon, B. J. (1971). The effect of controlled oral hygiene procedures on the progression of periodontal disease in adults: radiographic findings. *Journal of Periodontology*, 42(9), 562–564.
- Suomi, J., Greene, J. (1971). The effect of controlled oral hygiene procedures on the progression of periodontal disease in adults: results after third and final year. *Journal of Periodontology*, 42(3), 152–160.
- Swennen, G. R. J., Schutyser, F. (2006). Three-dimensional cephalometry: spiral multi-slice vs cone-beam computed tomography. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 130(3), 410–416.
- Ten Hoeve, A., Mulie, R. M. (1976). The effect of antero-postero incisor repositioning on the palatal cortex as studied with laminagraphy. *Journal of Clinical Orthodontics : JCO*, 10(11), 804–822.
- Terakado, M., Hashimoto, K., Arai, Y., Honda, M., Sekiwa, T., Sato, H. (2000). Diagnostic imaging with newly developed ortho cubic super-high resolution

- computed tomography (Ortho-CT). *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 89(4), 509–518.
- Thilander, B., Nyman, S., Karring, T., Magnusson, I. (1983). Bone regeneration in alveolar bone dehiscences related to orthodontic tooth movements. *European Journal of Orthodontics*, 5(2), 105–114.
- Timock, A. M., Cook, V., McDonald, T., et al. (2011). Accuracy and reliability of buccal bone height and thickness measurements from cone-beam computed tomography imaging. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 140(5), 734–744.
- Tirk, T., Guzman, C., Nalchajian, R. (1967). Periodontal tissue response to orthodontic treatment studied by panoramix. *The Angle Orthodontist*, 37(2), 94–103.
- Trossello, V. K., Gianelly, A. A. (1979). Orthodontic treatment and periodontal status. *Journal of Periodontology*, 50(12), 665–671.
- Tsiklakis, K., Syriopoulos, K., Stamatakis, H. C. (2004). Radiographic examination of the temporomandibular joint using cone beam computed tomography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 33(3), 196–201.
- Tugnait, A., Clerehugh, V., Hirschmann, P. N. (2000). The usefulness of radiographs in diagnosis and management of periodontal diseases: a review. *Journal of Dentistry*, 28(4), 219–226.
- Urbani, G., Lombardo, G. (1990). Dehiscence and fenestration: study of distribution and incidence in a homogeneous population model. *Stomatologia Mediterranea: SM*, 11(2), 113–118.
- Vandenberghe, B., Jacobs, R., Yang, J. (2007). Diagnostic validity (or acuity) of 2D CCD versus 3D CBCT-images for assessing periodontal breakdown. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 104(3), 395–401.
- Vandenberghe, B., Jacobs, R., Yang, J. (2007). Topographic Assessment of Periodontal Craters and Furcation Involvements by Using 2D Digital Images Versus 3D Cone Beam CT: an in-vitro Study. *Chinese Journal of Dental Research*, 10(1), 21–29.
- Vandenberghe, B., Jacobs, R., Yang, J. (2008). Detection of periodontal bone loss using digital intraoral and cone beam computed tomography images: an in vitro assessment of bony and/or infrabony defects. *Dentomaxillofacial Radiology*, 37(5), 252–260.
- Vardimon, A. D., Oren, E., Ben-Bassat, Y. (1998). Cortical bone remodeling/tooth movement ratio during maxillary incisor retraction with tip versus torque movements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 114(5), 520–529.

- Volchansky, A., Cleaton-Jones, P. (1978). Bony defects in dried Bantu mandibles. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 45(4), 647–653.
- Waehrisch, K. A., Bumann, A. (2014). *Effektive Dosen von DVT-Protokollen für die kieferorthopädische Behandlungsplanung nach dem "IADR-Prinzip."* Berlin. (in Vorbereitung)
- Wainwright, W. M. (1973). Faciolingual tooth movement: its influence on the root and cortical plate. *American Journal of Orthodontics*, 64(3), 278–302.
- Weber, F. N. (1971). Clinical investigations related to use of the Begg technique at the University of Tennessee. *American Journal of Orthodontics*, 59(1), 24–36.
- Wehrbein, H., Bauer, W., Diedrich, P. (1996). Mandibular incisors, alveolar bone, and symphysis after orthodontic treatment. A retrospective study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 110(3), 239–246.
- Wehrbein, H., Fuhrmann, R., Diedrich, P. (1995). Human histologic tissue response after long-term orthodontic tooth movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 107(4), 360–371.
- Weingang, J., Bumann, A. (2014). *Quantitative Untersuchungen zur Prävalenz von dentoalveolären Dehiszenzen in Abhängigkeit von Zahn- und Kieferfehlstellungen.* Berlin. (in Vorbereitung)
- Weise, W. (1973). Parodontopathien als Folge von kieferorthopädischer Behandlung. *Dtsch Zahnärztl*, 28(1), 143–148.
- Weiss, R. C. (1972). Physiology of adult tooth movement. *Dental Clinics of North America*, 16(3), 449–457.
- Wennström, J. L., Lindhe, J., Sinclair, F., Thilander, B. (1987). Some periodontal tissue reactions to orthodontic tooth movement in monkeys. *Journal of Clinical Periodontology*, 14(3), 121–129.
- White, S. C. (1992). 1992 assessment of radiation risk from dental radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 21(3), 118–126.
- Widlitzek, H., König, S., Golin, U. (1996). Die Bedeutung des Dental-CT für die Implantologie in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. *Der Radiologe*, 36(3), 229–235.
- Wingard, C. E., Bowers, G. M. (1976). The effects of facial bone from facial tipping of incisors in monkeys. *Journal of Periodontology*, 47(8), 450–454.
- Wisth, P. J. (1975). Periodontal status of neighboring teeth after orthodontic closure of mandibular extraction sites. *European Journal of Oral Sciences*, 83(6), 307–313.
- Wolf, H. F., Rateitschak, K. H., Rateitschak, E. M. (2005). *Periodontology* (3rd ed., pp. 8–18). Thieme.

- Wouters, F. R., Satonen, L. E., Helldén, L. B., Frithiof, L. (1989). Prevalence of interproximal periodontal intrabony defects in an adult population in Sweden. A radiographic study. *Journal of Clinical Periodontology*, 16(3), 144–149.
- Yagci, A., Veli, I., Uysal, T., Ucar, F. I., Ozer, T., Enhos, S. (2011). Dehiscence and fenestration in skeletal Class I, II, and III malocclusions assessed with cone-beam computed tomography. *The Angle Orthodontist*, 82(1), 67–74.
- Yamada, C., Kitai, N., Kakimoto, N., Murakami, S., Furukawa, S., Takada, K. (2007). Spatial relationships between the mandibular central incisor and associated alveolar bone in adults with mandibular prognathism. *The Angle Orthodontist*, 77(5), 766–772.
- Yang, F., Jacobs, R., Willems, G. (2006). Dental age estimation through volume matching of teeth imaged by cone-beam CT. *Forensic Science International*, 159(1), S78–S83.
- Yared, K. F. G., Zenobio, E. G., Pacheco, W. (2006). Periodontal status of mandibular central incisors after orthodontic proclination in adults. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 130(1), 6.e1–6.e8.
- Yu, Q., Pan, X., Ji, G., Shen, G. (2009). The association between lower incisal inclination and morphology of the supporting alveolar bone—a cone-beam CT study. *International Journal of Oral Science*, 1(4), 217–223.
- Zachrisson, B. U., Alnaes, L. (1973). Periodontal Condition in Orthodontically Treated and Untreated Individuals I. Loss of Attachment, Gingival Pocket Depth and Clinical Crown Height. *The Angle Orthodontist*, 43(4), 402–411.
- Zachrisson, B. U., Alnaes, L. (1974). Periodontal Condition in Orthodontically Treated and Untreated Individuals II. Alveolar Bone Loss: Radiographic Findings. *The Angle Orthodontist*, 44(1), 48–55.
- Zachrisson, S., Zachrisson, B. U. (1972). Gingival condition associated with orthodontic treatment. *The Angle Orthodontist*, 42(1), 26–34.

7. Eidesstattliche Erklärung

„Ich, Fabian Jäger, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes in dreidimensionalen Röntgenbildern während einer festsitzenden kieferorthopädischen Behandlung“ 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) 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

Anteilerklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Prof. Dr. Axel Bumann

Fabian Jäger

8. Lebenslauf

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

9. Publikationsliste

10. Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Professor Dr. Axel Bumann für die Ermöglichung der Promotion und seine unermüdliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit sowie der Bereitstellung der anonymisierten Patientenaufnahmen, ohne die diese Arbeit unmöglich gewesen wäre.

Ein großer Dank gilt außerdem Herrn Sebastian Sohst aus dem Institut Mesantis für seine Betreuung während der endlosen Stunden der Datenerfassung.

Zuletzt sei erwähnt, dass es mir ohne die Geduld und Unterstützung meiner Freundin Antje Weber nie gelungen wäre, meine Dissertation in dieser Form abzuschließen.