

Aus dem Institut für 3D-Dentalradiologie – MESANTIS Berlin

## **DISSERTATION**

**Peridentales Knochenangebot vor und nach  
kieferorthopädischer Behandlung mit Invisalign®-Schienen**

–

**eine retrospektive Longitudinalstudie  
anhand von dentalen Volumentomographien**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Anneke Elefant

aus Bayreuth

Datum der Promotion: 05.06.2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstrakt</b>	<b>04</b>
<b>Abstract</b>	<b>05</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>07</b>
<b>1.1 Anatomie und Physiologie des Parodontiums</b>	<b>07</b>
<b>1.2 Invisalign®-System</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Kieferorthopädische Begriffserklärung</b>	<b>12</b>
<b>1.4 Kieferorthopädische Behandlung und knöcherne Dehiszenzen</b>	<b>14</b>
<b>1.5 Klassische bildgebene Diagnostik parodontaler Defekte</b>	<b>17</b>
<b>1.6 Digitale Volumentomographie (DVT) in der Kieferorthopädie</b>	<b>20</b>
<b>2. Fragestellung</b>	<b>25</b>
<b>3. Methodik</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Allgemeine Methodik</b>	<b>26</b>
3.1.1 Patientengut	26
3.1.2 DVT-Parameter der Aufnahmen	28
3.1.3 Systematische Auswertung	28
3.1.3.1 Vermessung von Zähnen, Knochenbreiten und Dehiszenzen	29
3.1.3.2 Vermessung der Angulationswinkel	31
3.1.4 Statistische Analyse	32
<b>3.2 Spezielle Methodik</b>	<b>33</b>
3.2.1 Individuelle Reproduzierbarkeit von Knochenveränderungen	33
3.2.2 Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderung durch Invisalign®	33
3.2.3 Abhängigkeit vom Geschlecht	34
3.2.4 Abhängigkeit vom Alter	34
3.2.5 Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit	36
3.2.6 Abhängigkeit von der Zahnart	37
3.2.7 Abhängigkeit von der Zahnangulation	37

<b>4.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>39</b>
4.1	Individuelle Reproduzierbarkeit von Knochenveränderungen	39
4.2	Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderung durch Invisalign®	40
4.3	Abhängigkeit vom Geschlecht	47
4.4	Abhängigkeit vom Alter	55
4.5	Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit	64
4.6	Abhängigkeit von der Zahnart	75
4.7	Abhängigkeit von der Zahnangulation	87
<b>5.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>89</b>
5.1	Diskussion der Methoden	89
5.2	Diskussion der Ergebnisse	91
5.2.1	Individuelle Reproduzierbarkeit von Knochenveränderungen	91
5.2.2	Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderung durch Invisalign®	92
5.2.3	Abhängigkeit vom Geschlecht	93
5.2.4	Abhängigkeit vom Alter	95
5.2.5	Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit	96
5.2.6	Abhängigkeit von der Zahnart	97
5.2.7	Abhängigkeit von der Zahnangulation	99
5.3	Schlussfolgerungen	100
<b>6.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>101</b>
<b>7.</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>110</b>
<b>8.</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>111</b>
<b>9.</b>	<b>Publikationsliste</b>	<b>112</b>
<b>10.</b>	<b>Danksagung</b>	<b>113</b>
<b>11.</b>	<b>Anhang</b>	<b>114</b>
11.1	Abbildungsverzeichnis	114
11.2	Tabellenverzeichnis	117

## Abstrakt

**Einleitung:** Ziel der Studie war, das peridentale mandibuläre und maxilläre Knochenangebot vor und nach einer kieferorthopädischen Behandlung mit dem Invisalign®-Schienensystem anhand von dreidimensionalen digitalen volumentomographischen Bildern zu vergleichen.

**Methodik:** Das peridentale Knochenangebot wurde an 864 Zähnen aus 36 digitalen Volumentomographien von 18 Patienten vermessen. Die kieferorthopädischen Patienten wurden nach Geschlecht (männlich / weiblich), kieferorthopädischer Indikation (Engstand / Weitstand / sagittale Anomalien) und Alter (unter 21 Jahre / 21–40 Jahre / über 41 Jahre) in verschiedene Untersuchungsgruppen eingeteilt. Das peridentale Knochenangebot wurde mit der Software *InVivo 5.1.0* (Anatomage Inc., San Jose, Kalifornien) analysiert und die Ergebnisse im Anschluss statistisch evaluiert (SPSS Inc., einer IBM Company, Chicago, IL).

**Ergebnisse:** Der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston (Mittelwert:  $R = 0,98$ ) zeigte, dass sich die digitale Volumentomographie zur Vermessung des peridentalen Knochenangebotes eignet.

Die oralen Dehiszenzen nahmen im Therapiezeitraum von 2,38 Millimeter auf 2,42 Millimeter signifikant zu ( $p = 0,001$  bzw.  $p = 0,010$ ). Es zeigten sich keine signifikanten Veränderungen der vestibulären Dehiszenzen und der Knochenbreiten ( $p \geq 0,05$ ).

Bei den weiblichen Patienten konnte an acht und bei den männlichen Patienten an drei von 240 Messpunkten ein Knochenverlust diagnostiziert werden. Dieser zeigte sich vor allem an den Inzisivi und den ersten Molaren.

Die Altersprüfung ergab bei den jüngsten Patienten an 15 und bei den ältesten Patienten an neun von 240 Messpunkten eine signifikante Abnahme des Knochenangebotes. Hierbei konnte bei der mittleren Altersgruppe auch ein mittleres Ausmaß der Knochenveränderungen festgestellt werden.

Es bestand kein signifikanter Zusammenhang zwischen Kieferzugehörigkeit und Dehiszenzentwicklung. Die Knochenbreiten im mittleren und unteren Wurzeldrittel verminderten sich im Unterkiefer vestibulär ( $p = 0,010$  bzw.  $p = 0,016$ ) und im Oberkiefer oral ( $p = 0,003$  bzw.  $p = 0,005$ ) signifikant.

Die Seitenzähne im Ober- und Unterkiefer und die oberen zentralen Inzisivi waren am häufigsten von signifikanten Knochenveränderungen betroffen.

Angulationsveränderungen über 2,5 Grad führten zu einer signifikanten Verstärkung der Dehiszenzen, jedoch nur bei zwei Zähnen ( $r = 0,027$  bzw.  $r = 0,006$ ).

**Schlussfolgerungen:** Unter der Voraussetzung spezifischer Einstellparameter eignet sich die digitale Volumentomographie, um Knochenbreiten und Dehiszenzen individuell und reproduzierbar zu vermessen. Klare statistische Zusammenhänge konnten nur für orale Dehiszenzen festgestellt werden. Alle anderen Ergebnisse waren statistisch nicht signifikant oder es konnten keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Die aufgezeigten Tendenzen sollten durch weitere Studien untermauert werden.

## Abstract

**Introduction:** The objective of the present study was to compare the periodontally available bone in the mandibula and maxilla before and after an orthodontic treatment with the Invisalign<sup>®</sup> aligner system using the three-dimensional images of digital volume tomography (DVT).

**Methodology:** The periodontally available bone was measured in 864 teeth using the images of 36 digital volume tomographies taken from 18 patients. The orthodontically treated patients were divided into different study groups according to sex (male / female), orthodontical indication (crowding / spacing / sagittal anomalies) and age (under 21 / aged between 21 and 40 years / aged over 41). The periodontally available bone was then analyzed with the InVivoDental software *InVivo 5.1.0* (developed by Anatomage Inc., San Jose, California) and, afterwards, the results were statistically assessed (using the software of the SPSS Inc., an IBM Company from Chicago, IL).

**Results:** The reliability coefficient according to Houston (Mean:  $R = 0.98$ ) showed that the digital volume tomography is suited for the measurement of the periodontally available bone.

Over the entire period of therapy, the oral dehiscences increased significantly from 2.38 millimeters to 2.42 millimeters ( $p = 0.001$  respectively  $p = 0.010$ ). The vestibular dehiscences and the bone width, on the contrary, exhibited no significant changes ( $p \geq 0.05$ ).

In case of the female patients, we could diagnose bone loss at eight of 240 measuring points and in case of the male patients, bone loss could be diagnosed at three of the

240 observed measuring points. In both groups, bone loss especially occurred in the incisors and the first molars.

The age-related analysis revealed a significant reduction of the available bone at 15 of the 240 measuring points among the youngest patients and at nine of 240 measuring points among the oldest patients. In the group of the middle-aged patients, we could also observe an intermediate extent of changes in periodontally bone.

Besides, there was no significant correlation between the specific location of the treated teeth and the occurrence of dehiscences. In the middle and apical third of the root, significant labial and buccal bone width decrease could be observed in the mandible ( $p = 0.010$  respectively  $p = 0.016$ ), whereas in the maxilla we could observe significant oral bone width decrease ( $p = 0.003$  respectively  $p = 0.005$ ).

The maxillary and mandibular lateral teeth as well as the maxillary central incisors were most frequently affected by significant changes in bone structure.

Angulation changes of more than 2.5 degrees led to a significant aggravation of the dehiscences but only in case of two teeth ( $r = 0.027$  respectively  $r = 0.006$ ).

**Conclusions:** Under the condition of specific setting parameters, the digital volume tomography (DVT) is suited to measure bone width and dehiscences in an individual and reproducible way. Yet, clear statistical correlations could only be observed with respect to oral dehiscences. All the other results were either statistically not significant or they did not allow for unambiguous conclusions. The presented tendencies should therefore be substantiated by further follow-ups.

# 1. Einleitung

## 1.1 Anatomie und Physiologie des Parodontiums

Der Zahnhalteapparat (*Peridontium / Parodontium*) setzt sich aus vier Hauptkomponenten zusammen: dem Zahnfleisch (*Gingiva*), dem Wurzelzement (*Cementum, Substantia ossea dentis*), der Wurzelhaut (*Desmodont*) und dem knöchernen Alveolarfortsatz (*Limbus alveolaris*). Seine Hauptaufgaben sind neben der Verankerung des Zahnes im Knochen die Kontinuitätssicherung der Oberflächenauskleidung, die Immunabwehr gegen externe Noxen und mastikatorische Kaudruckdämpfung (Hellwig 2009, Schroeder 1997).

Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines Peridontium / Parodontium:

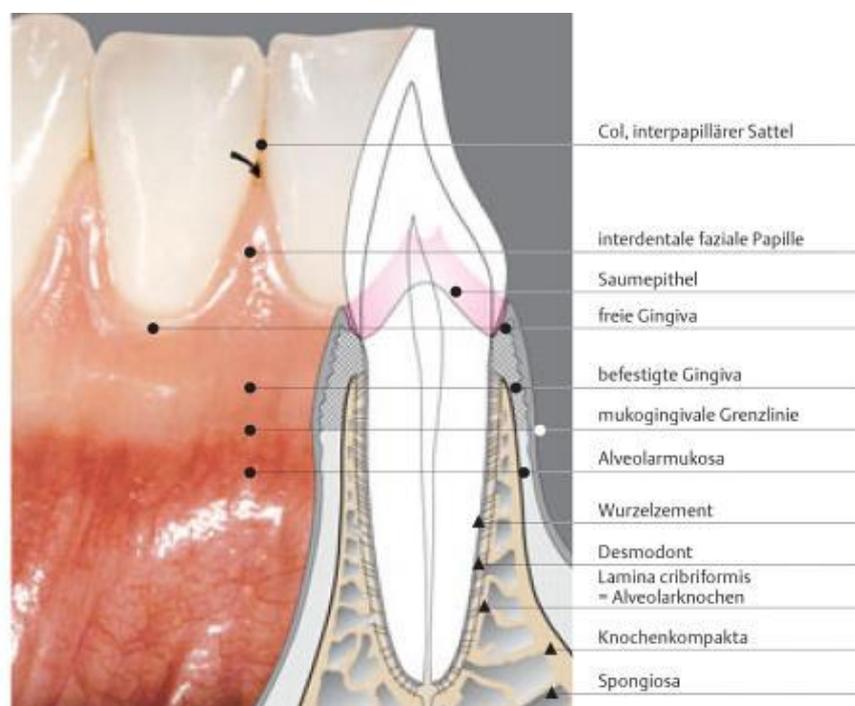


Abb. 1: Strukturen des Parodontium (Wolf & Rateitschak 2004)

## Gingiva

Als Teil der Mundschleimhaut umschließt sie die Zähne und sichert die Kontinuität der Oberflächenauskleidung in der Mundhöhle. Sie verläuft girlandenförmig auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze bzw. diese leicht überlappend, ist mit dem Alveolarfortsatz fest verwachsen und geht an der mukogingivalen Grenzlinie in die Wangen- und Mundbodenschleimhaut über (Steiniger 2010).

Man unterscheidet im Wesentlichen die linguale und vestibuläre befestigte Gingiva von der interdentalen, welche zwischen zwei Papillen einen Sattel (*Col*) bildet, und der nach

koronal auslaufenden freien marginalen Gingiva. Mit dem Saumepithel erfolgen manschettenartig die Anheftung des Zahnfleisches an der Zahnoberfläche und eine Abdichtung des Knochens gegenüber externen Einflüssen (Hellwig 2009).

Die gesunde befestigte Gingiva ist unverschieblich, derb, blassrosa gestipelt und bei dunkelhäutigen Patienten physiologisch pigmentiert. Die marginale freie Gingiva besitzt hingegen eine glatte Oberfläche und ist ca. 0,8 bis 2,5 Millimeter breit. Sie bildet den sogenannten Sulkus, welcher durch ein endogenes Sekret und den gebildeten Speichel für einen nach außen gerichteten Transport sorgt und die Abwehr vor externen Noxen fördert (Lagos 2011, Hellwig 2009).

### **Wurzelzement**

Das Wurzelzement ist die am wenigsten mineralisierte Zahnhartsubstanz und einerseits Teil des Zahnes, andererseits Teil des Zahnhalteapparates (Hellwig 2009, Wolf & Rateitschak 2004). Es bedeckt die Wurzeloberfläche, Teilbereiche der apikal gelegenen Wurzelkanalwände und bildet vereinzelt Zementinseln im zervikalen Schmelzbereich der Zähne (Mjör & Fejerskov 1979). Histologisch unterscheidet man das wahrscheinlich von Zementoblasten gebildete *azelluläre, afibrilläre Zement* im koronalen Drittel des Zahnes und das von Fibroblasten gebildete *azelluläre Fremdfaserzement* vom durch Zementoblasten gebildeten *zellulären Eigenfaserzement* und *zellulären Gemischtfaserzement*, an dessen Bildung Zementoblasten und Fibroblasten beteiligt sind. Somit sind vor allem das azelluläre Fremdfaserzement und das zelluläre Gemischtfaserzement durch den hohen Anteil an von außen einstrahlenden, dicht gepackten Faserbündeln (*Sharpey-Fasern*) für die Zahnverankerung im Knochenfach von Bedeutung (Wolf & Rateitschak 2004).

### **Desmodont**

Das Desmodont bildet den *Peridontalspalt* zwischen Alveolarknochen und Wurzelzement der Zähne und besteht aus einem gut vaskualisierten, zell- und faserreichen Bindegewebe. Es ist in Ruhe ca. 0,25 Millimeter breit, verbreitet sich bei Belastung und nimmt mit zunehmendem Alter ab; aufgrund einer koronalen und apikalen Verbreitung erinnert seine Form an eine Sanduhr (Hellwig 2009).

Durch die bandartige Aufhängung des Zahnes in der Alveole versteht sich das Desmodont als gelenkige Syndesmose, welche verhindert, dass der Zahn auf knochenabbaufördernden Druck belastet wird, indem einwirkende Kräfte in Zugbelastung um-

gewandelt werden (Lüllmann-Rauch 2012, Buddecke 1981). Zudem erfolgt durch eine Verschiebung von Gewebeflüssigkeit eine Dämpfung der mastikatorischen Kräfte im Sinne einer hydraulischen Druckverteilung (Wolf & Rateitschak 2004).

Die Kollagenfasern des Desmodonts werden durch hochaktive Fibroblasten schneller auf- und abgebaut als in anderen Bindegeweben und ermöglichen so beispielsweise die Stellungsänderung von Zähnen während einer kieferorthopädischen Behandlung (Lüllmann-Rauch 2012).

### **Alveolarfortsatz**

Als zahntragender Knochenanteil des Ober- und Unterkiefers bildet sich dieser im Zuge des Zahndurchbruches und schwindet bei Zahnlosigkeit aufgrund der fehlenden mechanischen Beanspruchung (Lüllmann-Rauch 2012, Hellwig 2009).

Der Alveolarknochen endet physiologisch ca. zwei bis drei Millimeter unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze (*biologische Breite* oder *dentogingivaler Komplex*) und unterliegt einer ständigen Remodellierung durch Osteozyten, Osteoklasten und Osteoblasten (Lüllmann-Rauch 2012, Galgali 2011, Wolf & Rateitschak 2004).

Der dentogingivale Komplex setzt sich zusammen aus dem Sulkus (ca. 1 mm), dem Saumepithel als epitheliales Attachement (ca. 1 mm) und dem bindegewebigen Attachement des Faserapparates (ebenfalls ca. 1 mm). Studien zeigen, basierend auf den Veröffentlichungen von Gargiulo et al. (1961), dass das Ausmaß des dentogingivalen Komplexes stark variiert; im Durchschnitt wurde für gesunde Zähne eine Distanz von 2,04 Millimetern ermittelt (Januário 2008, Wolf & Rateitschak 2004).

Die äußere Begrenzung des Alveolarknochens bildet die *Substantia compacta*, welcher wiederum die auskleidende Schleimhaut der Mundhöhle aufliegt. Am Eingang des Zahnfaches, der sogenannten Alveole, befindet sich die *Lamina cribriformis*, eine löchrige Knochenmembran, durch deren zahlreiche Öffnungen (Volkman-Kanäle) Blutgefäße und Nerven mit dem Desmodontalraum kommunizieren. Diesen beiden Strukturen zwischengelagert ist die weitmaschige, knochenmarkbeinhaltende *Substantia spongiosa* (Wolf & Rateitschak 2004). Die Außenkortikalis des Alveolarfortsatzes ist im Unterkieferfrontzahnggebiet und im Oberkiefer vestibulär dünner als oral und begünstigt häufig die Entstehung von Knocheneinziehungen (Dehiszenzen) und Knochenfenstern, sogenannten Fenestrationen (Hellwig 2009, Wolf & Rateitschak 2004).

## 1.2 Invisalign®-System

Das Invisalign-Schienensystem (vgl. Abb. 2) stellt eine ästhetische und parodontalfreundliche Alternative zur herkömmlichen Multiband- bzw. Multibracketapparatur dar (Rossini 2014, Bai 2009).



Abb. 2: Invisalign-Schienensystem ([www.invisalign.de](http://www.invisalign.de))

Im Jahr 1997 wurde die Firma *Align Technology* (Invisalign®, Align Technologies, Santa Clara, CA, USA) von Zia Chishti und Kelsey Wirth gegründet, welche die Idee einer „unsichtbaren“ kieferorthopädischen Behandlungsmethode erneut aufgriff.

Bereits 1945 hatte H. D. Kesling erstmals die Idee, durch Schienensysteme Zahnkorrekturen zu ermöglichen, scheiterte jedoch an den damaligen hohen Labor- und Materialkosten (Frongia 2012, Götz 2010, Brachwitz 2001).

Aufgrund der internetbasierten CAD / CAM-gestützten Technologie wird eine unkomplizierte Zusammenarbeit zwischen Align Technology, behandelndem Kieferorthopäden und Patienten über die Landesgrenzen hinaus ermöglicht. Im Jahr 2001 ging Align Technology an die Börse und startete eine der größten Öffentlichkeitskampagnen der Zahnmedizin. Zu diesem Zeitpunkt waren in den USA 75 Prozent der Kieferorthopäden Invisalign-Technik-zertifiziert und über 30.000 Patienten mithilfe der Invisalign-Technik therapiert (Brachwitz 2001).

Der Hauptindikationsbereich umfasst hierbei dentoalveoläre Korrekturmöglichkeiten bei moderatem frontalem Eng- und / oder Lückenstand, Protrusion und / oder Retrusion der Front, geringer In- und / oder Extrusion (mithilfe eines Einsatzes von auf der Zahnoberfläche angebrachten Kunststoffknöpfchen / Attachements) und stabiler neutraler Interkuspitation. Unter Zuhilfenahme von Hilfsmitteln erweitert sich das Indikationsgebiet um die Extrusion, Derotation vor allem von Prämolaren und Eckzähnen und den Lückenschluss nach Prämolarenextraktion. Zuletzt können die Aligner kurzfristig und langfristig zur Zahnretention eingesetzt werden. Umfangreiche vertikale rotatorische oder translatorische Korrekturen bedürfen weiterer, zum Teil festsitzender kieferortho-

pädischer Hilfsmittel, stellen jedoch keineswegs eine Kontraindikation dar (Götz 2010, Zawawi 2014). Die der Invisalign-Therapie zugrunde liegende Idee stützt sich auf die vorherige visuelle Planung der Zahnbewegungen (*Clincheck*, vgl. Abb. 3) und die Anfertigung von Setup-Modellen am Computer (*Computer aided Design*).

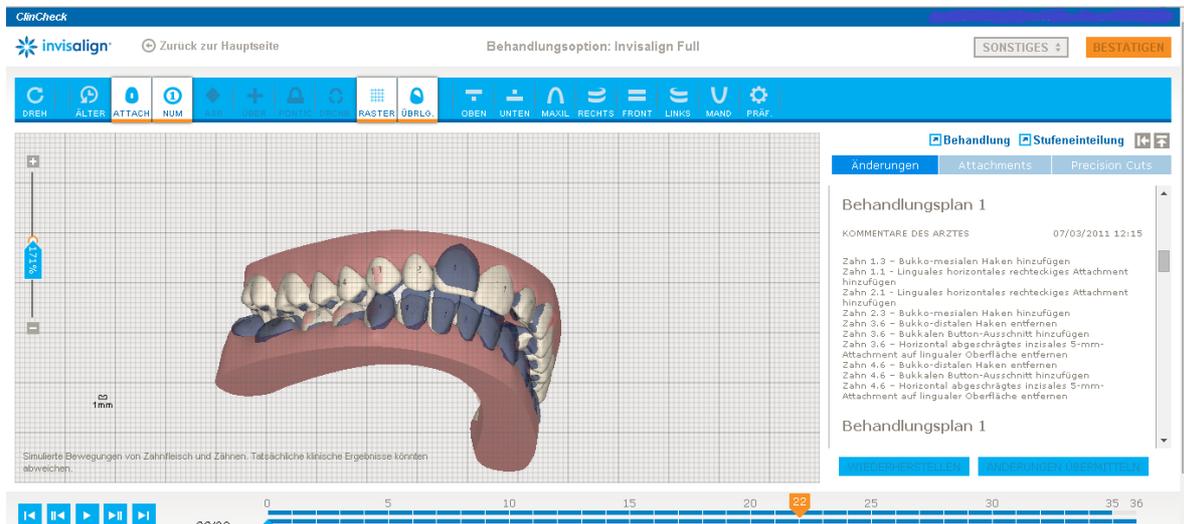


Abb. 3: *Clincheck*; simulierte Bewegung von Zahnfleisch und Zähnen im Zuge der virtuellen Behandlungsplanung

Im Anschluss erfolgen mithilfe der Stereolithographie die Schienenherstellung (*Computer aided Manufacturing*) und eine schrittweise Überführung der geplanten Zahnbewegungen (vgl. Abb. 4 und 5). Bei einer Tragedauer von 14 bis 21 Tagen pro Schiene kann eine Zahnbewegung von 0,15 bis drei Millimetern erzielt werden – vorausgesetzt, der Patient hält sich an die empfohlenen 20 Stunden Tragezeit pro Tag. Im Mittel erfordert die Korrektur von einfachen Zahnfehlstellungen zehn bis 20 Schienen, für komplexe Behandlungsplanungen werden ca. 20 bis 50 Schienen benötigt (Frongia 2012, Göz 2010).



Abb. 4: *Patientenfall*. Ausgangsposition, klinische Befunderhebung vor Behandlungsstart



Abb. 5: *Patientenfall*. Situation nach je 35 Schienen im Ober- und Unterkiefer. Im Anschluss an diesen Zwischenbefund erfolgten noch ein abschließendes Case Refinement und die Retention.

Sollte das Behandlungsergebnis am Ende der Schienentherapie nicht zufriedenstellend sein, schließt sich ein sogenanntes *Case Refinement* an, in dessen Rahmen noch weitere schienengeführte Korrekturen möglich sind. Langfristig erfolgt die Sicherung des Behandlungsziels durch Retention mithilfe von *Viveraretainern* oder oralen *Kleberretainern*.

### 1.3 Kieferorthopädische Begriffserklärung

Die Kieferorthopädie beschäftigt sich mit der Erkennung, Behandlung und Verhütung von Fehlentwicklungen der Zähne und Kiefer (*Dysgnathie*). Bei Zahnfehlstellungen sind Zähne außerhalb des idealen Zahnbogens positioniert und können neben einer ästhetischen Beeinträchtigung zu okklusalen Störungen führen (Harzer 2011).

Dabei unterscheidet man je nach vertikaler und sagittaler Relation der Kieferbasen zueinander *skelettale* von *dentoalveolären Anomalien* und deren Kombination. Während dentoalveoläre Fehlstellungen eine fehlerhafte Zahnposition bei korrekter Kieferlage bezeichnen, begründen sich skelettale Dysgnathien auf einer Fehlentwicklung dieser oder einem gestörten Wachstum. Daher sind dentoalveoläre Korrekturen auch im Erwachsenenalter möglich, während eine nichtoperative, kieferorthopädische Korrektur skelettaler Fehlbildungen nur während der puberalen Wachstumsphase erfolgen kann (Nötzel 2008).

Bei der Klassifizierung der Dysgnathien spielen die Okklusion der Zähne und die Lagebeziehung der Kiefer eine übergeordnete Rolle (Kahl-Nieke 2009).

#### Transversale Anomalien

##### Engstand

Der Engstand beschreibt einen Platzmangel. Man unterscheidet hierbei verschiedene Formen: den primären, den sekundären und den tertiären Engstand.

Der *primäre Engstand* ist auf ein angeborenes Missverhältnis von Zahn- und Kiefergröße zurückzuführen. Dadurch sind die Zähne zu groß und / oder der Kiefer zu klein. Der *sekundäre Engstand* ist erworben und entwickelt sich während der Wechselgebissperiode: Aufgrund eines frühen Verlustes von Milchzähnen im Seitenzahnbereich oder approximaler Karies erfolgt ein Stützzonezusammenbruch; der Zahndurchbruch der Folgezähne ist aufgrund der insuffizienten Platzhalterfunktion der betroffenen Zähne gestört. Der *tertiäre Engstand* beschreibt den sogenannten Adoleszenzengstand und hat eine umstrittene Ätiopathogenese. Diskutiert werden der lebenslange Mesialdrift der Zähne, der Druck von Weisheitszähnen oder ein Wachstumsschub des Unterkiefers, hervorgerufen durch die Verknöcherung der *Synchondrosis sphenoccipitalis* und anschließende Steilstellung der Unterkieferfront (Weber 2010, Kahl-Nieke 2009).

### Weitstand

Der Weitstand beschreibt einen Platzüberschuss, ebenfalls aufgrund einer Größendiscrepanz von Zähnen und Kiefer. Die Zähne sind zu klein und / oder der Kiefer zu groß (Kahl-Nieke 2009).

### **Sagittale Anomalien**

Zur Klassifizierung der sagittalen Lage der Kiefer zueinander wird die Verzahnung beurteilt: Bei einer eugnathen Neutralverzahnung greift der mesiobukkale Höcker des oberen ersten Molaren in die Querrissur des unteren ersten Molaren (Harzer 2011). Im Wechselgebiss wird die Lage des Eckzahnes beurteilt; ein weiteres Beurteilungskriterium stellt die Frontzahnangulation dar. Der Lagebefund in der Sagittalen erfolgt klassischerweise durch die Unterteilung nach *Edward Hartley Angle*, dem Begründer der wissenschaftlichen Kieferorthopädie (Peck 2009).

### Angle-Klasse I (Neutralbisslage)

Die Eckzahnschneide des Oberkiefers greift zwischen Eckzahn und ersten Prämolaren des Unterkiefers. Es besteht – mit Ausnahme der mittleren Frontzähne im Unterkiefer und dem letzten Zahn im Oberkiefer – eine Zahn-zu-Zweizahn-Beziehung der Zähne bei Neutralbisslage (Weber 2010).

### Angle-Klasse II (Diastalbisslage)

Die untere Zahnreihe steht im Bezug zur oberen Zahnreihe distal. Unter Bezugnahme auf die Stellung der Frontzähne erfolgt eine Unterteilung in Klasse II/1 (Exvertiert / Spitzfront) und Klasse II/2 (Invertiert / Steilfront). Die Bezeichnung des Ausmaßes erfolgt durch eine Angabe der Distanz von der Neutralverzahnung in Prämolarenbreiten (Weber 2010).

### Angle-Klasse III (Mesialbisslage)

Die untere Zahnreihe steht im Bezug zur oberen Zahnreihe mesial. Auch hier wird das Ausmaß in Prämolarenbreiten angegeben (Weber 2010).

## **Vertikale Anomalien**

### Offener Biss

Bei einer Nonokklusion von Zähnen bzw. Zahngruppen spricht man von einem offenen Biss. Man unterscheidet hierbei – je nach Lokalisation des fehlenden Zahnkontaktes – einen *frontalen offenen Biss* von einem *seitlich offenen Biss* und einem *zirkulär offenen Biss* (Nötzel 2008, Roulet 2002).

### Tiefer Biss

Der *frontal tiefe Biss* beschreibt einen stärkeren Überbiss als die physiologischen zwei bis drei Millimeter und kann je nach Ausprägung zu einem traumatischen Einbiss in die Gaumenschleimhaut führen. Ein *seitlicher Tiefbiss* ist bei einem Kauflächen-Kontaktverlust im Seitenzahnbereich möglich (Nötzel 2008).

Neben der klinischen Untersuchung und Modellanalyse stellen ein ausgiebiger Röntgenbefund und eine Kephalemtrische Analyse eine aussagekräftige diagnostische Grundlage dar, um Pathogenese und Ätiologie von Zahnfehlstellungen sicher beurteilen zu können (Nötzel 2008).

## **1.4 Kieferorthopädische Behandlung und knöcherne Dehiszenzen**

Im Zuge der kieferorthopädischen Behandlung werden Zähne durch Kräfte bewegt. Voraussetzung ist hierbei die biochemische Möglichkeit des Remodelling durch Resorption und Apposition des Alveolarknochens. Hierbei erfolgt im Sinne des Wechselwirkungs-

prinzips *actio = reactio* (3. Newtonsches Axiom) auch ein reziproker Einfluss auf das Peridont als zahnumgebende Struktur.

Studien zeigen, dass Patienten ohne kieferorthopädische Behandlung bereits peridentale Läsionen aufweisen. Eine Studie an digitalen Volumentomographien ermittelte bei 51 Prozent der 4 319 untersuchten Zähnen Dehiszenzen und bei 37 Prozent Fenestrationen (Evangelista et al. 2010). Auch Rupprecht beschreibt in seiner Studie an kaukasischen Schädeln eine Prävalenz für Dehiszenzen von rund 40 Prozent (Rupprecht 2001), Nimigean ermittelte diesbezüglich einen leicht höheren Wert von 54 Prozent (Nimigean 2009).

Klinisch gehen Dehiszenzen meist mit einer gingivalen Rezession als Verlagerung des marginalen Gingivarandes apikal der Schmelz-Zement-Grenze einher (Patcas 2012, Löst 1984, Bernimoulin 1977). Begünstigt wird dies durch eine dünne faziale Knochenauflagerung der Wurzeln (Källestal 1992, Foushee 1985) und fehlende spongiöse Anteile. Im apikalen Bereich der Wurzeln zeigt sich die faziale Kortikalislamelle meist dicker, zwischen dieser und der Knochenalveole ist Spongiosa zwischengelagert (Rateitschack 2004, Rupprecht 2001). So zeigen Studien beispielsweise eine vestibuläre Knochendicke von weniger als zwei Millimetern im maxillären Eckzahn- und Prämolarenbereich (Jin SH et al. 2012).

Auch eine geringe Breite der keratinisierten *attached Gingiva* begünstigt gingivale Rezessionen (Källestal 1992, Foushee 1985, Tenebaum 1982).

Als potenzielle Risikofaktoren sind außerdem – neben einer genetischen Prädisposition – Nikotinabusus, bestimmte Ernährungsfaktoren, hormonelle Einflüsse und bakterielle Infektionen zu nennen (Bollen 2014, Melsen 2005). Auch eine falsche Putztechnik (Serino 1994, Khocht 1993, Sangnes 1976) oder eine Parafunktion durch orale Piercings (Hickey 2010, Slutzkey & Levin 2008) können an diesem multifaktoriellen Geschehen beteiligt sein. Des Weiteren scheint es ein vermehrtes Aufkommen bei einwurzligen Zähnen zu geben (Yoneyama 1988).

Während Fenestrationen vor allem im Oberkiefer festgestellt wurden (Nimigean 2009, Rupprecht 2001), konnten im Unterkiefer vermehrt Dehiszenzen diagnostiziert werden (Yagci 2012, Lund 2011, Nimigean 2009). Als prädisponierte Stellen für Dehiszenzen sind hierbei vor allem die Unterkieferfront und der Unterkiefereckzahn zu nennen (Mostafa 2009, Rupprecht 2001); diese zeigen sowohl vestibulär als auch oral eine generelle Anfälligkeit, während die Defekte bei den restlichen Zähnen vor allem vestibulär aufzufinden sind (Evangelista et al. 2010).

Während die Prävalenz der Rezessionen und Dehiszenzen in der Mehrzahl der Studien geschlechterunspezifisch erscheint (Weigang 2015, Jäger 2015, Nahm et al. 2012, Nowzari et al. 2010), stellt das Patientenalter einen Progressionsfaktor dar (Weigang 2015, Garib 2010, Yoneyama 1988). Vereinzelt gibt es in der Literatur Anhaltspunkte für ein erhöhtes Aufkommen von Dehiszenzen bei weiblichen Patienten, während bei männlichen Patienten ein signifikant höheres Ausmaß der Defekttiefe festzustellen war (Weigang 2015, Springer 2012).

Auch kieferorthopädische Malokklusionen stehen in Verbindung mit peridentalen Erkrankungen. So zeigt die Mehrheit der Querschnittstudien einen höheren Anteil an gingivaler Rezession und peridentalem Knochenverlust bei Patienten mit kieferorthopädischen Fehlstellungen als bei Personen, die keine Malokklusion aufweisen (Bollen 2014). Während hierbei bezüglich der Gesichtstypen kein Unterschied festgestellt wurde, konnten bezüglich der Befundklassen Abweichungen ermittelt werden. So zeigen Weitstandpatienten weniger Prävalenz für Dehiszenzen als Engstand- oder Normalstandpatienten (Enhos 2012). Klasse-I-Patienten zeigten zudem peridentale Defekte in beiden Kiefern, und es konnte ein im Vergleich zu Klasse II/1 um 35 Prozent höheres, signifikantes Vorkommen der Dehiszenzen ermittelt werden (Evangelista et al. 2010). Diese Hypothese wurde in einer aktuellen Studie widerlegt; hier konnte eine signifikante Prävalenz für Dehiszenzen bei Klasse-II/1-Patienten im Vergleich zu Klasse-I-Patienten ermittelt werden (Weigang 2015). Während bei Klasse-II-Patienten eine signifikant höhere Prävalenz für Fenestrationen festzustellen war, zeigten Klasse-II- und Klasse-III-Patienten vermehrt Defekte im Unterkiefer (Yagci 2012). Klasse-III-Patienten waren vor allem anfällig für peridentale Knochenverluste im oralen Unterkiefer-Frontzahnbereich (Kook 2012).

Auch die kieferorthopädische Behandlung steht in Zusammenhang mit peridentalen Knochenläsionen. Zum einen ist die Mundhygiene bei festsitzenden Apparaturen erschwert und eine erhöhte Plaque-Akkumulation wahrscheinlich (Singh 2009, Valderhaug 1980), zum anderen kann die Behandlung an sich schädlich für das Parodontalgewebe sein (Bollen 2014). So wiesen Personen, die eine kieferorthopädische Behandlung erhalten hatten, eine größere parodontale Taschentiefe sowie mehr gingivale Rezessionen auf (Bollen 2014, Weigang 2015, Slutzkey and Levin 2008). Besonders die übermäßige Protrusion unterer Frontzähne (Lee 2012, Yu 2009) und die dentale Expansion (Domann et al. 2011, Cobridge et al. 2011, Cattaneo et al. 2010) werden hierbei kritisch betrachtet. Nur wenige Patienten zeigten eine oppositionelle Ex-

pansion, vielmehr wurde dies durch eine Bukkalkippung der Zähne erreicht (Domann 2011, Cattaneo et al. 2010), verbunden mit peridentalem Knochenverlust (Cobridge et al. 2011). Die peridentale Situation verschlechterte sich signifikant mit der Veränderung der bukkolingualen Neigung der Zähne (Nimigean 2009).

Des Weiteren wurde anhand von DVT-Studien eine Reduzierung der Knochendichte während der kieferorthopädischen Behandlung ermittelt (Hsu 2011, Ma 2010), bei vorliegender Parodontitis war diese ebenfalls signifikant (Ma 2010).

Viele dieser Studien zeigen, wie wichtig die Dosierung der kieferorthopädischen Kräfte ist (Garib 2010, Rothe 2006), und dass aufgrund der Abhängigkeit des langfristigen Therapieerfolges von der prätherapeutischen Knochenstruktur im Zuge der Behandlungsplanung eine vorherige nichtinvasive Untersuchung des peridentalen Knochenangebotes sinnvoll sein kann (Mostafa 2009, Nahm et al. 2011, Wehrbein 1995).

## **1.5 Klassische bildgebene Diagnostik parodontaler Defekte**

In der Zahnmedizin und Kieferorthopädie stellen Röntgenaufnahmen einen wichtigen Teil der Routinediagnostik dar. Sie dienen der Diagnosefindung sowie Diagnosesicherung und liefern oftmals wichtige Nebenergebnisse (Weber 2010, Müssig 2005). Dabei gilt stets im Sinne des ALARA-Prinzips („As Low As Reasonably Achievable“), dass die Strahlenbelastung für den Patienten so klein gehalten werden sollte, wie dies mit vernünftigem Aufwand möglich ist (Farmann 2005, Pasler 2000). In den letzten Jahren wird im Zuge der Digitalisierung der herkömmliche Röntgenfilm schrittweise von Speicherfolien und Sensoren abgelöst. Neben der Reduzierung der Strahlenbelastung sowie dem langfristig wirtschaftlichen und umweltfördernden Aspekt spielen hier vor allem der Zeitgewinn, die leichtere Archivierung und die Möglichkeit der Bildbearbeitung eine Rolle; teilweise mit Einbußen bei Auflösung und Schärfe (Pasler 2008, Düker 2000, Eickholz 1996). In der konventionellen Darstellung parodontaler Defekte stehen klassischerweise der Parodontalstatus mit 14 intraoralen Bildern, die Bissflügelaufnahme im Seitenzahnbereich und die Panoramaschichtaufnahme als Erstaufnahme, mit ergänzenden intraoralen Einzelbildern im Sinne von Zielaufnahmen, zur Verfügung (Pasler 2008). Bei allen Aufnahmemethoden ist eine standardisierte Röntgentechnik notwendig, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen (Eickholz 1996).

### Einzelzahnfilm

Der Einzelzahnfilm ist ein in allen Bereichen der Zahnmedizin weit verbreitetes diagnostisches Hilfsmittel. Die Rechtwinkel-Paralleltechnik stellt bei der Diagnostik parodontaler Defekte den Goldstandard dar (Eickholz 1996). Um eine möglichst detailgetreue röntgendiagnostische Beurteilung zu ermöglichen, muss die Ebene des Bildempfängers möglichst parallel zum Verlauf des Limbus alveolaris und der Zahnachse ausgerichtet werden. Des Weiteren sollte der Zentralstrahl orthoradial und marginal geführt werden (Pasler 2008). Die effektive Strahlendosis wird mit 1 bis 8,3  $\mu$ SV angegeben (Okano et al. 2009, Kiefer 2004, Patel 2004).

### Bilderstatus

Basierend auf der Technik des Einzelzahnfilms erfolgt die Anfertigung von Bilderserien der zahntragenden Kieferabschnitte. Falls dies bereits bei sehr kleinen Kindern erfolgen muss, kann der *Röntgenstatus nach Ben-Zur* verwendet werden. Hierbei handelt es sich um zwei Bissflügelaufnahmen, die durch zwei Einzelbilder als Aufbissaufnahme in der Front ergänzt werden. Je nach Kiefergröße und Zahnzahl eignet sich auch der *Sechserstatus nach R. Hotz*, bei dem das Ganze noch durch zwei weitere Bissflügelaufnahmen ergänzt wird. Der Panoramaschichtaufnahme sollte hier jedoch der Vortritt gewährt werden (Pasler 2008). Im Wechselgebiss empfiehlt sich ein *10-Bilder-Status*, je nach Platzangebot kann der Bildträger im Hoch- oder Querformat angeordnet werden (Pasler 2008). Voll bezahnte Jugendliche und Erwachsene werden durch einen 14-Bilder-Status erfasst; hier erfolgt im Front-, Eckzahn- und Prämolarengbiet die Ablichtung im Hochformat, im Molarenbereich hat sich die Trägerpositionierung im Querformat bewährt (Pasler 2008). Es ergibt sich je nach analogem oder digitalem Verfahren, Anzahl der Bilder und eingestellten physikalischen Parametern eine Strahlenbelastung mit einer effektiven Dosis von 4,1 bis 78  $\mu$ SV (Pasler 2008, Kiefer 2004).

### Bissflügelaufnahme

Die Bissflügelaufnahme, mit einer effektiven Dosis von 1 bis 8,3  $\mu$ SV, stammt klassischerweise aus der Kariesdiagnostik und kann ebenfalls zur Beurteilung marginaler Knochenstrukturen herangezogen werden (Patel 2009, Okano et al. 2009, Reed et al. 1984). Die Bildempfängerpositionierung erfolgt retrokoronal in Schlussbisslage, der Zentralstrahl sollte möglichst im rechten Winkel auf die zu befundende Region gerichtet werden (Pasler 2008).

## Panoramaschichtaufnahme

Die extraorale Aufnahmetechnik der Panoramaschichtaufnahme dient einer möglichst umfassenden Übersichtsdarstellung des gesamten stomatognathen Systems (Düker 2000). Eine gegensinnige, um den Gesichtsschädel ablaufende Rotation von Röhre / Sender und Kassette bzw. Sensor / Empfänger zeichnet hierbei die einzelnen Kieferabschnitte des im Zentrum stehenden Patienten in einer variablen Schichtbreite auf. Neben den zahntragenden Anteilen des Ober- und Unterkiefers werden die aufsteigenden Äste, die Kiefergelenke, die nasomaxilläre Region, der basale Anteil der Kieferhöhlen, der Korpus des Unterkiefers und die lateralen Halsanteile dargestellt (Pasler 2008). Seit den 90er Jahren erfolgt auch hier eine Umstellung auf digitale Systeme, jedoch findet das analoge Verfahren noch heute in der Mehrheit der Zahnarztpraxen Anwendung (Kiefer 2004, Düker 2000). Bezüglich der Strahlenbelastung ergeben sich für konventionelle und digitale Aufnahmen je nach eingestellten physikalischen Parametern mittlere effektive Dosen zwischen 4,9 und 19,1  $\mu\text{SV}$ , es wurden jedoch auch Werte von 54  $\mu\text{SV}$  ermittelt (Pasler 2008, Kiefer 2004). All diese Methoden bewegen sich im zweidimensionalen Raum und machen es erforderlich, die Bilder immer im Zusammenhang mit klinischen Parametern zu beurteilen (Eickholz 1996).

Aufgrund des Strahlenganges und Drehpunktes der Röntgenstrahlen bei der Panoramaschichtaufnahme werden nur diejenigen feinen Strukturen deutlich aufgezeichnet, welche in der Strahlenrichtung des Zentralstrahls liegen. Außerhalb der Schicht befindliche Strukturen werden verwischt, verformt, in den Kiefer hineinprojiziert oder vergrößert dargestellt (Pasler 2008, Al Bournay 1999). So werden beispielsweise die vestibulären und oralen Alveolarwände aufgrund ihrer geringen Dichte durchgeschlagen und unsichtbar (Pasler 2008). Des Weiteren führt die dreimalige Darstellung der Halswirbelsäule zu störenden Überlagerungen in der Medianebene und lässt oftmals die Beurteilung des Frontzahngebietes nicht zu (Pasler 2008).

Bei der Darstellung parodontaler Defekte ist das Einzelbild bzw. der Bilderstatus der Panoramaschichtaufnahme überlegen und daher vorzuziehen (Eickholz 1996). Jedoch muss dabei beachtet werden, dass bei einem vollbezahnten Patienten und 14 Einzelbildern die Exposition die der Panoramaschichtaufnahme um ein Vielfaches übersteigt – so entsprechen 20 Einzelbilder der Strahlenbelastung von fünf Panoramaschichtaufnahmen (Pasler 2008).

Die Möglichkeiten zur detailgetreuen Darstellung parodontaler Erkrankungen bei zweidimensionalen Projektionen werden auch im Einzelbild durch Summationseffekte legi-

timiert: Während die interdentalen Septen bei korrektem Strahlengang und richtiger Belichtung detailgetreu wiedergegeben werden können, sind Dehiszenzen der vestibulären Alveolarwände aufgrund der Additionseffekte der stark verschatteten Zahnwurzel nicht wahrzunehmen (Pasler 2008). Dadurch können zwei- bzw. dreiwandige Knochendefekte in vestibulo-oraler Richtung eingeschränkt dargestellt werden (Gomes-Filho et al. 2007, Mengel 2005, Mengel 2006). Des Weiteren besteht bei Überbelichtung die Gefahr der Überbewertung des Knochenverlustes im Bereich der dünnen Septumspitzen (Pasler 2009, Gomes-Filho et al. 2007).

Die Zielsetzungen der modernen Zahnmedizin erfordern überlagerungsfreie Darstellungen ohne Artefakte oder Summationseffekte, um Fehlinterpretationen zu vermeiden (Pasler 2008). So haben in den letzten Jahren gerade in der Implantologie, der Kieferorthopädie und der Parodontologie die Computer-Tomographie (CT) und die digitale Volumetomographie (DVT) an Bedeutung gewonnen (Pasler 2008, Kruse 2008, Monsour 2008, Mengel 2005, Fuhrmann 1996).

Durch die computergestützte Bearbeitung der Rohdaten werden bei der CT aus den verschiedenen radiologischen Bilddaten Schnittbilder erzeugt und eine – abgesehen von Metallartefakten – überlagerungsfreie Darstellung erreicht (Pasler 2008). Dieses Aufnahmeverfahren eignet sich vor allem für die Diagnostik ossärer Strukturen, geht jedoch je nach Untersuchungsbereich mit einer effektiven Dosis von ca. 280 bis 1270  $\mu$ SV und daher im Vergleich zu den konventionellen Röntgenmethoden mit einer erhöhten Strahlenbelastung einher (Wu 2015, Cohnen 2012, Loubele et al. 2009, Okano et al. 2009, Monsour 2008, Ludlow 2008, Weber 2008, Fuhrmann 1996).

Gerade im Hinblick auf das Verhältnis Informationsgewinn / Strahlenbelastung hat die DVT, aufgrund der enormen Informationsdichte bei reduzierter Strahlenexposition und verminderten Metallartefakten, im Vergleich zur CT einen besonderen Stellenwert in der indikationsgetragenen Diagnostik (Soares 2015, Nardi et al. 2015, Christou 2014, Januário 2008, Weber 2008, Schulze et al. 2004, Ziegler 2002).

## **1.6 Digitale Volumetomographie (DVT) in der Kieferorthopädie**

Die digitale Volumetomographie ist ein geeignetes und zuverlässiges Verfahren zur Lokalisation von Hartgewebsstrukturen, welches zeigt, wie viel Knochen für Zahnbewegungen zur Verfügung steht (Bessenroth 2015, Christou 2014, Lund 2011, Timock 2011, Lund 2010, Januario 2008, Müssig 2005). Anfänglich fast ausschließlich in der Implantologie vertreten, findet sie mittlerweile neben der orthognathen Chirurgie auch in

der Kieferorthopädie zunehmend Verwendung (Machado 2015, Popat 2010, Ito 2002, Silva 2008). Während zum Hauptindikationsgebiet der DVT laut diversen Stellungnahmen verlagerte Zähne gehören (DGKFO, S2k Leitlinie DGZMK), stellt sie mit rund 20 Prozent eine verhältnismäßig kleine Gruppe dar, vergleicht man dies mit über 50 Prozent Prävalenz für vestibuläre und orale Dehiszenzen (Cağlayan 2012, Evangelista et al. 2010). Knocheneinbrüche und Furkationsbeteiligungen können mithilfe der DVT deutlich besser beurteilt werden als durch intraorale Röntgenaufnahmen. Von 30 vorhandenen Defekten konnten so beispielsweise 91 Prozent Einbrüche und 100 Prozent der Furkationsbeteiligung nachgewiesen werden, zweidimensionelle Diagnostik erreichte hierbei nur 29 Prozent bzw. 44 Prozent (Vanderberghe 2007). Auch im Vergleich zum Fernröntgenseitenbild zeigte die DVT bezüglich des peridental Knochenangebotes reproduzierbarere Ergebnisse (Patcas 2012). Jedoch spielen auch technische Parameter wie das verwendete Auflösungsprotokoll und die Kantenlänge der Voxelgröße eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung des peridental Knochenangebotes (Springer 2012). So besteht bei 0,125 Millimetern Voxelgröße und sehr dünnen Knochenstrukturen von weniger als einem Millimeter die Gefahr der Überschätzung von Dehiszenzen und Fenestrationsen, ausreichend präzise Ergebnisse bei gleichzeitig geringem Risiko falsch negativer Ergebnisse für Knochenstrukturen ab 0,4 Millimetern wurden mit einer Voxelgröße von 0,25 Millimetern erreicht (Patcas 2012, Schattmann 2011). Die Erkennbarkeitsgrenze filigraner ossärer Strukturen wird bei einer Voxelgröße von 0,3 Millimetern in einer aktuellen Studie mit 0,39 Millimetern Knochendicke angegeben, hier erfolgte eine durchschnittlich zu geringe Darstellung der Knochenhöhe um 0,13 Millimeter (Bessenroth 2015).

Bei der dentalen Volumetomographie wird, im Vergleich zum eng kollimierten Strahlenbündel der CT, mithilfe eines kegelförmigen (Cone-beam) Strahlenbündels innerhalb einer vollen Umdrehung eine bestimmte Anzahl von Durchleuchtungen aufgenommen. Aus den primären Rohdaten (DICOM-Datensatz) werden die verschiedenen Ebenen sekundär rekonstruiert (Schwenzer 2008). Die Schichtdarstellungen der Aufnahmen sind je nach Gerät bis 0,125 Millimeter Schichtdicke möglich (z. B. KaVo 3D eXam), der Bildaufbau wird mit dreidimensionalen Pixeln, dem sogenannten *Voxel*, erreicht. Hierbei können die Voxel eine Kantenlänge von 0,076 bis 0,4 Millimetern aufweisen und bestimmen die Auflösung der abgelichteten Strukturen (Krause 2013). Die Aufnahmen können in allen Raumebenen in axialer, sagittaler und koronaler Ansicht betrachtet werden (Songa 2014, Kruse 2008), zusätzlich ist die Rekonstruktion einer frei drehba-

ren dreidimensionalen Darstellung möglich (Schwenzer 2008). Die Expositionszeit beträgt bei 100 bis 400 Einzelaufnahmen ca. 15 Sekunden mit Multipulsgenerator und ermöglicht so je nach gewählter Bildgröße (Field of View) eine Reduzierung der Strahlenbelastung um bis zu 76 Prozent im Vergleich zur Computer-Tomographie (Pasler 2008, Schulze 2004, Ziegler 2002, Arai 1999). Das Field of View (FoV) kann in seinen Ausmaßen je nach Gerätetyp zwischen drei mal vier und 26 mal 23 Zentimetern variieren und in ein kleines, mittleres und großes FoV unterteilt werden, je nach kraniofazialer oder dentoalveolärer Fragestellung bzw. Behandlungsplanung (Krause 2013, Davies 2012, Grünheid 2012, Ludlow 2008). Die Informationsbreite umfasst hierbei je nach gewähltem Ausschnitt die anatomischen Strukturen der vorderen Schädelbasis, Mandibula, des dento- und nasomaxillären Systems, auditive Anteile des Mittelohrs und den Bereich der oberen Atemwege (Suomalainen 2015, Dierckx 2015, Celenk 2010, Bremke 2009).

Digitale Volumentomographen stellen keine homogene Gerätegruppe dar, vielmehr findet man eine Streuung der effektiven Dosen bis über 1073  $\mu\text{Sv}$  (vgl. Abb. 6).

DVT-Geräte	Auflösungen →	Großes FOV			Mittlers FOV			Kleines FOV		
		hoch	normal	klein	hoch	normal	klein	hoch	normal	klein
<b>Accutomo 3D</b>	Lofthag-Hansen et al. 2008								60	
	Loubele et al. 2009								29	
	Okano et al. 2009								60	
	Suomalainen et al. 2009								63	
	Pauweles et al. 2010					54			43	
<b>NewTom VGi</b>	Pauweles et al. 2010		139			256				
<b>NewTom 3G</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008		68							
	Loubele et al. 2009		44							
<b>Classic i-CAT</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008		235			102				
	Loubele et al. 2009		65						56	
<b>Next Generation i-CAT</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008		74			87				
	Roberts et al. 2009		206			134		141	78	
	Pauweles et al. 2010		83			45				
	Davies et al. 2012		78			77				
	Grünheid et al. 2012	129	66			100				
<b>Iluma Standard</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008			98						
<b>Iluma Ultra</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008			498						
<b>Promax 3D</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008								570	
	Suomalainen et al. 2009								269	
	Pauweles et al. 2010							122		28
	Qu et al. 2010		298			102			216	
<b>PreXion 3D</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008						388	189		
<b>Galileos Comfort</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008				128	70				
	Pauweles et al. 2010		84							
<b>Kodak 9500</b>	Pauweles et al. 2010		136			92				
	Ludlow et al. 2011		163			98				
<b>Kodak 9000 3D</b>	Pauweles et al. 2010								30	
<b>Picasso Trio</b>	Pauweles et al. 2010				123		81			
<b>Scanora 3D</b>	Pauweles et al. 2010		68			46				
<b>Veraviewepocs 3D</b>	Pauweles et al. 2010					73				
<b>Cb MercuRay</b>	Ludlow & Ivanovic et al. 2008	1073	569			560			407	
	Okano et al. 2009					511				

Abb. 6: Effektive Dosen verschiedener DVT-Geräte. Angabe in  $\mu\text{Sv}$ . Berechnung der effektiven Dosen nach den ICRP-Richtlinien 2007 (Gomolka 2013).

Die Strahlendosis variiert je nach Field of View, Röntgenröhrenspannung und Röntgenröhrenstrom, Expositionszeit und Schutzmaßnahmen abhängig vom System des verwendeten Gerätes (Grünheid 2012, Hirsch 2008, Silva 2008).

Die Masse der gängigen DVT-Geräte benötigt laut einer umfangreichen Studie von Pauwels et al. mittlere effektive Dosen von 20 bis 600  $\mu\text{Sv}$  (Pauwels et al. 2010).

Während Grünheid (2012) eine effektive Dosis von 65 bis 70  $\mu\text{Sv}$  für normalauflösende Aufnahmen und mittleres oder großes FoV ermittelte (Grünheid 2012), machen neueste Geräte sogar eine Exposition von nur elf bis 26,9  $\mu\text{Sv}$  möglich und bewegen sich damit im Bereich der Strahlenbelastung konventioneller Panoramaschichtaufnahmen (Bumann 2014, Ludlow 2013, Loubele et al. 2009).

Im Zuge der kieferorthopädischen Behandlungsplanung werden meist mehrere radiologische Aufnahmen benötigt. So wird beispielsweise vorab beim Überweiser eine Panoramaschichtaufnahme zur Übersicht der Dentition und des Versorgungsstandes erstellt, eventuelle indikationsbezogene Einzel- oder Aufbissbilder in der Front, Bissflügelaufnahmen im Seitenzahnbereich zur Kariesdiagnostik und mindestens ein Fernröntgenseitenbild vor Therapiestart beim Kieferorthopäden. Erfolgt eine Summation der einzelnen effektiven Dosen, bewegt man sich mit 13 bis 100  $\mu\text{Sv}$  im Bereich der dreidimensionalen volumetomographischen Diagnostik bei geringerem Informationsgehalt der Einzelbilder (Silva 2008, Müssig 2005, Gibbs 2000).

Um im ALARA-Prinzip des Strahlenschutzes zu handeln, sollte daher eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen der Zahnmedizin und der Hals-Nasen-Ohrenkunde erfolgen, um Mehrfachanfertigungen von radiologischen Bildern im Kopf-Hals-Bereich zu verhindern (Silva 2008). So wurden beispielsweise 207 im Zuge der Behandlungsplanung angefertigte DVT auf nicht indikationsbezogene Nebenbefunde untersucht, wofür sie eine Prävalenz von 92,8 Prozent zeigen. Die meisten Nebenbefunde wurden in den oberen Atemwegen gefunden, gefolgt von verlagerten Zähnen, Kiefergelenkbefunden und endodontischen Läsionen (Cağlayan 2012). Des Weiteren ist es wichtig, Geräte zu schaffen, bei denen im Sinne der Expositionsminde rung FoV und weitere individuelle Einstellparameter variabel und individuell gewählt werden können (Ludlow 2008). So stellt das *Sirona-Gerät Galileos Comfort* in Deutschland eines der meist verwendeten DVT-Geräte dar, lässt aufgrund eines fixen FoV von 15 Kubikzentimetern eine individuelle, indikationsbezogene Auswahl der zu untersuchenden anatomischen Strukturen jedoch nicht zu. Das finnische Unternehmen *Planmeca* stellte im Herbst 2014 in Münster ein Konzept vor, bei dem neben verschie-

denen FoV- und Auflösungseinstellungen im Sinne des IADR (Indikations-abhängiges Dosis-Reduktions-Prinzip) auch weitere einstellbare individuelle Parameter zu einer starken Dosisreduktion führen (Bumann 2014). Denn eine alleinige Reduktion des FoV geht nicht zwingend mit einer Reduktion der effektiven Dosis einher: So können die effektive Dosis für eine Aufnahme des Gesichtsschädels bei einem FoV von 13 mal 16 Zentimetern und eine Aufnahme der Maxilla mit einem FoV von sechs mal 13 Zentimetern mit 77  $\mu\text{Sv}$  dieselbe effektive Dosis aufweisen, bei unterschiedlichem Informationsgehalt (Loubele et al. 2009). Auch wenn bei einer Strahlenbelastung von 12  $\mu\text{Sv}$  die Auflösung der Beantwortung aller Indikationen noch nicht gerecht werden kann, zeigt diese Entwicklung der Industrie zukunftsweisend die Richtung zur strahlenreduzierten dreidimensionalen Diagnostik in der Zahnmedizin.

Denn gerade in Anbetracht der fortwährenden Reduktion effektiver Dosen wird in Wissenschaft und Praxis bei entsprechender Indikationslage die Forderung nach zusätzlichen diagnostischen Informationen im Sinne einer allumfassenden interdisziplinären Behandlungsplanung den Weg der dreidimensionalen bildgebenden Diagnostik ebnen können.

## 2. Fragestellung

Die dentale Volumentomographie stellt eine wertvolle Röntgentechnik zur Untersuchung des gesamten stomatognathen Systems dar, bei der eine dreidimensionale radiologische Diagnostik bei gleichzeitiger Reduktion effektiver Dosen im Vergleich zur Computer-Tomographie bzw. zur konventionellen Röntgendiagnostik möglich ist. Im Zuge der kieferorthopädischen Behandlungsplanung angefertigte DVT bieten zudem eine Grundlage für weiterführende Diagnostik in allen zahnmedizinischen Bereichen. Studien haben gezeigt, dass das peridentale Knochenangebot durch kieferorthopädische Kräfte verändert werden kann, betreffende Studien konzentrierten sich jedoch vor allem auf Multibracket- bzw. Multibandapparaturen im Zuge der kieferorthopädischen Behandlungsmethodik. Inwieweit das Schienensystem Invisalign® ebenfalls das peridentale Knochenangebot beeinflusst, soll in dieser Studie geklärt werden. Hierbei steht die Überprüfung folgender Hypothesen im Vordergrund:

- 1) Knochendehiszenzen und Knochenbreiten können im DVT-Datensatz individuell und reproduzierbar vermessen werden.
- 2) Das peridentale Knochenangebot wird durch Behandlungsmaßnahmen mit Invisalign® verändert.
- 3) Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit vom Geschlecht auf.
- 4) Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit vom Alter auf.
- 5) Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit auf.
- 6) Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit von der Zahnart auf.
- 7) Das Ausmaß der durch Invisalign® bedingten Dehiszenzen ist unabhängig vom Angulationsausmaß der Zähne.

### 3. Methodik

#### 3.1 Allgemeine Methodik

##### 3.1.1 Patientengut

In der vorliegenden Arbeit wurden retrospektiv dentale volumetomographische Aufnahmen (DVT) aus dem dentalradiologischen, EU-zertifizierten Langzeitarchiv des Instituts MESANTIS<sup>®</sup> untersucht. Es wurde an 36 Datensätzen, welche aus kieferorthopädischer Indikation angefertigt wurden, 864 Zähne von 18 Patienten bezüglich des periodontalen Knochenangebotes vermessen und befundet.

Die Gruppe der 18 Patienten gliederte sich in je neun weibliche und männliche Patienten mit einem Durchschnittsalter von 32,25 Jahren, wobei das Patientenalter auf den posttherapeutischen Aufnahmezeitpunkt festgelegt wurde. Die Patienten ließen sich in sechs Gruppen mit je drei Patienten entsprechend Alter und Geschlecht einteilen. Die Einteilung der sechs Gruppen mit n = 18 lautete wie folgt:

Tab. 1: Gruppeneinteilung des Patientenkollektives

GRUPPE	Jahrgang	Durchschnittsalter	Anzahl
Weiblich, bis 21 Jahre	Jahrgang < 1993	15,3 Jahre	n = 3
Männlich, bis 21 Jahre	Jahrgang < 1993	16,6 Jahre	n = 3
Weiblich, bis 40 Jahre	Jahrgang < 1974	32,0 Jahre	n = 3
Männlich, bis 40 Jahre	Jahrgang < 1974	28,0 Jahre	n = 3
Weiblich, ab 41 Jahre	Jahrgang > 1973	51,0 Jahre	n = 3
Männlich, ab 41 Jahre	Jahrgang > 1973	50,6 Jahre	n = 3

Um eine Gewichtung der Befundklasse zu verhindern, beinhaltete jede Altersgruppe je einen Patienten aus den Untergruppen *Engstand*, *Weitstand* und *sagittale Anomalie*. Es ergab sich für jede Untergruppe eine Patientenverteilung von n = 6, ausschlaggebend war hierbei die Einstufung des Behandlungsbedarfs nach der kieferorthopädischen Indikationsgruppe (vgl. Tab. 2 und Abb. 7):

Tab. 2: Untergruppen Engstand / Weitstand / sagittale Anomalie

UNTERGRUPPE	Anzahl gesamt weiblich	Anzahl gesamt männlich
Engstandpatienten	n = 3	n = 3
Weitstandpatienten	n = 3	n = 3
Patienten mit sagittalen Anomalien	n = 3	n = 3



Abb. 7: Klinische Beispiele der Untergruppen *Engstand* (A), *Weitstand* (B) und *sagittale Anomalie* (C)

Alle Patienten wurden mithilfe der Invisalign®-Behandlungsmethodik therapiert und trugen die jeweiligen Schienen über einen Therapiezeitraum von 14 Tagen, mit durchschnittlich 32,95 Schienen im Oberkiefer und 32,60 Schienen im Unterkiefer, um das jeweilige Therapieziel zu erreichen. In 22,2 Prozent der Fälle schloss sich ein *Case Refinement* (zusätzliche Schienen zur Feineinstellung) an, eine Überkorrektur erfolgte in 33,3 Prozent der Fälle. Die Retentionsphase vor Scan der Endbefund-DVT betrug durchschnittlich 20,6 Tage / drei Wochen. Für jede DVT-Aufnahme lag im Sinne der aktuellen S1-Richtlinie der DGZMK eine rechtfertigende Indikation vor. Um ein reproduzierbares Ergebnis zu erreichen, wurden die zu evaluierenden DVT-Scans unter Berücksichtigung folgender Ausschlusskriterien ausgewählt: Es wurden ausschließlich von 6-6 vollbezahnte Patienten ohne Nichtanlagen, Implantat-Ersatz oder stark zerstörte Zähne sowie ohne vorherige Umstellungsosteotomie befundet. Des Weiteren lagen weder Patienten mit Anomalien in Zahnform bzw. Zahnzahl oder Syndrom-Patienten vor. Wichtige Kriterien waren zudem ein gesundes Parodontium, fehlende pathologische ossäre Prozesse und der Ausschluss von bereits vorliegenden Wurzelresorptionen sowie großen kariösen Läsionen (siehe Tab. 3).

Tab. 3: *Ausschlusskriterien*

<b>AUSSCHLUSSKRITERIEN</b>
Schaltlücken
Nichtanlagen
Implantat-Ersatz
Anomalien in Zahnform bzw. Zahnzahl
Syndrom-Patienten
Parodontitiden
Pathologische ossäre Prozesse
Wurzelresorptionen
Kariöse Läsionen

### 3.1.2 DVT-Parameter der Aufnahmen

Sämtliche Aufnahmen der vorliegenden Studie wurden im dentalradiologischen Institut MESANTIS<sup>®</sup>, Standort Wiesbaden, mit dem DVT-Gerät „MESANTIS<sup>®</sup> line“, einer Sonderedition des „iCAT platinum“ (Fa. ISI, Hatfield, USA, Abb. 8), unter folgenden Aufnahmeparametern angefertigt:

Tab. 4: Technische Daten MESANTIS<sup>®</sup> line

Sichtfeld (Field of View)	13 cm x 16 cm
Belichtungszeit	26,9 sec.
Voxelgröße	0,25
Röntgenröhrenspannung	120 kV
Stromstärke	3 bis 8 mA
Graustufung	14 bit
Schichtanzahl	512

Abkürzungen:

cm = Zentimeter, sec = Sekunden, kV = Kilovolt,  
mA = Milliampere, bit = binary digit



Abb. 8: DVT-Gerät „MESANTIS<sup>®</sup> line“

Die Aufnahmen der Datenbank MESANTIS<sup>®</sup>, Standort Wiesbaden, stammen aus dem Zeitraum von September 2009 bis Februar 2013. Der DICOM-Datensatz der zu untersuchenden Patienten wurde anonymisiert, mithilfe einer speziellen Auswertungssoftware vermessen, und die Ergebnisse wurden in Excel-Tabellen aufgelistet sowie anschließend statistisch evaluiert.

### 3.1.3 Systematische Auswertung

Die Analyse der Aufnahmen erfolgte an einem Rechner im Institut MESANTIS<sup>®</sup> Berlin mithilfe der systemeigenen 3D-Imaging-Software *Invivo 5.1.0* (Anatomage Inc., San Jose, Kalifornien) mit einer Bildschirmauflösung von 1 920 mal 1 200. Zur besseren Kontrastierung wurde in einem abgedunkelten Raum gearbeitet.

Die Grundlagen für die Messmethodik waren an veröffentlichte Studien von Fuhrmann (1996), Evangelista et al. (2010), Lee et al. (2012) und Jäger (2015) angelehnt. Die Re-

konstruktion von Datensätzen in axialer, sagittaler und koronarer Ebene war durch die verwendete Software *Invivo 5.1.0* gegeben (Abb. 9).

Die zu untersuchenden Zähne wurden im *Section-Modus* der Software in allen drei Raumebenen ausgerichtet. Orientierungshilfe gab hierbei das Pulpenkavum der Zähne, welches als zentrale Einheit des Zahnes gesehen wurde. Die Zahnachse wurde in der Sagittalebene und Transversalebene im 90°-Winkel zur Horizontalebene ausgerichtet und verlief hierbei durch das Pulpenkavum von der Wurzelspitze zur Inzisalkante im Frontzahnbereich bzw. von der Wurzelspitze zur Zentralfissur im Seitenzahngebiet. Zur Feinjustierung wurden die relevanten Schichten bei der Befundung in den drei Ebenen beliebig vergrößert, von einer Kontrast- bzw. Helligkeitsverschiebung wurde abgesehen, um den grazen Knochenstrukturen gerecht zu werden (Abb. 9).

Im Anschluss wurden die prozentualen Prävalenzen der Messmethodik mit statistischen Tests überprüft, um die signifikanten Faktoren zu ermitteln.

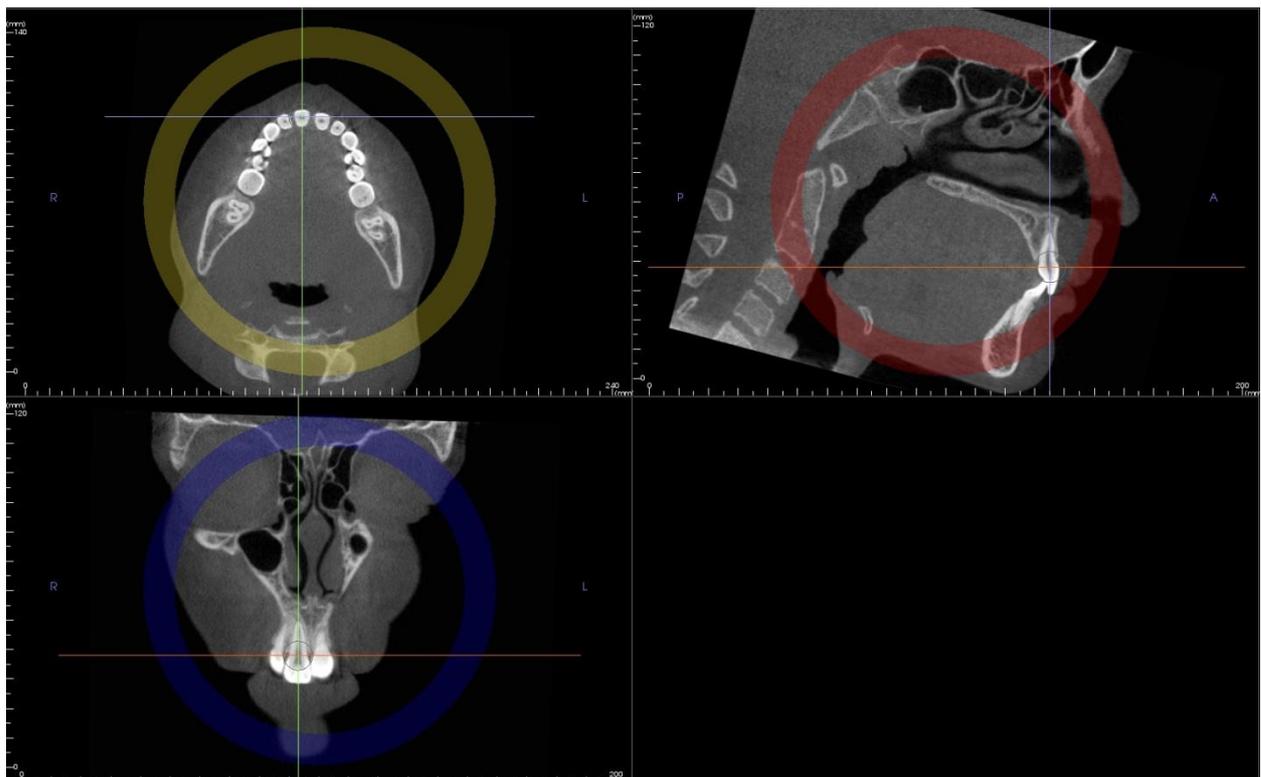


Abb. 9: Arbeitsoberfläche der Software *Invivo 5.1.0*. Axiale (1), sagittale (2) und koronare Ebene (3)

### 3.1.3.1 Vermessung von Zähnen, Knochenbreiten und Dehiszenzen

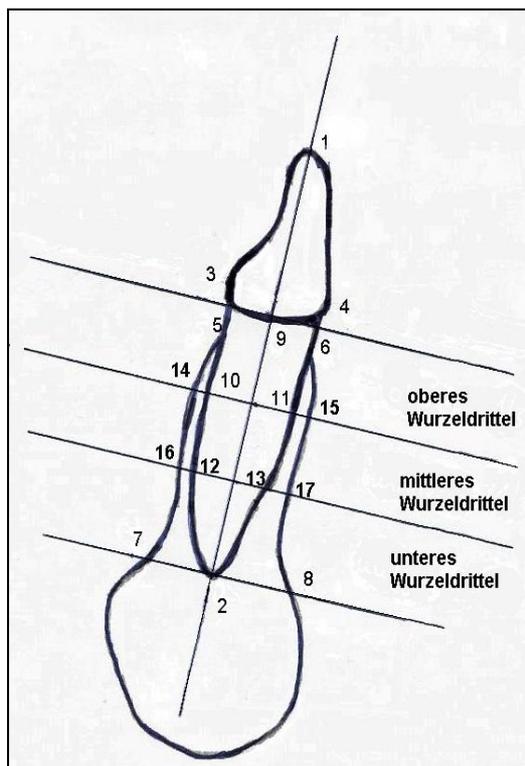
In der vorliegenden Arbeit wurden alle Zähne bezüglich ihrer Zahnlänge, Zahnbreite, Wurzellänge, Wurzelbreite, Knochenbreite sowie vorliegender Dehiszenzen befundet.

Hierfür wurde der zu untersuchende Zahn in allen drei Raumebenen ausgerichtet und vermessen (siehe Abb. 10).

Bezüglich des peridental Knochenangebotes wurde zum einen das vertikale Knochenangebot vestibulär und oral als lineare Strecke zwischen der Schmelz-Zement-Grenze bzw. dem größten Umfang des Zahnes bis zum zervikalen Knochenrand gemessen, zum anderen die transversale Knochenbreite als lineare Distanz zwischen Parodontalspalt und äußerstem lateralem Knochenrand senkrecht zur Zahnachse ermittelt.

Als Parameter für das Ausmaß der kieferorthopädischen Bewegung wurde die vestibulo-orale Angulation der Zähne im Bezug zur Frankfurter Horizontalen beurteilt.

Jede Parametererhebung erfolgte sowohl im prätherapeutischen als auch im posttherapeutischen Datensatz.



- (1) Inzisalkante
- (2) Apex
- (3) Schmelz-Zement-Grenze, oral
- (4) Schmelz-Zement-Grenze, vestibulär
- (5) Crestaler Knochen, oral
- (6) Crestaler Knochen, vestibulär
- (7) Außenkortikalis, oral
- (8) Außenkortikalis, vestibulär
- (9) 90° der Strecken 1–2 und 3–4
- (10) Ende oberes Wurzel Drittel, oral
- (11) Ende oberes Wurzel Drittel, vestibulär
- (12) Ende mittleres Wurzel Drittel, oral
- (13) Ende mittleres Wurzel Drittel, vestibulär
- (14) Alveolarfortsatz, oral (auf Höhe von 10)
- (15) Alveolarfortsatz, vestibulär (a. H. v. 11)
- (16) Alveolarfortsatz, oral (a. H. v. 12)
- (17) Alveolarfortsatz, vestibulär (a. H. v. 13)

Abb. 10: *Messmethodik, schematisch.* Die Darstellung zeigt die Vermessung eines unteren Inzisivus bezüglich Zahnlänge, Zahnbreite, Wurzellänge, Knochenbreite und Dehiszenz.

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen in DVT-Aufnahmen klinische Beispiele der Vermessung verschiedener Zähne bezüglich des peridental Knochenangebotes.

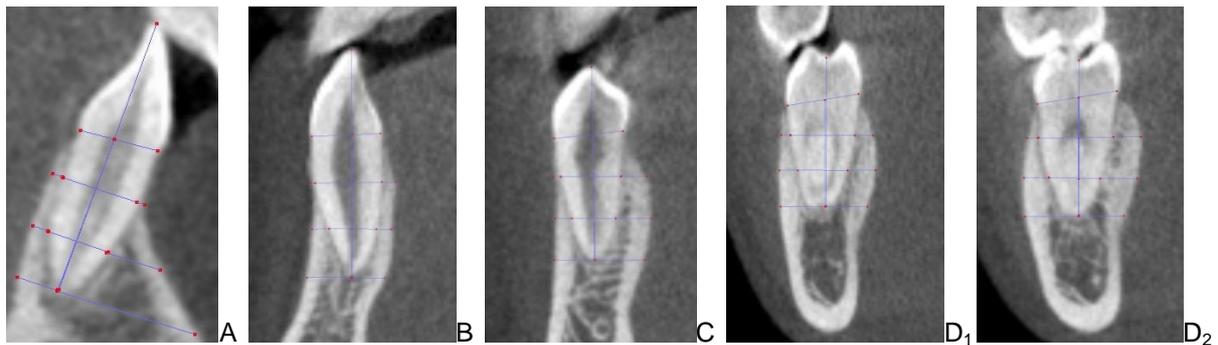


Abb.11: Beispiel der *Vermessung von Zahnlänge, Wurzellänge, Wurzelbreite sowie des periodontalen Knochenangebotes* eines Inzisivus (A), Caninus (B), Prämolaren (C) und Molaren (D), wobei bei mehreren Wurzeln eine Separation der Wurzeln vorgenommen wurde (D1 und D2).

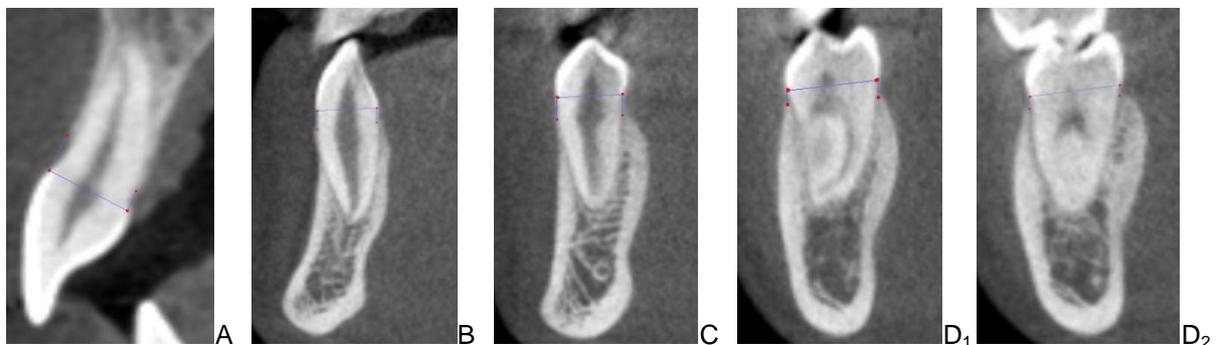


Abb. 12: Beispiel der *Vermessung von Dehiszenzen* eines Inzisivus (A), Caninus (B), Prämolaren (C) und Molaren (D), wobei bei mehreren Wurzeln eine Separation der Wurzeln vorgenommen wurde (D1 und D2).

### 3.1.3.2 Vermessung der Angulationswinkel

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Beurteilung des kieferorthopädischen Bewegungsausmaßes der Angulationswinkel der Zähne bestimmt. Bezugsebene stellte hierbei die Frankfurter Horizontale dar. Die Frankfurter Horizontale ist definiert als anatomisch gedachte Ebene, welche vom tiefsten Punkt des Unterrandes der Augenhöhle (*Orbita*) durch den höchsten Punkt des äußeren knöchernen Gehörganges (*Porus acusticus externus, Porion*) verläuft (Lehmann & Hellwig 2005). Die Winkelmessung erfolgte ebenfalls zu zwei Behandlungszeitpunkten anhand der prä- und posttherapeutischen Datensätze. Die Ausrichtung der Zähne erfolgte im Volume-Render-Menü der Anatomage-Software (Abb. 13), die Vermessung der Winkel im Section-Modus (Abb. 14).

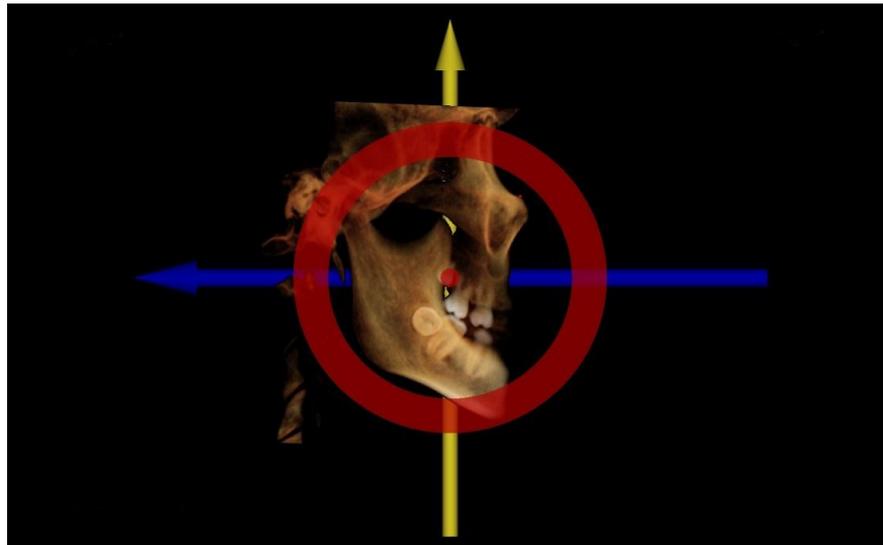


Abb. 13: Ausrichtung des Datensatzes anhand der Bezugsebene Frankfurter Horizontale im *Volume-Render-Modus* der Anatomage-Software

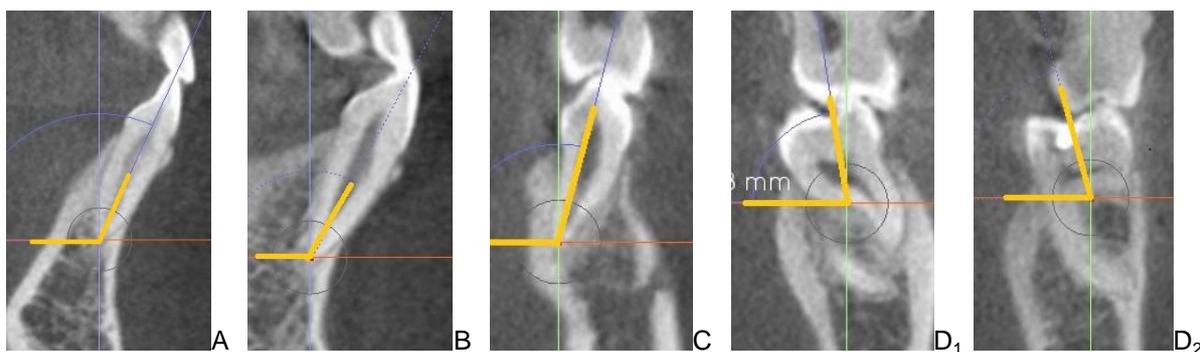


Abb. 14: Beispiel der *Vermessung des Angulationswinkels* bezogen auf die Frankfurter Horizontale eines Inzisivus (A), Caninus (B), Prämolaren (C) und Molaren (D), wobei bei mehreren Wurzeln eine Separation der Wurzeln vorgenommen wurde (D<sub>1</sub> und D<sub>2</sub>).

### 3.1.4 Statistische Analyse

Nach der beschriebenen Datenerhebung ergaben sich anhand der 18 Patienten bzw. 36 prä- und posttherapeutischen Datensätze unter Berücksichtigung der Separation bei Mehrwurzligkeit 1 080 untersuchte Zähne und insgesamt 20 520 Messwerte. Die erhobenen Daten wurden anonymisiert in Excel-Tabellen gelistet und bezüglich der im zweiten Kapitel beschriebenen Hypothesen mithilfe des Programms IBM SPSS Statistics 23 (SPSS Inc. an IBM Company, Chicago, IL) statistisch evaluiert.

## 3.2 Spezielle Methoden

### 3.2.1 Individuelle Reproduzierbarkeit von Knochenveränderungen

Alle verwendeten DVT-Aufnahmen wurden im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlungsplanung angefertigt und im Zeitraum von September 2009 bis Februar 2013 erstellt.

Um der statistischen Beantwortung der aufgestellten Hypothese gerecht zu werden, wurden von sechs der 18 randomisiert ausgewählten Patienten die Zähne 32, 34 und 36 als Stellvertreter der einzelnen Zahngruppen wie unter 3.1.3.1 beschrieben vermessen und das peridentale Knochenangebot befundet.

Der *Methodenfehler nach Dahlberg* und der *Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston* sollten die Reliabilität der angewandten Methodik offenlegen.

Sollte kein zufälliger Fehler bei der Messung aufgetreten sein, so gilt die angewandte Methodik als zuverlässig, wenn gilt:

Tab. 5: Kriterien für ein *reproduzierbares Messergebnis*

Methodenfehler nach Dahlberg	$> / = 0$
Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston	$< / = 1$

Das Testverfahren wurde dreimal wiederholt, und die Ergebnisse wurden anschließend dem genannten statistischen Test unterzogen.

### 3.2.2 Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderung durch Invisalign®

Es wurden aus der anonymisierten MESANTIS®-Datenbank randomisiert 18 Patienten ausgewählt und in sechs Gruppen verteilt.

Alle 36 Datensätze wurden mithilfe desselben DVT-Gerätes unter Berücksichtigung der unter 3.1 beschriebenen Parameter gescannt. Um dem Merkmal der Reproduzierbarkeit gerecht zu werden, galten strenge Ausschlusskriterien: So wurden ausschließlich vollbezahnte, parodontal gesunde Patienten befundet, welche alle mithilfe des Invisalign®-Schienensystems (Align-Technologie) therapiert wurden. Auch das Nichtvorhandensein von Implantat-Ersatz, stark zerstörten Zähnen oder pathologischen ossären Prozessen wurde bei der Auswahl geeigneter Patienten berücksichtigt.

Alle Zähne wurden wie unter 3.1.3.1 beschrieben nach dem gleichen Schema in allen drei Raumebenen ausgerichtet und Zahnlänge, Zahnbreite, Wurzellänge, Wurzelbreite

sowie das peridentale Knochenangebot bestimmt. Um sich der Beantwortung der Hypothese anzunähern, wurde bei allen Patienten die Summe der ermittelten Dehiszenzen bzw. festgestellten Knochenbreiten über alle Zähne erhoben, und es erfolgte ein Test auf Normverteilung durch die Testmethoden Kolmogorow-Smirnow und Shapiro-Wilk zu beiden Behandlungszeitpunkten. Im Anschluss wurden, unter Berücksichtigung des Messfehlers, die im Ausgangsbefund ermittelten Daten mit dem Endbefund verglichen und die Veränderungen zwischen Ausgangs- und Enduntersuchung einander gegenübergestellt, um signifikante Korrelationen zu ermitteln (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen). Statistische Ergebnisse mit dem Wert  $p \leq 0.05$  wurden als signifikant betrachtet.

### 3.2.3 Abhängigkeit vom Geschlecht

Aus den 36 randomisiert ausgewählten DVT-Aufnahmen gliederte sich das ausgewählte Patientengut in je neun weibliche und neun männliche kieferorthopädische Patienten im Alter von 14 bis 61 Jahren (Tab. 6).

Tab. 6: Unterteilung der 18 Patienten in die Gruppen *weiblich* (n = 9) und *männlich* (n = 9)

<b>Weiblich</b>	<b>Männlich</b>
Patient 1 (14 Jahre)	Patient 10 (18 Jahre)
Patient 2 (17 Jahre)	Patient 11 (15 Jahre)
Patient 3 (15 Jahre)	Patient 12 (17 Jahre)
Patient 4 (37 Jahre)	Patient 13 (36 Jahre)
Patient 5 (37 Jahre)	Patient 14 (24 Jahre)
Patient 6 (22 Jahre)	Patient 15 (24 Jahre)
Patient 7 (61 Jahre)	Patient 16 (46 Jahre)
Patient 8 (47 Jahre)	Patient 17 (53 Jahre)
Patient 9 (45 Jahre)	Patient 18 (53 Jahre)

Es ergaben sich im Zuge zweier Behandlungszeitpunkte pro geschlechtsspezifische Gruppe 432 zu betrachtende Zähne, deren peridentales Knochenangebot, wie unter 3.1.3.1 aufgezeigt, untersucht werden sollte. Die ermittelten Werte wurden in Excel-Dateien gelistet und anhand des U-Tests nach Mann-Whitney statistisch evaluiert, eine Korrelation im Geschlechtervergleich von  $p \leq 0,05$  wurde als signifikant bezeichnet.

### 3.2.4 Abhängigkeit vom Alter

Die kieferorthopädischen Patienten der 36 randomisiert ausgewählten DVT-Aufnahmen wiesen ein Alter von 14 bis 61 Jahren auf. Um zu prüfen, ob eine Altersabhängigkeit bei

der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes besteht, wurden die Patienten folgenden Gruppen zugeordnet: Invisalign Teen unter 21 Jahre, Invisalign-Patienten zwischen 21 und 40 Jahren und Invisalign-Patienten über 41 Jahre. Jede altersspezifische Gruppe beinhaltete pro Geschlecht drei Patienten, es ergaben sich somit pro Altersgruppe 432 Zähne, deren peridentales Knochenangebot wie unter 3.1.3.1 aufgezeigt zu zwei Befundzeitpunkten untersucht werden sollte. Hierbei lag das Durchschnittsalter der weiblichen Invisalign-Teen-Patienten bei 15,3 Jahren, bei den weiblichen Patienten zwischen 21 und 40 Jahren bei durchschnittlich 32 Jahren und bei den weiblichen Patienten über 41 Jahre bei 51,0 Jahren. Das durchschnittliche Patientenalter der männlichen Patienten belief sich in der Invisalign-Teen-Gruppe auf 16,6 Jahre, bei den 21- bis 40-jährigen Patienten auf 28,0 Jahre, und bezüglich der Gruppe über 41 Jahre konnte das Durchschnittsalter auf 50,6 Jahre festgesetzt werden (Tab. 7).

Tab. 7: Unterteilung der 18 Patienten anhand ihres Alters

<b>Invisalign Teen ( &lt; 21 Jahre )</b>	<b>Invisalign 21–40 Jahre</b>	<b>Invisalign &gt; 41 Jahre</b>
<b>Weiblich</b>	<b>Weiblich</b>	<b>Weiblich</b>
Patient 1 (14 Jahre)	Patient 4 (37 Jahre)	Patient 7 (61 Jahre)
Patient 2 (17 Jahre)	Patient 5 (37 Jahre)	Patient 8 (47 Jahre)
Patient 3 (15 Jahre)	Patient 6 (22 Jahre)	Patient 9 (45 Jahre)
<b>Ø 15,3 Jahre</b>	<b>Ø 32,0 Jahre</b>	<b>Ø 51,0 Jahre</b>

<b>Invisalign Teen ( &lt; 21 Jahre )</b>	<b>Invisalign 21–40 Jahre</b>	<b>Invisalign &gt; 41 Jahre</b>
<b>Männlich</b>	<b>Männlich</b>	<b>Männlich</b>
Patient 10 (18 Jahre)	Patient 13 (36 Jahre)	Patient 16 (46 Jahre)
Patient 11 (15 Jahre)	Patient 14 (24 Jahre)	Patient 17 (53 Jahre)
Patient 12 (17 Jahre)	Patient 15 (24 Jahre)	Patient 18 (53 Jahre)
<b>Ø 16,6 Jahre</b>	<b>Ø 28,0 Jahre</b>	<b>Ø 50, 6 Jahre</b>

Zusammenfassend kann das Durchschnittsalter der weiblichen Patienten mit 32,8 Jahren und das der männlichen Patienten mit 31,7 Jahren angegeben werden. Die Datensätze wurden analog zu den unter 3.1.3.1 beschriebenen Vorgaben vermessen, die Ergebnisse in Excel-Dateien gelistet und statistisch evaluiert. Durch die Berechnung des Spearman-Rho-Koeffizienten zwischen der Differenz der Dehiszenzen bzw. Knochenbreiten im Therapieverlauf und dem Patientenalter konnten die vorliegenden Daten im Anschluss auf signifikante Zusammenhänge untersucht werden.

Hierbei ergab sich je nach ermittelten Koeffizienten ein unterschiedliches Korrelationsniveau (vgl. Tab. 8):

Tab. 8: Interpretation der *Korrelationskoeffizienten*

$ R  \leq 0,2$	keine Korrelation
$0,2 <  R  \leq 0,5$	schwache bis mäßige Korrelation
$0,5 <  R  \leq 0,8$	deutliche / starke Korrelation
$0,8 <  R  \leq 1,0$	hohe / perfekte Korrelation

Das Vorzeichen des Koeffizienten gab hierbei Auskunft darüber, ob es sich um eine gleichsinnige oder entgegengesetzte Korrelation handelt.

Die Prüfung erfolgte für jede Zahnart und jeden Quadranten gesondert, eine Korrelation wurde bei zweiseitigem Niveau von  $r \leq 0,01$  als signifikant bezeichnet.

### 3.2.5 Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit

Bei der vorliegenden Arbeit wurden zur Beantwortung der aufgestellten Hypothesen randomisiert 18 prä- sowie posttherapeutische Aufnahmen aus dem EU-zertifizierten Langzeitarchiv der MESANTIS®-Datenbank ausgewählt. Es ergaben sich unter Berücksichtigung der Separation bei Mehrwurzigkeit 1 080 untersuchte Zähne, deren peridentales Knochenangebot wie unter 3.1.3.1 beschrieben vermessen und anschließend statistisch evaluiert wurde.

Die untersuchten Zähne der 18 Patienten konnten abhängig von ihrer Kieferzugehörigkeit in 576 Zähne, welche im Oberkiefer und 504 Zähne, welche im Unterkiefer lokalisiert waren, unterteilt werden (siehe Tab. 9).

Tab. 9: Unterteilung der vermessenen Zähne nach ihrer *Kieferzugehörigkeit*

<b>Kieferlokalisierung</b>	<b>Anzahl</b>
Oberkiefer	n = 576
Unterkiefer	n = 504

Die ermittelten Ergebnisse wurden nach ihrer Kieferzugehörigkeit sortiert und mithilfe der Testmethoden nach Kolmogorow-Smirnow und Shapiro-Wilk auf Abweichung von einer Normverteilung geprüft. Im Anschluss wurden bei Abweichungen durch nichtparametrische Methoden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen) bzw. bei Normverteilung durch parametrische Methoden (T-Test für verbundene Stichproben) positive Korrelati-

on ermittelt, statistische Ergebnisse mit dem Wert  $p \leq 0.05$  wurden als signifikant betrachtet.

### 3.2.6 Abhängigkeit von der Zahnart

Alle 36 verwendeten DVT-Aufnahmen wurden im Zuge der kieferorthopädischen Behandlungsplanung angefertigt. Bezüglich der zu untersuchenden Hypothese konnten nach Separation bei Mehrwurzigkeit die untersuchten 1 080 Zähne anhand ihrer Morphologie in folgende Untergruppen unterteilt werden (Tab. 10): mittlerer Inzisivus, seitlicher Inzisivus, Caninus, erster Prämolare, zweiter Prämolare und erster Molare.

Tab. 10: Unterteilung des Datenmaterials anhand der unterschiedlichen Zahnarten

Zahnart	Anzahl
Mittlerer Inzisivus	n = 144
Seitlicher Inzisivus	n = 144
Caninus	n = 144
Erster Prämolare	n = 144
Zweiter Prämolare	n = 144
Molare	n = 360

Bei der Überprüfung wurden Oberkiefer- und Unterkieferzähne wie unter 3.1.3.1 beschrieben vermessen. Ausschlaggebend war hierbei die anatomische Morphologie der Zähne; der Untersuchung der Kieferzugehörigkeit wurde unter 3.2.3 Rechnung getragen. Die statistische Evaluierung erfolgte zuerst durch Testverfahren auf Normverteilung durch Kolmogorow-Smirnow und Shapiro-Wilk zu beiden Behandlungszeitpunkten. Im Anschluss wurden die Veränderungen zwischen Ausgangs- und Enduntersuchung einander gegenübergestellt, um anhand des Wilcoxon-Tests für Paardifferenzen signifikante Korrelationen zu ermitteln. Ergebnisse mit dem Wert  $p \leq 0.05$  wurden als signifikant betrachtet.

### 3.2.7 Abhängigkeit von der Zahnangulation

Es wurden aus der anonymisierten MESANTIS<sup>®</sup>-Datenbank randomisiert 18 Patienten ausgewählt und in sechs Gruppen verteilt.

Alle 36 Datensätze wurden mithilfe desselben DVT-Gerätes unter Berücksichtigung der unter 3.1 beschriebenen Parameter gescannt. Um dem Merkmal der Reproduzierbarkeit gerecht zu werden, galten strenge Ausschlusskriterien: So wurden ausschließlich

vollbezahnte, parodontal gesunde Patienten befundet, welche alle mithilfe des Invisalign®-Schienensystems (Align-Technologie) therapiert wurden. Auch das Nichtvorhandensein von Implantat-Ersatz, stark zerstörten Zähnen oder pathologischen ossären Prozessen wurde bei der Auswahl geeigneter Patienten berücksichtigt.

Bezüglich der Abhängigkeit des peridentalen Knochenangebotes von der Angulation der Zähne wurde bei allen Zähnen der zu untersuchenden Patienten zu beiden Untersuchungszeitpunkten wie unter 3.1.3.2 beschrieben der Angulationswinkel bezogen auf die Frankfurter Horizontale bestimmt. Anschließend wurden diese Parameter mit den Änderungen des peridentalen Knochenangebotes während der Invisalign-Behandlung in Bezug gebracht und die Zähne 1 bis 6 aller Quadranten auf signifikante Korrelationen geprüft. Hierfür wurden die Ergebnisse in Excel-Dateien gelistet und anhand der Spearman-Rho-Testverfahren statistisch evaluiert. Die Signifikanzgrenze lag bei einem beidseitigen Signifikanzniveau von  $r \leq 0.05$ .

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Individuelle Reproduzierbarkeit von Knochenveränderungen

Um zu ermitteln, ob sich die angewandte Methodik eignet, um Knochendehiszenzen und Knochenbreiten mithilfe der DVT individuell und reproduzierbar vermessen zu können, wurden anhand von Stichproben jeweils drei Zähne (Zahn 32, 34 und 36) eines weiblichen und männlichen Patienten aus jeder Altersgruppe auf Vorhandensein ebendieser Knochenveränderungen untersucht, das Testverfahren dreimal wiederholt und die Ergebnisse anschließend statistischen Tests unterzogen. Die ermittelten Werte für den Methodenfehler nach Dahlberg und den Zuverlässigkeitskoeffizienten nach Houston sind in Tabelle 11 gelistet. Zur besseren Veranschaulichung erfolgt die Angabe der Zuverlässigkeit prozentual:

Tab. 11: Methodenfehler nach Dahlberg und Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston der Zähne 32, 34 und 36. Der Molar 36 wurde an beiden Wurzeln untersucht und ist somit mit jeweils zwei Werten beschrieben (mesiale Wurzel / distale Wurzel).

	Dehiszenz vestibulär				Dehiszenz oral			
	Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36		Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36	
$\delta$ [Dahlberg]	0,0041	0,002	0,0015	0,0009	0,001	0,0013	0,0018	0,002
R [Houston]	98,2 %	99,5 %	99,0 %	99,9 %	99,5 %	99,3 %	99,6 %	99,6 %

	Alveolarfortsatzbreite mittleres Wurzel Drittel, vestibulär				Alveolarfortsatzbreite mittleres Wurzel Drittel, oral			
	Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36		Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36	
$\delta$ [Dahlberg]	0,0019	0,0014	0,003	0,0018	0,0032	0,0072	0,0037	0,0067
R [Houston]	98,4 %	96,2 %	97,5 %	99,3 %	98,7 %	99,5 %	99,7 %	98,0 %

	Alveolarfortsatzbreite unteres Wurzel Drittel, vestibulär				Alveolarfortsatzbreite unteres Wurzel Drittel, oral			
	Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36		Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36	
$\delta$ [Dahlberg]	0,0027	0,0018	0,0039	0,0043	0,0051	0,0032	0,0062	0,0037
R [Houston]	99,7 %	99,4 %	99,5 %	99,7 %	99,4 %	99,9 %	99,5 %	99,6 %

	Alveolarfortsatzbreite apikal, vestibulär				Alveolarfortsatzbreite apikal, oral			
	Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36		Zahn 32	Zahn 34	Zahn 36	
$\delta$ [Dahlberg]	0,0092	0,0048	0,0232	0,0019	0,0041	0,007	0,114	0,0038
R [Houston]	99,9 %	99,5 %	98,5 %	99,9 %	98,9 %	99,5 %	98,0 %	99,9 %

Aufgrund des ermittelten Methodenfehlers im Bereich von 0,0014 und 0,114 sowie einer Zuverlässigkeit von 96,2 bis 99,9 Prozent kann eine hohe Reliabilität der Messung angenommen werden. Die Nullhypothese „*Knochendehiszenzen und Knochenbreiten können im DVT-Datensatz individuell und reproduzierbar vermessen werden*“ konnte somit bestätigt werden.

#### 4.2 Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderung durch Invisalign®

Bezüglich des Einflusses der Invisalign-Behandlung auf das peridentale Knochenangebot der untersuchten Zähne erfolgte zuerst ein Test auf Normverteilung durch die Testmethoden Kolmogorow-Smirnow und Shapiro-Wilk zu beiden Behandlungszeitpunkten. Es zeigten sich bei einigen Zähnen signifikante Abweichungen von einer Normalverteilung ( $p < 0,05$ ), die weitere statistische Analyse erfolgte demnach mit nichtparametrischen Methoden.

Im Anschluss wurden die Veränderungen zwischen Ausgangs- und Enduntersuchung einander gegenübergestellt, um signifikante Korrelationen zu ermitteln (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen). Um die Streuung möglichst gering zu halten, wurde bei der Signifikanzprüfung bei jedem Patienten die Summe der Dehiszenzen und Knochenbreiten über alle Zähne genommen und der Ausgangs- und Endbefund im Mittelwert miteinander verglichen.

#### Orale und vestibuläre Dehiszenzen

Die Knochendehiszenzen wurden an 864 Zähnen vermessen. Hierbei konnte vor Therapiestart oral im Mittel eine Distanz von 2,38 Millimetern und vestibulär eine Distanz von 2,44 Millimetern von der Schmelz-Zement-Grenze zur crestalen Knochenkante des Limbus alveolaris erhoben werden, im Endbefund ergaben sich Werte von 2,42 bzw. 2,52 Millimetern (vgl. Tab. 12 und 13).

Tab. 12: Allgemeines Ausmaß der *oralen Dehiszenzen* in mm

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangsuntersuchung	18	2,38	0,94	1,11	4,49
16 bis 46 Enduntersuchung	18	2,42	0,89	1,17	4,43

Tab. 13: Allgemeines Ausmaß der vestibulären Dehiszenzen in mm

Zahn	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangs-untersuchung	18	2,44	1,14	1,05	5,49
16 bis 46 End-untersuchung	18	2,52	1,24	1,11	5,8

Folgt man nun dem Begriff „Dehiszenz“ per definitionem, zeigten im Mittel 59,72 Prozent der Zähne oral und 76,39 Prozent vestibulär im Ausgangsbefund einen crestalen Knochenrückgang und somit eine erhöhte Distanz über die physiologischen zwei Millimeter zwischen Schmelz-Zement-Grenze und Limbus alveolaris. Im Endbefund konnte bei 64,91 Prozent der befundeten Zähne oral und bei 76,62 Prozent vestibulär eine Dehiszenz verzeichnet werden. Abhängig vom Ausmaß der erhobenen Werte konnten die untersuchten Zähne in vier Gruppen unterteilt werden (vgl. Tab. 14):

Tab. 14: Unterteilung der befundeten Zähne anhand der erhobenen Messwerte in verschiedene Dehiszenzklassen und prozentualer Vergleich zwischen Ausgangsuntersuchung (AU) und Enduntersuchung (EU)

	Dehiszenz vestibulär		Dehiszenz oral	
	AU	EU	AU	EU
0–3 mm	76,39 %	76,62 %	75,46 %	76,85 %
3–6 mm	21,30 %	20,14 %	24,31 %	23,15 %
6–9 mm	1,62 %	2,55 %	0,23 %	0 %
> 9 mm	0,69 %	0,69 %	0 %	0 %

Sowohl vestibulär als auch oral zeigten die meisten Zähne im Ausgangs- und im Endbefund eine Dehiszenz bis drei Millimeter. Während vestibulär 0,69 Prozent der Zähne auch ein Dehiszenzausmaß über neun Millimeter aufwiesen, blieb die Gruppe im oralen Bereich unbesetzt.

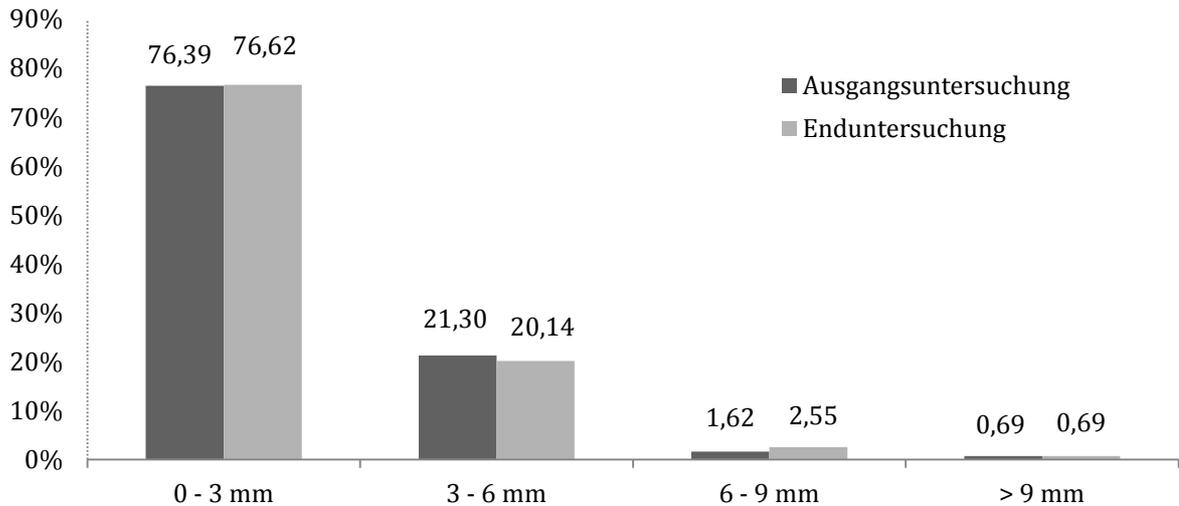


Abb. 15: Prozentuale Verteilung der erhobenen *vestibulären Dehiszenzen*. Es zeigte sich eine Verteilung der Zähne auf alle Gruppen mit der größten Prävalenz des Ausmaßes 0–3 mm und 3–6 mm.

Betrachtet man nun die *vestibulären Dehiszenzen* gesondert, wiesen 76,39 Prozent der untersuchten Zähne im Ausgangsbefund und 76,62 Prozent der Zähne im Endbefund eine Dehiscenzstärke von null bis drei Millimetern auf, 21,30 Prozent der Zähne zeigten vor Therapiestart und 20,14 Prozent der Zähne nach der Behandlung eine maximale Dehiscenz von drei bis sechs Millimetern. 1,62 Prozent der Zähne konnten prätherapeutisch und 2,55 Prozent der Zähne posttherapeutisch mit einer Dehiscenzstärke von sechs bis neun Millimetern befundet werden; diese Gruppe zeigte zusammen mit der letzten Gruppe mit jeweils 0,69 Prozent prä- und posttherapeutischen Dehiszenzen über neun Millimeter die wenigsten Vertreter (vgl. Abb. 15).

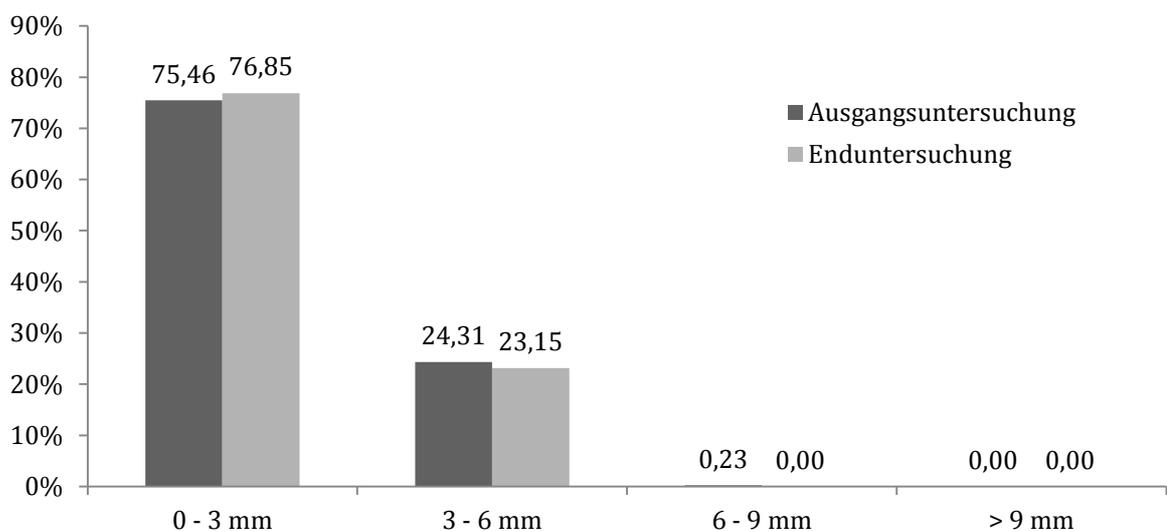


Abb. 16: Prozentuale Verteilung der erhobenen *oralen Dehiszenzen*. Die Gruppe > 9 mm bleibt unbesetzt, 0,23 % der Zähne zeigten im Ausgangsbefund eine Dehiscenzstärke von 6–9 mm.

Bezüglich der oralen Dehiszenzen fällt eine noch stärkere Gewichtung der ersten beiden Gruppen auf. So konnte bei 75,46 Prozent der Zähne im Ausgangsbefund und 76,85 Prozent der Zähne im Endbefund eine Dehiszenz zwischen null und drei Millimetern erhoben werden, 24,31 Prozent der Zähne zeigten vor der Behandlung und 23,15 Prozent nach der Behandlung eine Dehiszenz von drei bis sechs Millimetern. Nur 0,23 Prozent der befundeten Zähne verzeichneten eine Dehiszenz von sechs bis neun Millimetern vor der Behandlung, die Gruppen sechs bis neun Millimeter posttherapeutisch und Dehiszenzen über neun Millimeter blieben unbelegt (vgl. Abb. 16).

Für die Signifikanzprüfung wurde bei jedem Patienten die Summe der Dehiszenzen über alle Zähne genommen, und beide Behandlungszeitpunkte wurden miteinander verglichen (vgl. Abb. 17).

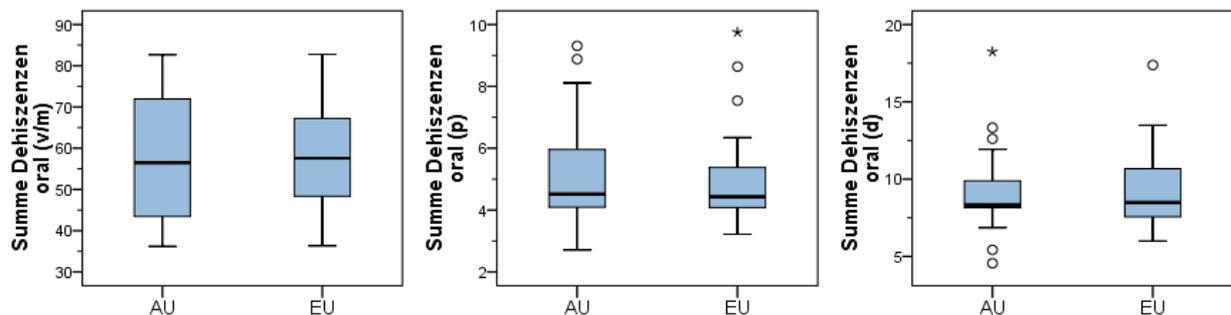


Abb. 17: Summe der oralen Dehiszenzen vor (AU) und nach (EU) der Behandlung im Bereich der vestibulären bzw. mesialen (v/m), palatinalen (p) und distalen (d) Wurzeln

Hinsichtlich der Summe der Dehiszenzen im Mittel bezogen auf alle Patienten zeigten sich oral signifikante Veränderungen zwischen den beiden Behandlungszeitpunkten. So war im Mittel vor der Behandlung pro Patient eine Dehiszenzsumme von 56,85 Millimetern feststellbar, während sich diese nach der Behandlung auf 58,22 Millimeter belief. An der distalen Wurzel konnten diese im Ausmaß von 9,35 und 9,36 Millimetern diagnostiziert werden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,001$  für vestibuläre bzw. mesiale Wurzel,  $p = 0,010$  für distale Wurzel). Im Bereich der palatinalen Wurzel der Oberkiefermolaren waren hingegen mit 5,19 und 5,14 Millimetern keine signifikanten Veränderungen nachweisbar ( $p = 0,993$ ).

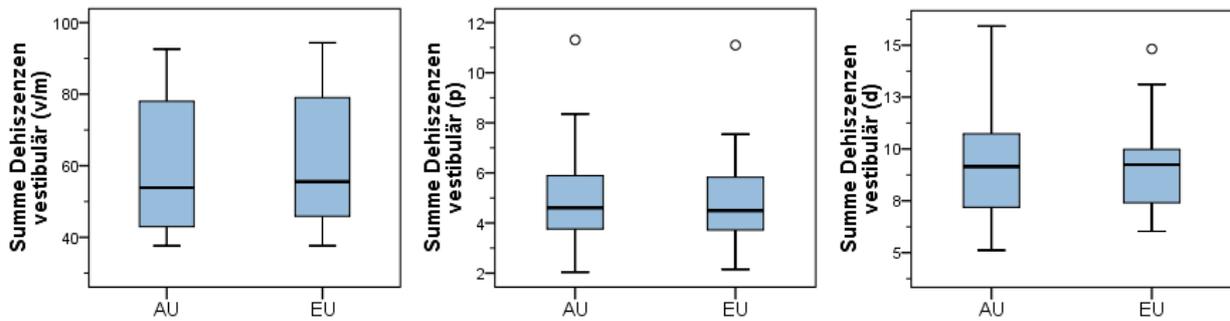


Abb. 18: Summe der vestibulären Dehiszenzen vor (AU) und nach (EU) der Behandlung im Bereich der vestibulären bzw. mesialen (v/m), palatinalen (p) und distalen (d) Wurzeln

Vestibulär war die Dehiszenzveränderung während der Behandlung im Allgemeinen nicht signifikant ( $p \geq 0,05$  für vestibuläre bzw. mesiale, distale und palatinale Wurzel, vgl. Abb. 18).

Die Hypothese „Das peridentale Knochenangebot wird durch Behandlungsmaßnahmen mit Invisalign® verändert“ kann daher bezüglich der oralen Dehiszenz an der palatinalen Wurzel und der vestibulären Dehiszenzen verworfen werden.

### Alveolarfortsatz, mittleres Wurzel Drittel

An 864 Zähnen bzw. 1 080 Wurzeln der 18 Patienten wurde das peridentale Knochenangebot im oralen und vestibulären mittleren Wurzel Drittel vermessen.

Vor der Invisalign-Behandlung lag die Knochenstärke oral zwischen 0,73 und 4,41 Millimetern und belief sich im Mittel auf 2,5 Millimeter. Nach der Behandlung zeigte sich der Limbus alveolaris im Messbereich zwischen 0,81 und 4,32 Millimetern und kann mit einem Mittelwert von 2,45 Millimetern angegeben werden (vgl. Tab. 15).

Tab. 15: Allgemeine Breite des Alveolarknochens im mittleren Wurzel Drittel, oral

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangsuntersuchung	18	2,5	0,99	0,73	4,41
16 bis 46 Enduntersuchung	18	2,45	0,94	0,81	4,32

Vestibulär der untersuchten Zähne konnte im Bereich des mittleren Wurzel Drittels mit einem Mittelwert von 1,4 Millimetern eine Knochenbreite von 0,42 bis 2,89 Millimetern gemessen werden. Nach der Behandlung zeigten die Zähne bei einem peridentalen

Knochenangebot von 0,38 bis 2,7 Millimetern und einem Mittelwert von 1,37 Millimetern annähernd gleichbleibende Werte (vgl. Tab. 16).

Tab. 16: Allgemeine Breite des *Alveolarknochens im mittleren Wurzelf Drittel, vestibulär*

Zahn	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangs- untersuchung	18	1,4	0,64	0,42	2,89
16 bis 46 End- untersuchung	18	1,37	0,59	0,38	2,7

Die allgemeinen Alveolarknochenbreiten im mittleren Wurzelf Drittel aller untersuchten Zähne zeigten bezüglich der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes während der Behandlung keine Signifikanzen (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p \geq 0,05$  oral,  $p \geq 0,05$  vestibulär), die Hypothese „*Das peridentale Knochenangebot wird durch Behandlungsmaßnahmen mit Invisalign® verändert*“ kann daher diesbezüglich nicht bestätigt werden.

### **Alveolarfortsatz, unteres Wurzelf Drittel**

Im unteren Wurzelf Drittel konnten vor der Behandlung oral Knochenbreiten von 1,18 bis 7,06 Millimetern ermittelt werden, der Mittelwert belief sich auf 3,99 Millimeter. Nach der Behandlung konnte eine Knochenbreite von 3,87 Millimetern festgestellt werden, die befundeten Werte beliefen sich dabei auf 1,2 bis 7,07 Millimeter (vgl. Tab. 17).

Tab. 17: allgemeine Breite des *Alveolarknochens im unteren Wurzelf Drittel, oral*

Zahn	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangs- untersuchung	18	3,99	1,63	1,18	7,06
16 bis 46 End- untersuchung	18	3,87	1,61	1,2	7,07

Vestibulär zeigte sich die Breite des Limbus alveolaris nach der Behandlung mit 1,89 Millimetern im Vergleich zum Ausgangsbefund unverändert, betrachtet man jedoch die Spannweite der befundeten Werte, so zeigt der Ausgangsbefund mit 0,31 bis 4,65 Mil-

limetern im Vergleich zum Endbefund von 0,31 bis 4,34 Millimetern einen leicht erhöhten Maximalwert und eine erhöhte Standardabweichung (vgl. Tab. 18).

Tab. 18: Allgemeine Breite des *Alveolarknochens im unteren Wurzelf Drittel, vestibulär*

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangsuntersuchung	18	1,89	1,25	0,31	4,65
16 bis 46 Enduntersuchung	18	1,89	1,17	0,31	4,34

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Zähne wiesen bezüglich der prä- und posttherapeutischen Knochenbreiten im unteren Wurzelf Drittel im Mittel keine Signifikanzen auf (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen  $p \geq 0,05$  oral,  $p \geq 0,05$  vestibulär). Die Hypothese „*Das peridentale Knochenangebot wird durch Behandlungsmaßnahmen mit Invisalign® verändert*“ kann daher bezüglich der Knochenbreiten des Limbus alveolaris im unteren Wurzelf Drittel ebenfalls widerlegt werden.

### **Alveolarfortsatz, apikal**

An der Wurzelspitze konnte im Allgemeinen die größte Spannweite der Knochenbreiten festgestellt werden.

Oral ließen sich hierbei Messwerte zwischen 1,98 und 13 Millimetern feststellen, der Mittelwert belief sich auf 6,26 Millimeter. Bei der Enduntersuchung zeigten sich eine mittlere Breite aller untersuchten Zähne von 5,93 Millimetern und ein Messbereich von 1,92 bis 12,75 Millimetern (vgl. Tab. 19).

Tab. 19: Allgemeine Breite des *Alveolarknochens apikal, oral*

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangsuntersuchung	18	6,26	3,16	1,98	13
16 bis 46 Enduntersuchung	18	5,93	2,99	1,92	12,75

Vestibulär konnte eine im Vergleich zum oralen Knochen verminderte Knochenbreite befundet werden. Im Ausgangsbefund zeigte sich ein Messbereich von 1,38 bis 7,39

Millimetern und ein Mittelwert von 3,81 Millimetern, der Endbefund ergab im Mittel eine apikale Knochenbreite des vestibulären Limbus alveolaris von 3,84 Millimetern mit einem Messbereich von 1,42 bis 7,43 Millimetern (vgl. Tab. 20).

Tab. 20: Allgemeine Breite des *Alveolarknochens apikal, vestibulär*

Zahn	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
16 bis 46 Ausgangs- untersuchung	18	3,81	1,77	1,38	7,39
16 bis 46 End- untersuchung	18	3,84	1,79	1,42	7,43

Auch bezüglich der ermittelten Alveolarknochenbreiten im Bereich der Wurzelspitze erfolgte hier eine Festsetzung aller Zähne zu beiden Behandlungszeitpunkten. Die allgemeine Veränderung des peridentalen Knochenangebotes zeigte ähnlich wie bei der Dehiszenzuntersuchung und Alveolarknochenbreite im mittleren und unteren Wurzel-drittel keine Signifikanz (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p \geq 0,05$  oral,  $p \geq 0,05$  ves-tibulär). Die Hypothese „*Das peridentale Knochenangebot wird durch Behandlungs-maßnahmen mit Invisalign® verändert*“ konnte somit bezüglich der apikalen Knochen-breite nicht bestätigt werden.

### 4.3 Abhängigkeit vom Geschlecht

Um zu ermitteln, ob eine Geschlechterabhängigkeit bei der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Therapiezeitraum besteht, wurden alle untersuchten Patienten anhand ihres Geschlechts in zwei Gruppen aufgeteilt. Im Anschluss wurde das Knochenangebot vor und nach der Invisalign-Behandlung in der DVT vermessen, in Excel-Dateien gelistet und statistisch evaluiert. Die statistischen Testmethoden erfolgten anhand des U-Tests nach Mann-Whitney, eine Korrelation im Geschlechtervergleich von  $p \leq 0,05$  wurde als signifikant bezeichnet.

### Orale und vestibuläre Dehiszenzen

Oral konnte bei den weiblichen Patienten an 22 von 30 Messstellen im Ausgangsbefund eine Dehiszenz von über zwei Millimetern ermittelt werden, im Endbefund verminderte sich dieses Ergebnis auf 21 Messstellen. Bei der Gruppe der männlichen Patienten war

sowohl im Ausgangs- als auch im Endbefund an allen Messstellen eine Distanz von über zwei Millimetern von der Schmelz-Zement-Grenze zur crestalen Knochenkante feststellbar (vgl. Abb. 19).

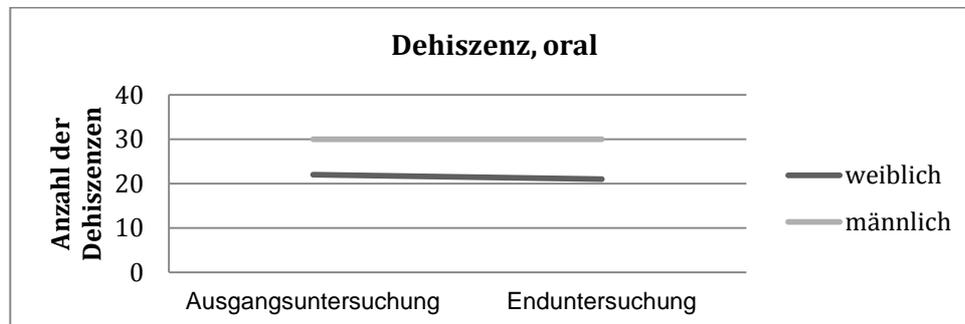


Abb. 19: Geschlechterspezifischer Unterschied der oralen Dehiszenzen zu beiden Behandlungszeitpunkten

Dabei wies die Gruppe der weiblichen Patienten im Vergleich zur Gruppe der männlichen Patienten zu beiden Untersuchungszeitpunkten weniger Dehiszenzen von über drei Millimetern auf. Beide Gruppen zeigten sowohl im Oberkiefer als auch im Unterkiefer einen stärkeren Befund im Seitenzahnbereich. Signifikante Geschlechterunterschiede hinsichtlich der Dehiszenzveränderung im Therapiezeitraum zeigte hierbei ausschließlich der Zahn 41 (vgl. Tab. 21):

Tab. 21: Veränderung der oralen Dehiszenzen im Geschlechtervergleich

Zahn	Geschlecht	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
41	w	9	0,35	0,43	-0,19	1,02
41	m	9	-0,21	0,24	-0,50	0,14

So konnte bei den weiblichen Patienten bei der Enduntersuchung (EU) an Zahn 41 im Schnitt eine Dehiszenzverstärkung von rund 0,35 Millimetern festgestellt werden, während sich der Befund in der männlichen Gruppe im Vergleich zur Ausgangsuntersuchung (AU) im Mittel um 0,21 Millimeter verminderte (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,006$ ).

Vestibulär konnte bei der Anzahl der ermittelten Dehiszenzen über zwei Millimeter im Ausgangs- und Endbefund ein im Therapieverlauf stabil bleibendes Verhältnis ermittelt werden. Während in der weiblichen Gruppe sowohl vor als auch nach der Behandlung an 20 Messstellen Dehiszenzen diagnostiziert werden konnten, waren es in der Gruppe

der männlichen Patienten, ähnlich wie im oralen Befund, gleichbleibend 30 (vgl. Abb. 20).

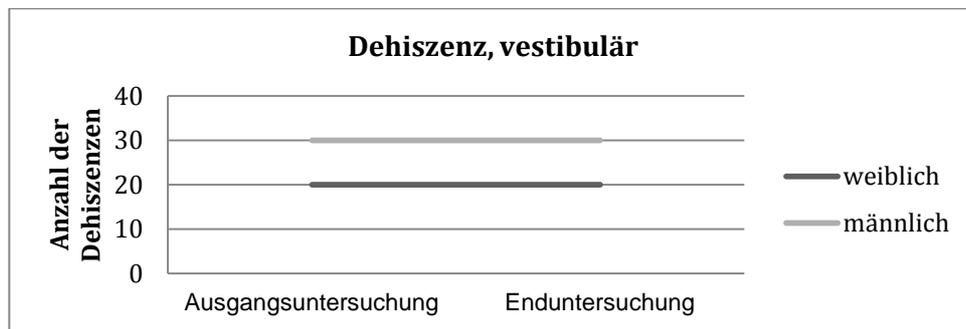


Abb. 20: *Geschlechterspezifischer* Unterschied der vestibulären Dehiszenzen zu beiden Behandlungszeitpunkten

Bezüglich der Ausprägung des Dehiszenzausmaßes zeigte die männliche Gruppe mit im Mittel sieben gemessenen Dehiszenzen von über drei Millimetern im Ausgangsbefund und acht im Endbefund im Vergleich zu den weiblichen ein bzw. zwei Messstellen eine stärkere Tendenz zur Dehiszenzbildung. Die betroffenen Zähne waren hierbei bei beiden Geschlechtern die ersten Prämolaren und der erste Molar im Oberkiefer, bei den männlichen Patienten zudem noch Zahn 21 und die Unterkieferfront.

Die Veränderung des peridental Knochengebotes im Therapiezeitraum betreffend konnten bezüglich der distalen Wurzel des Zahnes 16, bezüglich des Zahnes 42 und der distalen Wurzel des Zahnes 46 signifikante Korrelationen im Geschlechtervergleich ermittelt werden (vgl. Tab. 22):

Tab. 22: Veränderung der vestibulären Dehiszenzen im *Geschlechtervergleich*

Zahn	Geschlecht	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 (d)	w	9	0,01	0,29	-0,41	0,45
16 (d)	m	9	-0,37	0,27	-0,84	-0,09
42	w	9	0,21	0,35	-0,13	1,02
42	m	9	-0,11	0,31	-0,51	0,37
46(d)	w	9	-0,32	0,37	-0,89	0,38
46 (d)	m	9	0,31	0,73	-0,75	1,73

So zeigte die distale Wurzel des Zahnes 16 bei den männlichen Patienten eine Stabilisierung des Dehiszenzausmaßes im Therapieverlauf (EU–AU) von rund 0,37 Millimetern, während der Befund in der weiblichen Gruppe annähernd gleich blieb (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,011$ ). Auch an Zahn 42 erfolgte bei den männlichen Patienten mit 0,11 Millimetern eine Abnahme der Defekthöhe und bei den weiblichen Patienten eine Zunahme um rund 0,21 Millimeter (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,040$ ). An der distalen Wurzel des Zahnes 46 hingegen konnte in der weiblichen Gruppe mit im Mittel 0,32 Millimetern eine Zunahme des peridentalen Knochenangebotes ermittelt werden, in der männlichen Gruppe wurde im selben Ausmaß ein gegenteiliger Effekt diagnostiziert (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,031$ ).

### Alveolarfortsatz, mittleres Wurzel Drittel

Im mittleren Wurzel Drittel kam es bei beiden Gruppen zu einem therapiebedingten Wandel der oralen Knochenbreiten: 80 Prozent der Zähne der weiblichen Patienten wiesen hierbei eine Veränderung von unter 0,3 Millimetern auf, in der männlichen Gruppe konnte eine Veränderung desselben Ausmaßes an 73 Prozent der Zähne beobachtet werden. Bei 17 Prozent der Zähne der weiblichen Gruppe erfolgte eine Zu- oder Abnahme des peridentalen Knochenangebotes von über 0,3 Millimetern, ebenso bei 20 Prozent der untersuchten Zähne der männlichen Patienten (vgl. Abb. 21).

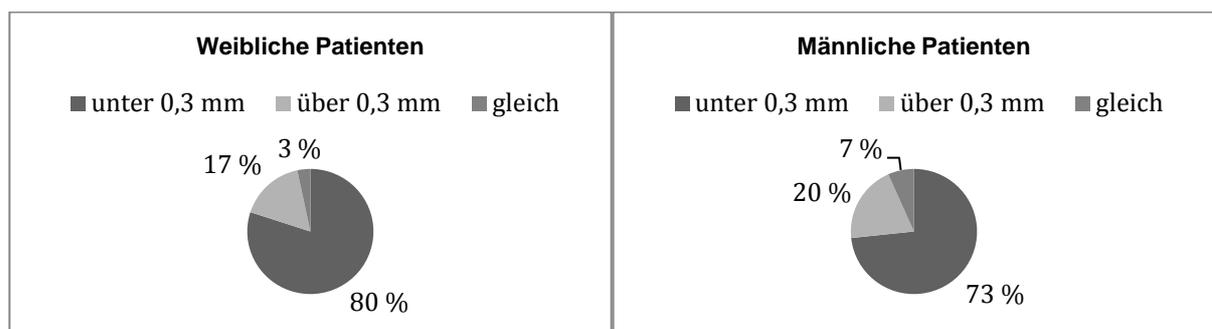


Abb. 21: *Geschlechterspezifischer* Unterschied der Veränderung der oralen Knochenbreiten im mittleren Wurzel Drittel

Hierbei kam es in der weiblichen Gruppe an 16 Messstellen zu einer Zunahme der Knochenbreiten, bei der männlichen Gruppe zeigten hingegen nur elf Messstellen eine Stabilisierung des peridentalen Knochenangebotes. In beiden Gruppen erfolgte dies überwiegend im Unterkiefer, der zahnspezifische Geschlechtervergleich ergab jedoch ausschließlich bei Zähnen im Oberkiefer eine signifikante Korrelation (vgl. Tab. 23):

Tab. 23: Veränderung der oralen Knochenbreiten im *Geschlechtervergleich*, mittleres Wurzel Drittel

Zahn	Geschlecht	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
21	w	9	-0,33	0,78	-1,30	1,27
21	m	9	-1,15	0,61	-2,19	-0,16
26 (d)	w	9	-1,08	0,93	-3,17	0,21
26 (d)	m	9	0,04	0,66	-1,31	0,66

So erfolgte an Zahn 21 in beiden Gruppen eine Abnahme der oralen Knochenbreiten, bei den männlichen Patienten geschah dies mit 1,15 Millimetern signifikant verstärkt im Vergleich zu den 0,33 Millimetern in der weiblichen Gruppe (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,024$ ). An der distalen Wurzel des Zahnes 26 konnte ebenfalls ein geschlechterspezifischer Unterschied ermittelt werden: Während hier in der weiblichen Gruppe eine Reduktion von rund 1,08 Millimetern erfolgte, blieb das peridentale Knochenangebot bei den männlichen Patienten mit nur 0,04 Millimetern Zunahme annähernd unverändert (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,014$ ).

Vestibulär konnte – ebenfalls wie im oralen Untersuchungsbereich – in beiden Gruppen an 87 Prozent der weiblichen und 80 Prozent der männlichen Zähne eine Veränderung von unter 0,3 Millimetern ermittelt werden. In beiden Gruppen lag der Anteil der Zähne, bei denen ein Wandel von über 0,3 Millimetern festgestellt werden konnte, bei 13 Prozent, an sieben Prozent der Zähne in der männlichen Gruppe erfolgte keine Zu- oder Abnahme des peridentalen Knochenangebotes (vgl. Abb. 22).

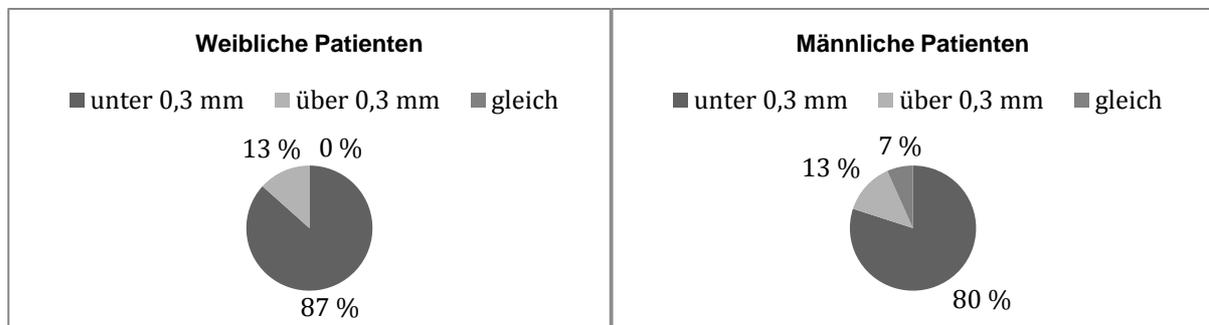


Abb. 22: *Geschlechterspezifischer* Unterschied der Veränderung der vestibulären Knochenbreiten im mittleren Wurzel Drittel

Hierbei war bei den weiblichen Patienten an 14 der 30 untersuchten Wurzeln eine Verbesserung der ossären Situation feststellbar, in der männlichen Gruppe konnte an neun von 30 Messstellen eine Zunahme des peridental Knochenangebotes ermittelt werden. Hierbei fiel auf, dass diese Veränderung ausschließlich im Oberkiefer stattfand, während in der weiblichen Gruppe sowohl Oberkiefer- als auch Unterkieferzähne von der Zunahme der knöchernen Situation betroffen waren. Im zahnspezifischen Geschlechtervergleich nach Mann-Whitney konnten in diesem Untersuchungsbereich jedoch keine signifikanten Korrelationen ermittelt werden.

### Alveolarfortsatz, unteres Wurzel Drittel

Im unteren oralen Wurzel Drittel zeigten nach der Invisalign-Therapie drei Prozent der weiblichen Zähne keine Veränderung, während bei 77 Prozent eine Zu- bzw. Abnahme des peridental Knochenangebotes von weniger als 0,3 Millimetern und bei den restlichen Zähnen von über 0,3 Millimetern festzustellen war. Die männliche Gruppe zeigte bei 60 Prozent der Zähne einen therapiebedingten Wandel von unter 0,3 Millimetern und bei 40 Prozent der Zähne von über 0,3 Millimetern (vgl. Abb. 23).

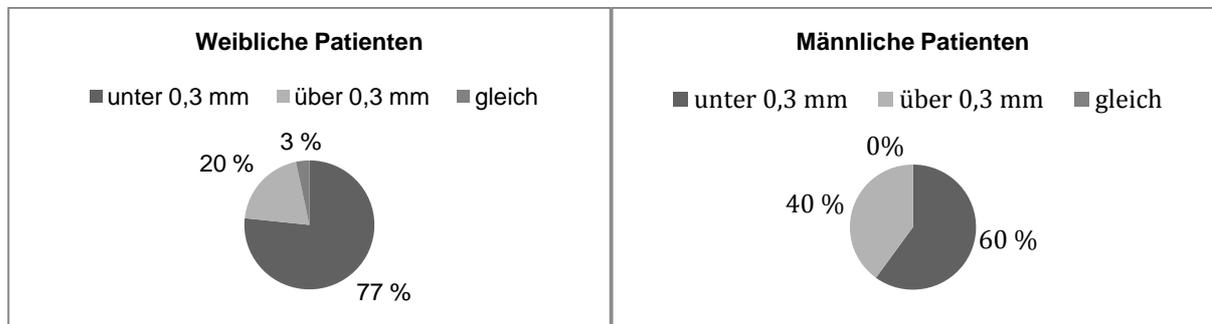


Abb. 23: Geschlechterspezifischer Unterschied der Veränderung der oralen Knochenbreiten im unteren Wurzel Drittel

Diese Veränderung beinhaltete in der weiblichen Gruppe bei elf, in der männlichen Gruppe bei zwölf von 30 Messstellen eine Zunahme der oralen Knochenbreiten und war in beiden Gruppen sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer feststellbar.

Im vestibulären Untersuchungsbereich des mittleren Wurzel Drittels zeigten die beiden Gruppen in Bezug auf das Ausmaß der Veränderung unterschiedliche Ergebnisse: Während die weibliche Gruppe an 97 Prozent der Zähne eine Veränderung von bis zu 0,3 Millimetern zeigte, wiesen nur 63 Prozent der männlichen Zähne dieses Ausmaß auf (vgl. Abb. 24).

Die Anzahl der Zähne, an denen sich das peridentale Knochenangebot durch dessen Zunahme stabilisierte, zeigte sich mit 16 Zähnen in der weiblichen Gruppe und zwölf Zähnen in der männlichen Gruppe ebenfalls weniger harmonisch als im oralen Bereich des unteren Wurzeldrittels.

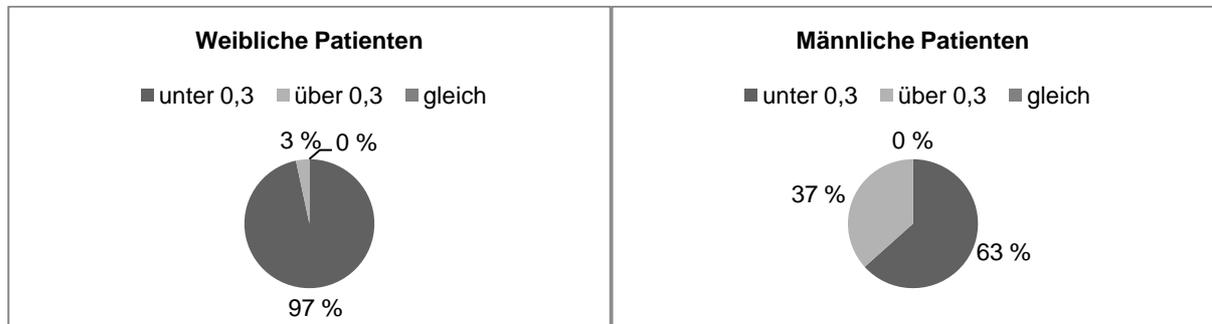


Abb. 24: Geschlechterspezifischer Unterschied der Veränderung der vestibulären Knochenbreiten im unteren Wurzeldrittel

Sowohl oral als auch vestibulär konnten im zahnbezogenen, geschlechterspezifischen Testverfahren nach Mann-Whitney keine signifikanten Korrelationen ermittelt werden.

### Alveolarfortsatz, apikal

An der Wurzelspitze zeigte sich im oralen Untersuchungsbereich in der männlichen Gruppe mit 50 Prozent Anteil eine Veränderung von unter 0,3 Millimetern und mit 50 Prozent eine Veränderung von über 0,3 Millimetern. Die weiblichen Patienten wiesen hier hingegen mit 57 Prozent der Zähne mit einer Zu- bzw. Abnahme des peridentalen Knochenangebotes von über 0,3 Millimetern einen vergleichsweise stärkeren Befund auf (vgl. Abb. 25).

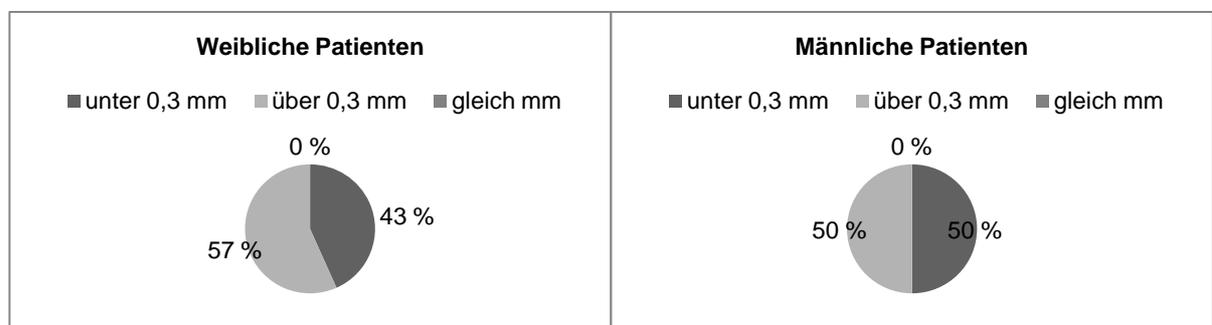


Abb. 25: Geschlechterspezifischer Unterschied der Veränderung der oralen Knochenbreiten apikal

Hierbei erfolgte in der Gruppe der weiblichen Patienten bei einem Drittel der Zähne eine Zunahme der Knochenbreiten, welche sich gleichmäßig auf Front- und Seitenzahnbe-

reich verteilten. In der männlichen Gruppe war dies an durchschnittlich sieben von 30 Zähnen und ausschließlich im Seitenzahnggebiet feststellbar. Im zahnbezogenen Geschlechtervergleich ergab sich für die Zähne 11 und 45 eine signifikante Korrelation (vgl. Tab. 24):

Tab. 24: Veränderung der oralen Knochenbreiten im *Geschlechtervergleich*, apikal

Zahn	Geschlecht	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
11	w	9	-0,24	1,54	-3,23	2,02
11	m	9	-1,67	1,21	-3,43	-0,08
45	w	9	-0,97	1,17	-3,35	0,44
45	m	9	0,28	0,84	-0,59	2,22

Hierbei erfolgte an Zahn 11 in beiden Gruppen eine Abnahme der oralen Knochenbreiten, das Ausmaß war jedoch bei den männlichen Patienten mit 1,67 Millimetern im Vergleich zu den gemessenen 0,24 Millimetern bei den weiblichen Patienten signifikant höher (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,031$ ). Selbiger Effekt zeigte sich an Zahn 45, auch hier konnte durchschnittlich eine Abnahme von 0,97 Millimetern in der weiblichen Gruppe diagnostiziert werden, während sich das peridentale Knochenangebot bei den männlichen Patienten im Therapieverlauf eher stabilisierte (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,019$ ).

Vestibulär zeigte sich an der Wurzelspitze in beiden Gruppen mit 60 Prozent Veränderung von unter 0,3 Millimetern und 40 Prozent Veränderung von über 0,3 Millimetern dasselbe Verhältnis der untersuchten Zähne (vgl. Abb. 25).

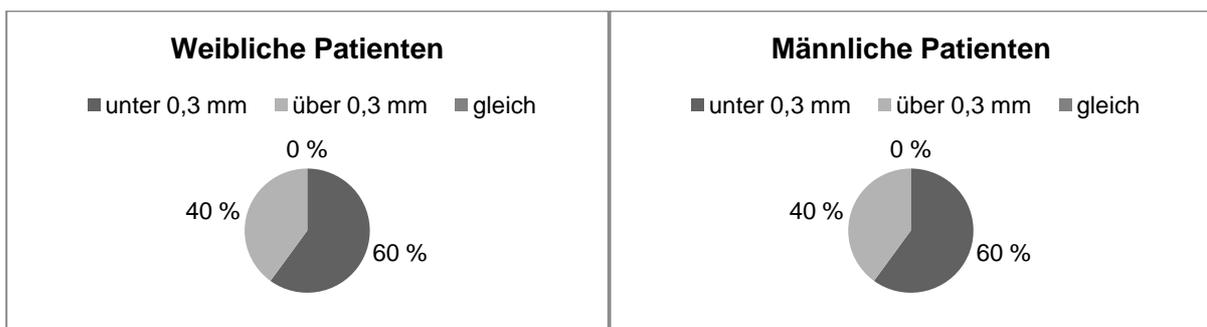


Abb. 25: *Geschlechterspezifischer* Unterschied der Veränderung der vestibulären Knochenbreiten, apikal

Auch die Anzahl der Messstellen, an denen sich das peridentale Knochenangebot durch eine Zunahme stabilisierte, stellte sich im Geschlechtervergleich mit durchschnittlich 17 weiblichen und 16 männlichen Wurzeln annähernd gleich dar. Die Prüfung auf signifikante Korrelationen ergab für Zahn 32 eine signifikante Geschlechterabhängigkeit (vgl. Tab. 25):

Tab. 25: Veränderung der vestibulären Knochenbreiten im *Geschlechtervergleich*, apikal

Zahn	Geschlecht	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
32	w	9	-0,52	1,23	-3,72	0,32
32	m	9	0,53	0,79	-0,75	1,53

So konnte bei den männlichen Patienten im Durchschnitt eine posttherapeutische Zunahme des peridentalen Knochenangebotes von 0,53 Millimetern festgestellt werden, während bei den weiblichen Patienten in ähnlichem Ausmaß eine Abnahme desselben zu verzeichnen war (Mann-Whitney-U-Test,  $p = 0,014$ ).

#### 4.4 Abhängigkeit vom Alter

Um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes und dem Patientenalter besteht, wurden die untersuchten Zähne in drei Gruppen unterteilt (vgl. 3.2.4). Durch die Berechnung des Spearman-Rho-Koeffizienten zwischen der Differenz der Dehiszenzen bzw. Knochenbreiten im Therapieverlauf und dem Patientenalter konnten die vorliegenden Daten im Anschluss auf signifikante Zusammenhänge untersucht werden. Diese Prüfung erfolgte für jede Zahnart und jeden Quadranten gesondert, eine Korrelation wurde bei zweiseitigem Niveau von  $r \leq 0,01$  als signifikant bezeichnet.

#### Orale und vestibuläre Dehiszenzen

Vergleicht man die Altersgruppen untereinander, zeigt sich ein altersspezifischer Ausgangswert. So konnte im radiologischen Ausgangsbefund bei den Patienten unter 21 Jahren im Mittel eine orale Dehiszenzstärke von 1,87 Millimetern ermittelt werden, während bei der Patientengruppe der 21- bis 40-Jährigen 2,3 Millimeter und bei den Patienten ab 41 Jahren 2,97 Millimeter festzustellen waren. Im Therapieverlauf verstärkten

sich die oralen Dehiszenzen in den ersten beiden Gruppen um 0,08 bzw. 0,23 Millimeter, bei den Zähnen der Patienten über 41 Jahre verringerte sich das Dehiszenzausmaß im Mittel um 0,07 Millimeter (vgl. Abb. 27 und Tab. 26).

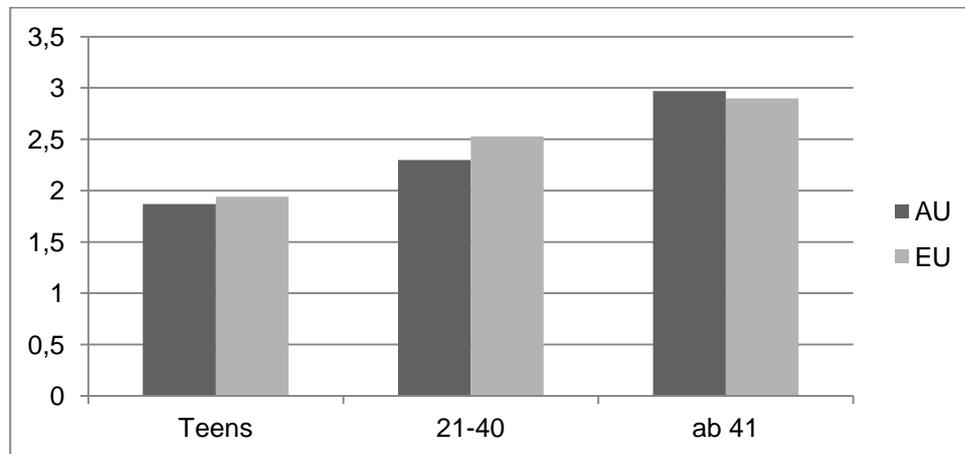


Abb. 27: Mittelwerte der oralen Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Gruppenvergleich vor (AU) und nach der Behandlung (EU); Angabe in mm

Hierbei fiel auf, dass der stärkste Ausgangsbefund bei den Teen-Patienten mit durchschnittlich 2,05 Millimetern allgemein an den ersten Molaren festgestellt werden konnte, bei der mittleren Patientengruppe zeigte sich eine homogene Verteilung der ermittelten Ausgangsbefunde. Jedoch konnte hier im Endbefund mit durchschnittlich 1,12 Millimetern eine verhältnismäßig starke Befundverstärkung im Bereich der Unterkieferfront diagnostiziert werden. Bei der ältesten Patientengruppe verteilten sich die prätherapeutischen Dehiszenzstärken von über drei Millimetern mit Ausnahme der Zähne 23, 31 und 41 auf die Seitenzähne der Patienten.

Bei der anschließenden Korrelationsprüfung ergaben sich keine signifikanten Wechselbeziehungen. Für die ersten Molaren im Ober- und Unterkiefer ergab sich eine mäßige Korrelation des Patientenalters mit der oralen Dehiszenzverstärkung. Für die Unterkieferfrontzähne 31 und 42 sowie die Prämolaren 34 und 45 konnte eine schwache Korrelation ermittelt werden, der Rest der untersuchten Zähne zeigte keine Korrelation.

Vestibulär ergab sich mit 1,84 Millimetern Ausgangsbefund der Zähne in der Teen-Gruppe und dem Dehiszenzausmaß von 2,35 Millimetern in der Gruppe der 21- bis 40-Jährigen sowie von 3,12 Millimetern in der Gruppe ab 41 Jahren ein im Vergleich zum oralen Untersuchungsbefund ähnliches Bild (vgl. Tab. 26).

Tab. 26: Mittelwerte der oralen und vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Gruppenvergleich vor (AU) und nach der Behandlung (EU); Angabe in mm

	oral			vestibulär		
	Teens	21–40	ab 41	Teens	21–40	ab 41
AU	1,87	2,3	2,97	1,84	2,35	3,12
EU	1,94	2,53	2,9	1,95	2,51	3,11
Differenz	0,08	0,23	-0,07	0,12	0,16	-0,02

Durch eine Abnahme von 0,12 bzw. 0,16 Millimetern in den ersten beiden Gruppen und eine Zunahme des peridentalen Knochenangebotes von rund 0,02 Millimetern bei den ältesten Patienten ergab sich im vestibulären Untersuchungsbereich ein ähnlicher Therapieverlauf wie auf der oralen Zahnseite (vgl. Abb. 28 und Tab. 26).

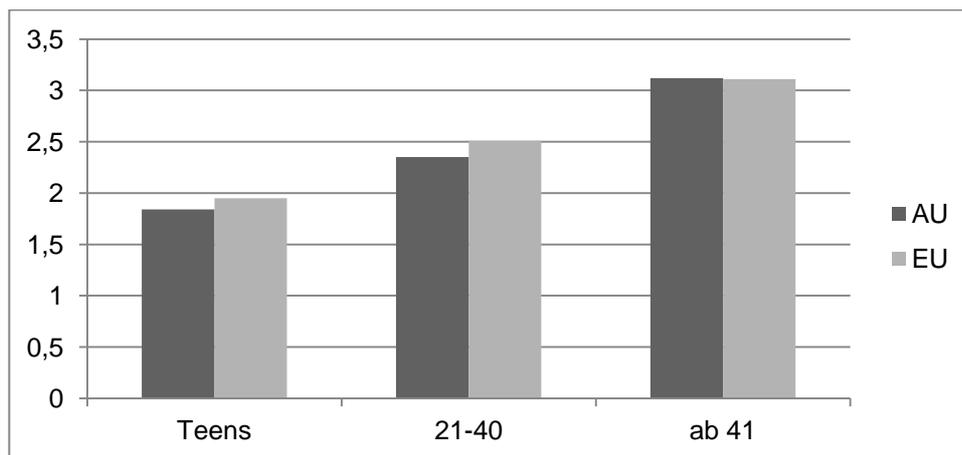


Abb. 28: Mittelwerte der vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Gruppenvergleich vor (AU) und nach der Behandlung (EU); Angabe in mm

In der jüngsten Gruppe waren die stärksten Dehiszenzen im Oberkiefer beidseits an den 1ern, 3ern und 6ern vorzufinden, im Unterkiefer zeigten sich unilateral an den Zähnen 33, 34 und 36 stärkere Befunde. In der mittleren Gruppe ergab sich – ähnlich wie im oralen Untersuchungsbereich – eine verhältnismäßig starke Dehiszenzveränderung im Unterkiefer, hier jedoch generell und nicht ausschließlich im Frontzahnbereich. Bei den Patienten ab 41 Jahren resultierte vestibulär an den ersten Prämolaren im Ober- und Unterkiefer mit im Mittel 3,68 Millimetern ein verhältnismäßig starker Ausgangsbefund.

Ähnlich wie bereits oral konnte für alle ersten Molaren eine schwache bis mäßige Korrelation ermittelt werden. Des Weiteren ergaben die Frontzähne 12, 22 und 41, die Eckzähne 23 und 43 sowie die Prämolaren 15, 24, 35 und 45 bei der Korrelationsprüfung einen positiven Befund. Während dieser ähnlich wie bei den Molaren im schwachen bis mäßigen Bereich lag, konnte für die Zähne 24, 41 und 45 eine starke, signifikante Wechselbeziehung ermittelt werden (Korrelationstest nach Spearman-Rho  $0,5 < |R| \leq 0,8$ ).

Hierbei bestand bei allen drei Zähnen eine negative Korrelation der Untersuchungsparameter, und das Ausmaß der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes zeigte sich bei den älteren Patienten geringer als bei den jüngeren (vgl. Abb. 29):

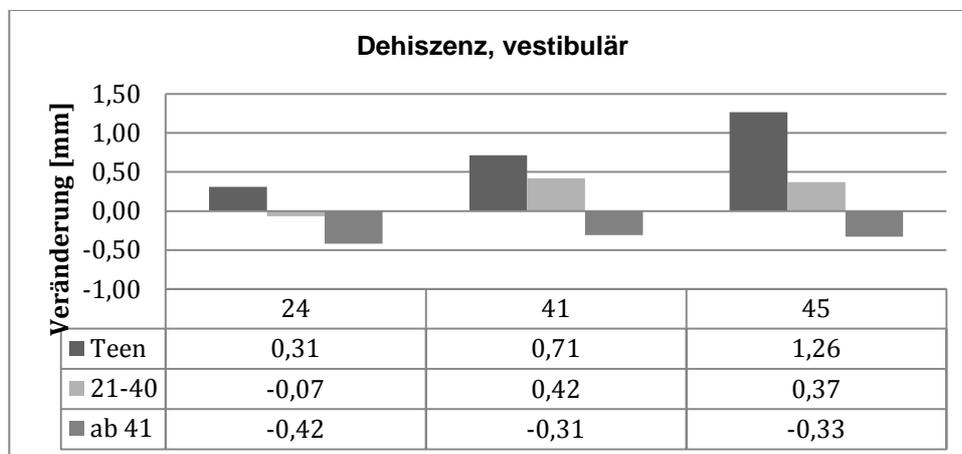


Abb. 29: Mittelwerte der *altersspezifischen* Veränderung der vestibulären Dehiszenzen im Therapieverlauf; Angabe in mm

So verstärkte sich bei Zahn 24 das Dehiszenzausmaß in der Teen-Gruppe um 0,31 Millimeter auf 2,16 Millimeter im Endbefund, während in den beiden anderen Gruppen eine Zunahme des peridentalen Knochenangebotes um 0,07 Millimeter auf 2,31 Millimeter bzw. um 0,42 Millimeter auf 3,52 Millimeter erfolgte ( $p = 0,012$  und  $0,08$ ). Auch im Unterkiefer zeigten die Zähne 41 und 45 ein ähnliches Bild. Während sich in der jüngsten Patientengruppe das Knochenangebot um 0,71 Millimeter veränderte, waren in der mittleren Gruppe 0,42 Millimeter und in der ältesten Gruppe 0,31 Millimeter Unterschied zu verzeichnen ( $p = 0,025$  und  $p = 0,033$ ). Zahn 45 zeigte mit 1,26 Millimetern, 0,37 und 0,33 Millimetern Veränderung insgesamt die größte signifikante Differenz im Vergleich der Altersgruppen ( $p = 0,010$  und  $p = 0,019$ ).

## Alveolarfortsatz, mittleres Wurzel Drittel

Im mittleren Wurzel Drittel ergaben sich allgemein die meisten positiven und negativen Korrelationen. Während sich oral hohe Korrelationen (Korrelationstest nach Spearman-Rho  $0,5 < |R| \leq 0,8$ ) mit Ausnahme der Unterkieferfront vor allem im Oberkiefer ermitteln ließen, wurden vestibulär mit Ausnahme des Zahnes 11 hauptsächlich im Unterkiefer Zusammenhänge zwischen Patientenalter und Ausmaß der Veränderung des peridental Knochenangebotes deutlich.

Signifikante Ergebnisse konnten hierbei oral bei den Zähnen 16, 25, 31 und 33 ermittelt werden (vgl. Abb. 30):

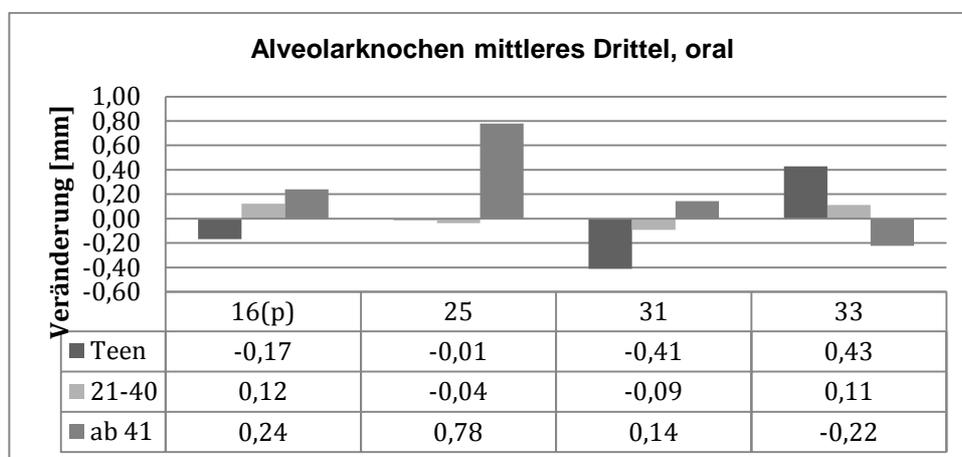


Abb. 30: Mittelwerte der *altersspezifischen* Veränderung der oralen Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, mittleres Wurzel Drittel; Angabe in mm

So zeigte der Zahn 16 an der palatinalen Wurzel eine positive Korrelation zwischen der Höhe des Patientenalters und dem Ausmaß der Veränderung des peridental Knochenangebotes. Während in der jüngsten Gruppe im Therapieverlauf das Knochenangebot um 0,17 Millimeter abnahm, stabilisierte sich dieses in den älteren Gruppen um 0,12 bzw. 0,24 Millimeter ( $p = 0,026$  bzw.  $0,035$ ). Auch bei Zahn 25 und Zahn 31 stieg die Stärke der Veränderung des peridental Knochenangebotes mit dem Patientenalter: Bei den jüngeren Patienten blieb die ossäre Situation mit einer Abnahme von 0,01 bzw. 0,04 Millimetern annähernd unverändert, während sich in der Gruppe ab 41 Jahren das Knochenangebot von 0,99 auf 1,77 Millimeter verstärkte ( $p = 0,044$  bzw.  $p = 0,051$ ). Auch an Zahn 31 zeigte sich in dieser Gruppe eine Zunahme des Knochenangebotes um 0,14 Millimeter, während sich dieses in der Teen-Gruppe von 1,52 auf durchschnittlich 1,11 Millimeter verminderte ( $p = 0,044$  bzw.  $0,046$ ). An Zahn 33 hingegen konnte Gegensätzliches befundet werden: So ergab sich hier eine negative Korre-

lation, und das Knochenangebot zeigte sich mit zunehmendem Patientenalter weniger stark verändert. In der Teen-Gruppe nahm es hierbei um 0,43 Millimeter auf 2,63 Millimeter zu, während in der mittleren Altersgruppe eine Stabilisierung der knöchernen Situation um 0,11 Millimeter zu verzeichnen war. In der Gruppe ab 41 Jahren fand hingegen eine Abnahme von 1,58 auf 1,36 Millimeter statt ( $p = 0,007$  bzw.  $0,008$ ).

Vestibulär zeigten die Zähne 11, 33, 36, 45 und 46 signifikante und deutliche Korrelationen (Korrelationstest nach Spearman-Rho  $0,5 < |R| \leq 0,8$ ). Während bei Zahn 11 eine negative Wechselbeziehung ermittelt werden konnte, resultierte bei den anderen Zähnen mit zunehmendem Patientenalter auch eine Zunahme des peridentalen Knochenangebotes im Therapiezeitraum (vgl. Abb. 31).

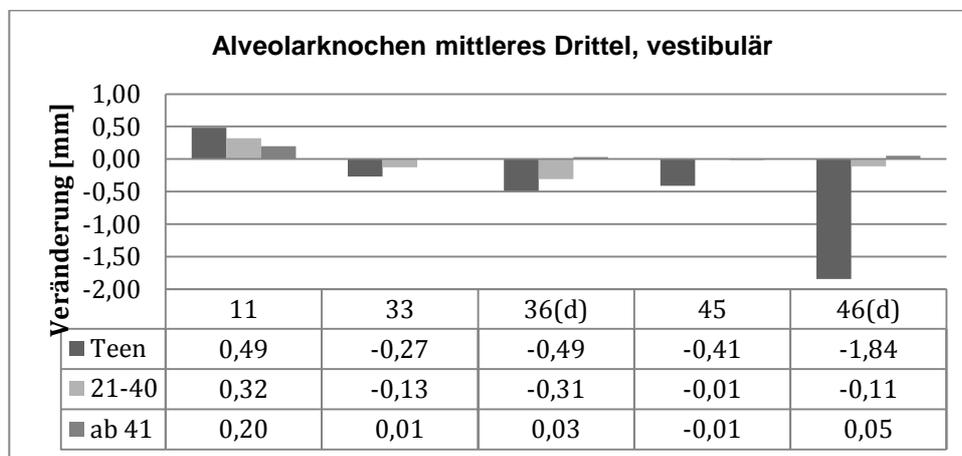


Abb. 31: Mittelwerte der *altersspezifischen* Veränderung der vestibulären Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, mittleres Wurzeldrittel; Angabe in mm

Die Teen-Gruppe wies an Zahn 11 eine Zunahme der Alveolarknochenbreite von rund 0,49 Millimetern auf, während bei den beiden anderen Gruppen eine Zunahme von 0,32 bzw. 0,20 Millimetern zu verzeichnen war ( $p = 0,042$  bzw.  $p = 0,055$ ).

Auch im Unterkiefer zeigten sich in der jüngsten Patientengruppe die stärksten Veränderungen im Therapiezeitraum. So konnte an Zahn 33 eine Abnahme des peridentalen Knochenangebotes von 0,27 Millimetern ermittelt werden, während sich dieses in der mittleren Altersgruppe um 0,13 Millimeter reduzierte und in der ältesten Gruppe eine Knochenzunahme von rund 0,01 Millimetern erfolgte. Zahn 36 zeigte bei den jungen Patienten an der distalen Wurzel eine Abnahme von rund 0,49 Millimetern, auch hier kann das Ausmaß der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes bei den älteren Gruppen mit -0,13 bzw. +0,01 Millimetern als geringer angegeben werden ( $p = 0,027$  bzw.  $p = 0,033$ ). An Zahn 45 zeigte der radiologische Endbefund in der Teen-

Gruppe ebenfalls eine Abnahme von rund 0,41 Millimetern, während die knöchernen Verhältnisse mit -0,01 Millimetern in den anderen Gruppen annähernd stabil blieben ( $p = 0,036$  bzw.  $p = 0,058$ ). Das größte Ausmaß konnte an der distalen Wurzel des Zahnes 46 diagnostiziert werden. Hier fiel zu Behandlungsstart eine verhältnismäßig starke ossäre Begrenzung von 3,29 Millimetern auf, welche sich im Behandlungszeitraum um 1,84 Millimeter auf rund 1,45 Millimeter reduzierte ( $p = 0,015$ ).

### Alveolarfortsatz, unteres Wurzel Drittel

Im unteren oralen Wurzel Drittel konnten im Oberkiefer mit der Ausnahme von 14 und 24 für alle Zähne mäßige bis starke Korrelationen ermittelt werden. Signifikante Zusammenhänge zwischen dem Patientenalter und der Veränderung des peridental Knochenangebotes im Therapiezeitraum zeigten hierbei der Zahn 13 sowie die mesiale Wurzel des Zahnes 16, bei gegensätzlicher Korrelation. Während am Eckzahn mit 1,52 Millimetern die stärkste Verringerung in der Teen-Gruppe festzustellen war ( $p = 0,048$  bzw.  $0,043$ ), zeigte sich an der mesialen Wurzel des ersten Molaren in dieser Gruppe keine Veränderung im Therapieverlauf. Hier konnte der stärkste Knochenverlust mit einer Abnahme von 1,16 Millimetern bei den ältesten Patienten ermittelt werden ( $p = 0,009$  bzw.  $0,014$ ), während sich in dieser Gruppe am Eckzahn mit einer minimalen Zunahme der knöchernen Strukturen von 0,05 Millimetern wenig Veränderung zeigte (vgl. Abb. 32).

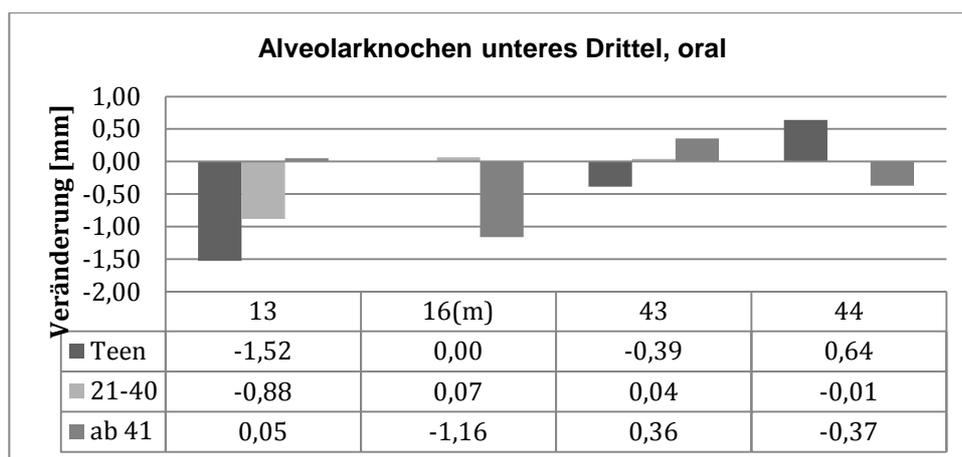


Abb. 32: Mittelwerte der *altersspezifischen* Veränderung der oralen Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, unteres Wurzel Drittel; Angabe in mm

Im Unterkiefer zeigte sich an den ebenfalls signifikanten Zähnen 43 und 44 ein ähnliches Bild. Ähnlich wie im Oberkiefer resultierte am Eckzahn im Gruppenvergleich bei

den jüngsten Patienten mit 0,39 Millimetern die stärkste Abnahme, während am ersten Prämolaren in dieser Gruppe eine Zunahme der ossären Strukturen von 0,64 Millimetern festzustellen war. Die ältesten Patienten hingegen wiesen hier eine Verringerung des peridentalen Knochenangebotes von 0,37 Millimetern und an Zahn 43 eine Zunahme von 0,36 Millimetern auf ( $p = 0,026$  bzw.  $p = 0,031$  und  $p = 0,009$  und  $p = 0,010$ ). Vestibulär konnten im Vergleich zum oralen Untersuchungsbereich weniger signifikante Korrelationen zwischen dem Patientenalter und der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes ermittelt werden. Des Weiteren beschränkten sich die gefundenen Wechselbeziehungen ausschließlich auf den ersten Quadranten des Oberkiefers (vgl. Abb. 33).

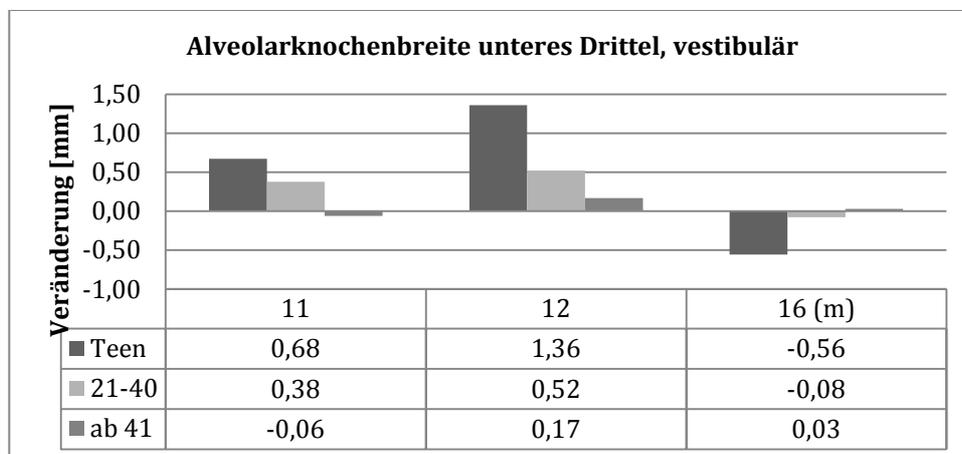


Abb. 33: Mittelwerte der *altersspezifischen* Veränderung der vestibulären Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, unteres Wurzel Drittel; Angabe in mm

Hier konnte in der Teen-Gruppe an den Frontzähnen 11 und 12 mit 0,68 und 1,36 Millimetern ein Zuwachs der knöchernen Situation ermittelt werden ( $p = 0,019$  bzw.  $p = 0,020$  und  $p = 0,037$  bzw.  $p = 0,038$ ), während an der mesialen Wurzel des Zahnes 16 mit 0,56 Millimetern die verhältnismäßig stärkste Verringerung im Gruppenvergleich erfolgte. Während das Ausmaß der Veränderung in dieser Gruppe starken Schwankungen unterlag, zeigte sich in der Gruppe der Erwachsenen ab 41 Jahren mit einer tendenziellen Abnahme von 0,06 Millimetern an Zahn 11 sowie einer tendenziellen Zunahme von 0,17 Millimetern an Zahn 12 und 0,03 Millimetern an Zahn 16 ein harmonischeres Bild ( $p = 0,04$  bzw.  $p = 0,08$ ). Unabhängig von der Art der Korrelation lag die Gruppe der 21- bis 40-Jährigen bezüglich des Ausmaßes der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes bei allen drei Zähnen im Mittelfeld.

## Alveolarfortsatz, apikal

An der Wurzelspitze ergaben sich ausschließlich für den oralen Untersuchungsbereich hohe und signifikante Korrelationen, die auf beide Kiefer verteilt waren (vgl. Abb. 34).

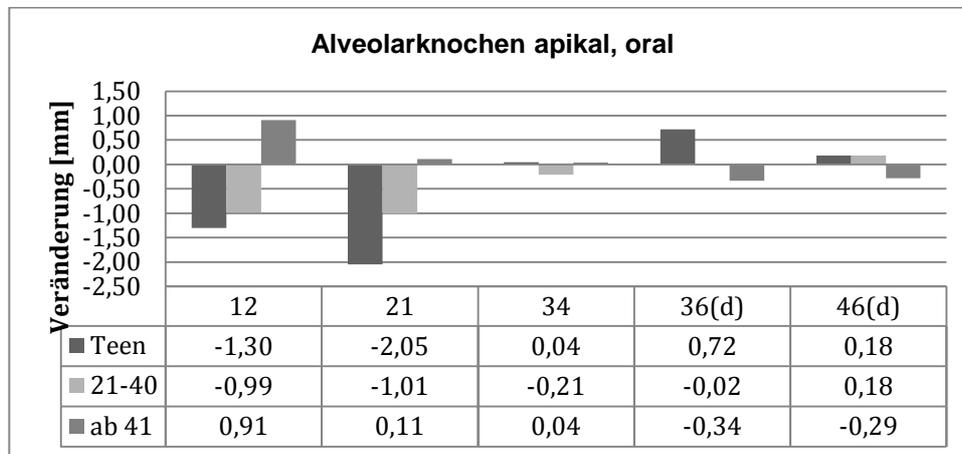


Abb. 34: Mittelwerte der gruppenspezifischen Veränderung der oralen Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, Wurzelspitze; Angabe in mm

Im Oberkiefer zeigten die ermittelten Zähne hierbei ein harmonisches Bild: Sowohl Zahn 12 als auch Zahn 21 wiesen mit einer Verringerung des peridentalen Knochenangebotes von 1,30 und 2,05 Millimetern die stärkste Veränderung in der Teen-Gruppe auf, während in der Gruppe ab 41 Jahren bei beiden Zähnen mit 0,91 und 0,11 Millimetern eine Zunahme der Knochenbreite und gleichzeitig die im Ausmaß schwächste Veränderung festzustellen war ( $p = 0,048$  bzw.  $p = 0,050$  und  $p = 0,038$  bzw.  $p = 0,051$ ).

Im Unterkiefer hingegen ergab sich für Zahn 34 die stärkste Veränderung in der Gruppe der 21- bis 40-Jährigen; während hier eine Abnahme von gemittelt 0,21 Millimetern festgestellt werden konnte, zeigten die beiden anderen Gruppen einen tendenziellen Zuwachs von 0,04 Millimetern ( $p = 0,045$  bzw.  $p = 0,059$ ). An der distalen Wurzel des Zahnes 36 ergab sich das stärkste Ausmaß durch eine Zunahme des peridentalen Knochenangebotes von 0,72 Millimetern in der jüngsten Gruppe; während die ossäre Situation in der mittleren Altersgruppe annähernd stabil blieb, erfolgte bei den Patienten ab 41 Jahren eine Abnahme von rund 0,34 Millimetern ( $p = 0,009$  bzw.  $p = 0,021$ ). Ähnliches konnte auch an der distalen Wurzel des ersten Molaren des vierten Quadranten diagnostiziert werden: Auch hier zeigte die älteste Patientengruppe die stärkste Abnahme des peridentalen Knochenangebotes, während in den anderen beiden Gruppen eine leichte Zunahme von 0,18 Millimetern erfolgte ( $p = 0,037$  bzw.  $p = 0,065$ ).

Im vestibulären Untersuchungsbereich ließen sich, ähnlich wie bei den oralen Dehiszenzen, keine hohen und signifikanten Korrelationen ermitteln. Jedoch fiel auf, dass mit Ausnahme des Zahnes 14 sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer in allen vier Quadranten der mittlere und seitliche Schneidezahn sowie der erster Molar schwache bis mäßige Korrelationen aufwiesen (Korrelationstest nach Spearman-Rho,  $0,2 < |R| \leq 0,5$ ). Aufgrund der Tatsache, dass vereinzelt hohe Korrelationen gefunden wurden, die vermuten lassen, dass eine Wechselbeziehung zwischen dem Patientenalter und der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes besteht, kann die Hypothese „Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit vom Alter auf“ nicht bestätigt werden.

#### 4.5 Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit

Bei der Untersuchung des Einflusses der Kieferzugehörigkeit auf das peridentale Knochenangebot während der Invisalign-Behandlung zeigten sich im Oberkiefer signifikante Abweichungen von einer Normverteilung (Testmethoden nach Kolmogorow-Smirnow und Shapiro-Wilk), die weitere statistische Analyse erfolgte demnach mit nichtparametrischen Methoden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen).

Im Unterkiefer war keine Abweichung von einer Normverteilung feststellbar, die weitere statistische Analyse konnte anhand von parametrischen Methoden (T-Test für verbundene Stichproben) durchgeführt werden.

#### Orale und vestibuläre Dehiszenzen

Die untersuchten 576 Zähne im Oberkiefer wiesen oral vor Behandlungsstart einen Mittelwert der Dehiszenzen von 2,37 Millimetern auf, im radiologischen Endbefund konnten 2,42 Millimeter ermittelt werden (Tab. 27).

Tab. 27: Mittelwerte der oralen Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Oberkiefer vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangsuntersuchung	576	2,37	1	1,15	4,68
16 bis 26 Enduntersuchung	576	2,42	0,94	1,23	4,55

Im Unterkiefer zeigten die 504 Zähne im Mittel eine Dehiszenzstärke von 2,40 Millimetern im Ausgangsbefund und 2,43 Millimetern im Endbefund auf (Tab. 28).

Tab. 28: Mittelwerte der oralen Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im *Unterkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangsuntersuchung	504	2,4	0,86	1,07	4,27
36 bis 46 Enduntersuchung	504	2,43	0,84	1,09	4,29

Um die beiden Behandlungszeitpunkte miteinander zu vergleichen, wurde bei jedem Patienten die Summe der Dehiszenzen pro Kiefer über alle Zähne erhoben, und im Anschluss wurden alle Patienten im Mittelwert beschrieben.

Hierbei konnte im Oberkiefer bei den 18 Patienten kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Behandlungszeitpunkten ermittelt werden ( $p \geq 0,05$ ).

Im Unterkiefer erfolgte ebenfalls eine Signifikanzprüfung auf Patientenebene, der Unterschied der Mittelwerte zu beiden Behandlungszeitpunkten zeigte auch hier keine Signifikanz ( $p \geq 0,05$ ).

Bezüglich der Veränderung des peridental Knochengebotes in Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit war bei den 18 Patienten bezüglich der oralen Dehiszenzen im Mittel folgender Unterschied im Dehiszenzausmaß feststellbar (Abb. 35):

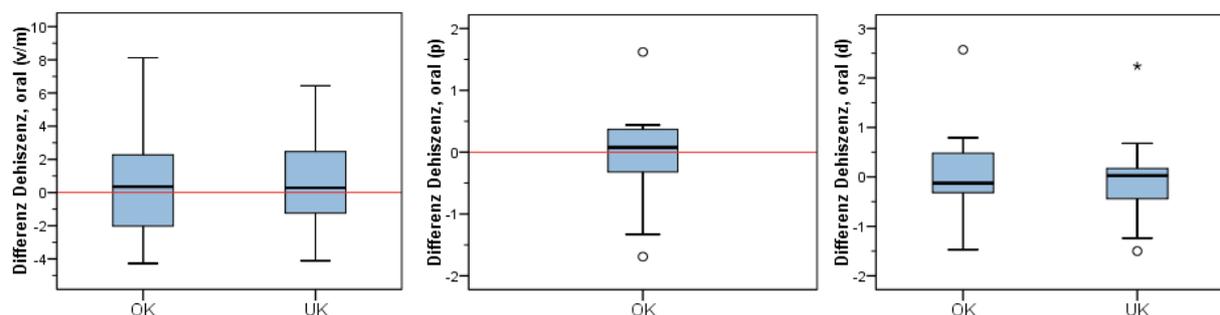


Abb. 35: *Kieferbezogener* Unterschied der Dehiszenzen oral (Werte im Mittelwert beschrieben)

So wurde im Oberkiefer oral im Verlauf der Behandlung die Summe der Dehiszenzen um 0,92 Millimeter verstärkt. Im Bereich der distalen Wurzel war diese Verstärkung mit 0,07 Millimetern schwächer ausgeprägt, an der palatinalen Wurzel der Oberkiefermola-

ren erfolgte eine Abmilderung der Defektgröße um 0,05 Millimeter. Im Unterkiefer konnte bei den 504 Zähnen der 18 Patienten ebenfalls eine Verstärkung des Dehiszenzausmaßes von 0,45 Millimetern festgestellt werden, die distalen Wurzeln zeigten einen Knochenzugewinn von 0,05 Millimetern.

Der Unterschied zwischen Oberkiefer und Unterkiefer war hierbei nicht signifikant (T-Test für verbundene Stichproben, Wilcoxon-Test,  $p \geq 0,05$ ), die Hypothese „Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridental Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit auf“ kann bezüglich der oralen Dehiszenzen als bestätigt angesehen werden.

Vestibulär zeigten die 576 Oberkieferzähne vor der Behandlung eine Dehiszenz von 2,54 Millimetern, nach der Behandlung war ein Mittelwert von 2,56 Millimetern feststellbar (Tab. 29).

Tab. 29: Mittelwerte der vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Oberkiefer vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangsuntersuchung	576	2,54	1,06	1,13	5,06
16 bis 26 Enduntersuchung	576	2,56	1,13	1,88	5,33

Im Unterkiefer ergaben sich für die 504 untersuchten Zähne im Mittel Werte von 2,32 und 2,48 Millimetern zu den jeweiligen Behandlungszeitpunkten (Tab. 30).

Tab. 30: Mittelwerte der vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Unterkiefer vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangsuntersuchung	504	2,32	1,23	0,95	5,97
36 bis 46 Enduntersuchung	504	2,48	1,36	1,02	6,35

Auch hier wurde zur Signifikanzprüfung bei jedem Patienten die Summe der Dehiszenzen pro Kiefer über alle Zähne erhoben und im Anschluss jeder Patient im Mittelwert beschrieben. Hierbei konnte im Oberkiefer bei den 18 Patienten kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Behandlungszeitpunkten ermittelt werden (Wilcoxon-

Tests,  $p \geq 0,05$ ), auch im Unterkiefer war der Unterschied der Mittelwerte zu beiden Behandlungszeitpunkten nicht signifikant (T-Test,  $p \geq 0,05$ ). Vergleicht man die Veränderung des peridentalen Knochenangebotes zwischen Ober- und Unterkiefer, so zeigen sich – ähnlich wie bei den oralen Dehiszenzen – keine signifikanten Unterschiede (vgl. Abb. 36):

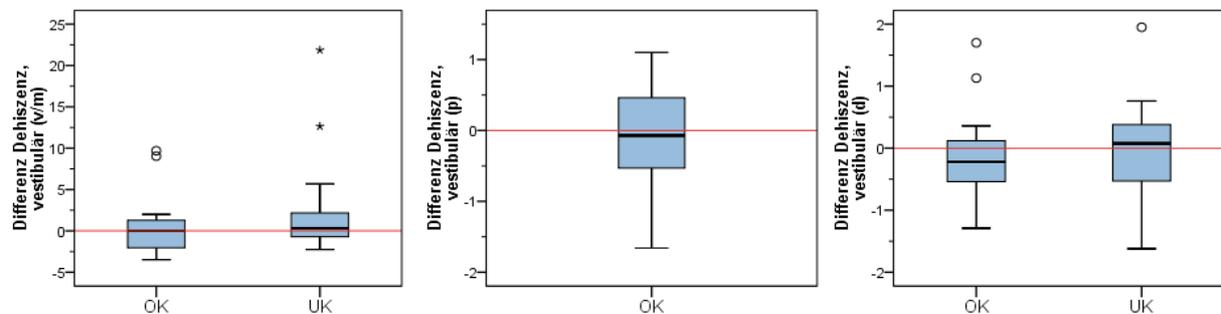


Abb. 36: Kieferbezogener Unterschied der Dehiszenzen vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben)

So war im Oberkiefer eine Zunahme des Dehiszenzausmaßes von 0,47 Millimetern feststellbar, die palatinalen und distalen Wurzeln zeigten im Mittel eine Abnahme von 0,06 und 0,13 Millimetern. Im Unterkiefer waren die Mittelwerte um 2,31 Millimeter erhöht, die Mittelwerte der distalen Wurzeln zeigten hingegen keine Veränderung.

Die Hypothese „Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit auf“ darf bezüglich der vestibulären Dehiszenzen ebenfalls als bestätigt angesehen werden (T-Test für verbundene Stichproben, Wilcoxon-Test,  $p \geq 0,05$ ).

### Alveolarfortsatz, mittleres Wurzel Drittel

Im mittleren Wurzel Drittel kann die orale Alveolarknochenstärke im Oberkiefer durchschnittlich mit 2,78 Millimetern angegeben werden und zeigt im Endbefund Werte von rund 2,62 Millimetern (vgl. Tab. 31).

Tab. 31: Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzel Drittel aller untersuchten Zähne im Oberkiefer vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangsuntersuchung	576	2,78	1,15	0,55	4,8
16 bis 26 Enduntersuchung	576	2,62	1,05	0,64	4,55

Im Unterkiefer konnten mit 2,17 Millimetern vor Behandlungsstart und 2,25 Millimetern nach der Behandlung allgemein geringere Mittelwerte festgestellt werden (vgl. Tab. 32).

Tab. 32: Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzel Drittel aller untersuchten Zähne im *Unterkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangs-untersuchung	504	2,17	0,82	0,95	3,97
36 bis 46 End-untersuchung	504	2,25	0,82	1,01	4,06

Vestibulär war im mittleren Wurzel Drittel vor Behandlungsstart eine Befundung von 1,97 Millimetern möglich, nach der Invisalign-Therapie zeigten sich mit 2,03 Millimetern annähernd gleichbleibende Werte (vgl. Tab. 33).

Tab. 33: Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzel Drittel aller untersuchten Zähne im *Oberkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangs-untersuchung	576	1,97	0,8	0,67	3,73
16 bis 26 End-untersuchung	576	2,03	0,82	0,64	3,87

Im Unterkiefer war der Unterschied mit rund 0,75 Millimetern im Ausgangsbefund und 0,62 Millimetern im Endbefund stärker ausgeprägt, zeigte jedoch ebenfalls keine Signifikanz (vgl. Tab. 34).

Tab. 34: Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzel Drittel aller untersuchten Zähne im *Unterkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangs-untersuchung	504	0,75	0,45	0,13	1,93
36 bis 46 End-untersuchung	504	0,62	0,33	0,08	1,36

Um die beiden Behandlungszeitpunkte miteinander zu vergleichen, wurde bei jedem Patienten die Summe der Knochenbreiten pro Kiefer über alle Zähne erhoben, und im Anschluss wurden alle Patienten im Mittelwert beschrieben.

Stellt man nun die Veränderung des peridental Knochenangebotes der beiden Kiefer einander gegenüber, so zeigen sich folgende Tendenzen: Während oral im Bereich der Oberkieferwurzeln im Allgemeinen eine Abnahme der Knochenbreite von 2,84 Millimetern festzustellen war, zeigte sich dieser Effekt im Unterkiefer mit einer Zunahme von 0,76 Millimetern nicht. Dieser Unterschied ist mit  $p = 0,003$  signifikant (T-Test für gepaarte Stichproben, vgl. Abb. 37).

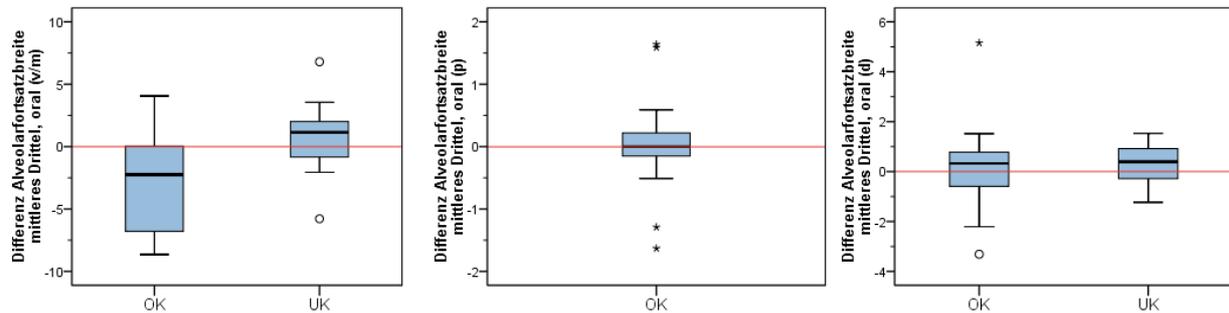


Abb. 37: *Kieferbezogener* Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzeldrittel, oral (Werte im Mittelwert beschrieben). Der Unterschied zwischen Oberkiefer und Unterkiefer war im Bereich vestibulär / mesial signifikant.

Vestibulär konnte ein gegenteiliges Ergebnis festgestellt werden: Während sich hier im Oberkiefer eine Verbesserung der ossären Situation von rund 1,05 Millimetern zeigte, erfolgte im Unterkiefer ein Rückgang der Knochenbreite von 0,99 Millimetern. Auch dieser Effekt kann mit  $p = 0,010$  als signifikant betrachtet werden (T-Test für gepaarte Stichproben, vgl. Abb. 38).

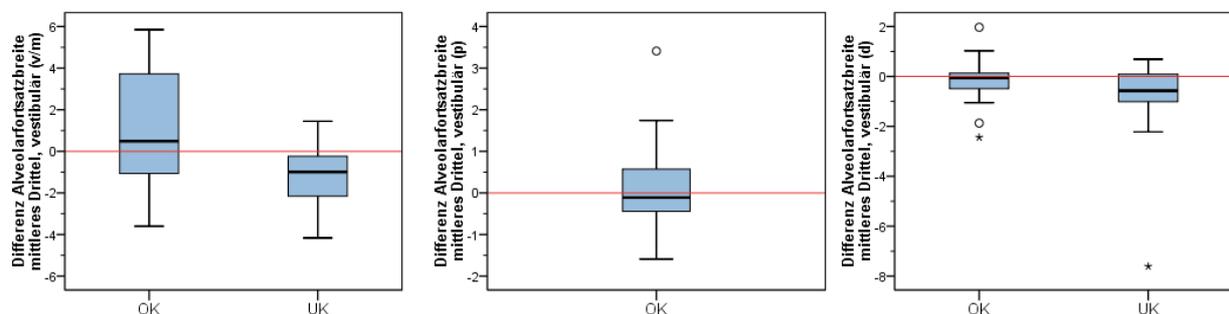


Abb. 38: *Kieferbezogener* Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzeldrittel, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben). Der Unterschied zwischen Oberkiefer und Unterkiefer war im Bereich vestibulär / mesial signifikant.

Für die distalen Wurzeln der Molaren konnten hingegen keine signifikanten Korrelationen ermittelt werden; hier erfolgte oral in beiden Kiefern eine Zunahme von 0,15 Milli-

metern im Oberkiefer und von 0,31 Millimetern im Unterkiefer, vestibulär hingegen eine Minderung des peridental Knochenangebotes von 0,23 und 0,89 Millimetern.

### Alveolarfortsatz, unteres Wurzel Drittel

Im unteren Wurzel Drittel konnte im Oberkiefer vor der Behandlung oral eine mittlere Knochenstärke von 4,72 Millimetern festgestellt werden, im Endbefund zeigten sich 4,41 Millimeter (vgl. Tab. 35).

Tab. 35: Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzel Drittel aller untersuchten Zähne im *Oberkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangsuntersuchung	576	4,72	2,01	1,23	8,47
16 bis 26 Enduntersuchung	576	4,41	1,96	1,13	8,24

Im Unterkiefer waren sowohl Ausgangs- als auch Endwert mit 3,16 bzw. 3,26 Millimetern geringer ausgeprägt (vgl. Tab. 36).

Tab. 36: Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzel Drittel aller untersuchten Zähne im *Unterkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangsuntersuchung	504	3,16	1,2	1,11	5,45
36 bis 46 Enduntersuchung	504	3,26	1,22	1,29	5,73

Bezüglich der Veränderung des peridental Knochenangebotes in Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit war bei den 18 Patienten hinsichtlich der oralen Knochenbreiten im unteren Wurzel Drittel im Mittel folgender Unterschied feststellbar (Abb. 39):

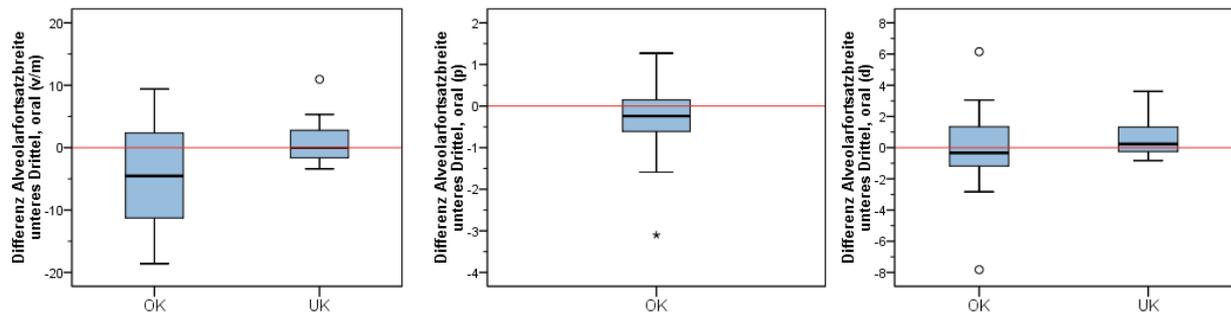


Abb. 39: *Kieferbezogener* Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzel Drittel, oral (Werte im Mittelwert beschrieben)

Es ergab sich im unteren Wurzel Drittel oral ein signifikanter Unterschied der therapiebedingten Veränderung der Knochenbreiten zwischen Ober- und Unterkiefer (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,005$ ): Während im Oberkiefer im Mittel insgesamt eine Abnahme des peridentalen Knochenangebotes von 4,5 Millimetern erfolgte, zeigte sich dieses im Unterkiefer um 1,15 Millimeter verstärkt. Bezüglich der distalen Molarenwurzel war dieser Effekt mit einer Reduzierung von 0,24 Millimetern im Oberkiefer und einer Stabilisierung von 0,64 Millimetern im Unterkiefer hingegen nicht signifikant, an der palatinalen Molarenwurzel konnte insgesamt eine Zunahme des peridentalen Knochenangebotes von 0,32 Millimetern verzeichnet werden.

Vestibulär zeigten sich im Oberkiefer vor der Behandlung Knochenbreiten von 1,97 Millimetern, nach der Behandlung waren 2,05 Millimeter feststellbar (vgl. Tab. 37).

Tab. 37: Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzel Drittel aller untersuchten Zähne im *Oberkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangsuntersuchung	576	1,97	1,37	0,32	4,86
16 bis 26 Enduntersuchung	576	2,05	1,32	0,32	4,76

Im Unterkiefer konnte im unteren Wurzel Drittel im Ausgangsbefund eine vestibuläre Knochenstärke von 1,81 Millimetern diagnostiziert werden, im Endbefund zeigte sich der peridentale Knochen mit 1,73 Millimetern im Vergleich zur ersten Messung vermindert (vgl. Tab. 38).

Tab. 38: Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzeldrittel aller untersuchten Zähne im *Unterkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangsuntersuchung	504	1,81	1,11	0,3	4,41
36 bis 46 Enduntersuchung	504	1,73	0,99	0,3	3,85

Bezüglich der Veränderung des peridentaln Knochenangebotes war bei den 18 Patienten hinsichtlich der vestibulären Knochenbreiten ein kieferbezogener Unterschied feststellbar (Abb. 40):

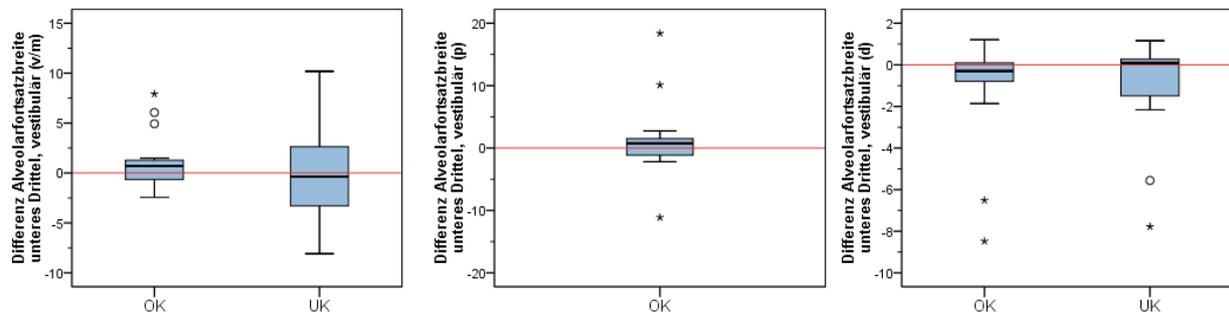


Abb. 40: *Kieferbezogener* Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzeldrittel, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben)

Es zeigten sich bei der Veränderung des peridentaln Knochenangebotes im Oberkiefer eine allgemeine Zunahme von 1,15 Millimetern und im Unterkiefer eine Reduktion von 0,27 Millimetern. Ähnlich wie im oralen Knochenbereich war dieser kieferbezogene Unterschied signifikant (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,016$ ). Die distalen Wurzeln der Molaren wiesen sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer eine Minderung von 1,01 bzw. 0,86 Millimetern auf, palatinal konnte eine Zunahme der Knochenstärke von 1,22 Millimetern ermittelt werden.

### Alveolarfortsatz, apikal

Im Bereich der Wurzelspitze war im Oberkiefer oral durchschnittlich eine Knochenstärke von 7,25 Millimetern feststellbar, nach der Behandlung zeigte sich diese mit 6,71 Millimetern vermindert (vgl. Tab. 39).

Tab. 39: Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im *Oberkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangsuntersuchung	576	7,25	4,3	1,88	16,88
16 bis 26 Enduntersuchung	576	6,71	4,09	1,79	16,63

Im Unterkiefer wurden vor Behandlungsstart 5,13 Millimeter ermittelt, nach der Therapie zeigten sich bei allen untersuchten Zähnen rund 5,04 Millimeter (vgl. Tab. 40).

Tab. 40: Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im *Unterkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangsuntersuchung	504	5,13	1,85	2,1	8,57
36 bis 46 Enduntersuchung	504	5,04	1,73	2,07	8,32

Bezüglich der apikalen Veränderung des peridental Knochenangebotes in Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit war bei den 18 Patienten im Bereich der oralen Knochenbreiten im Mittel folgender Unterschied feststellbar (Abb. 41):

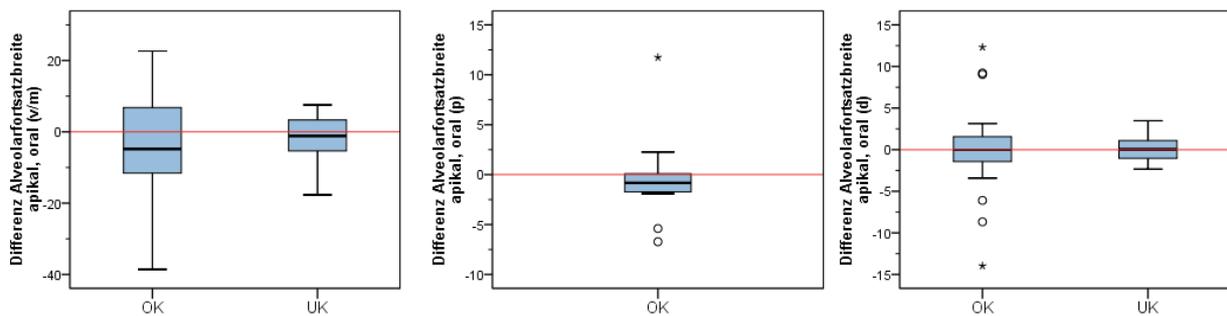


Abb. 41: *Kieferbezogener* Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten apikal, oral (Werte im Mittelwert beschrieben)

Sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer erfolgte eine Reduktion des peridental Knochenangebotes von 4,3 bzw. 1,35 Millimetern, die distalen Molarenwurzeln wiesen im Oberkiefer keine Veränderung auf, im Unterkiefer konnte distal insgesamt eine Zunahme von 0,14 Millimetern verzeichnet werden. An der palatinalen Wurzel verringerte sich das peridentale Knochenangebot um 0,49 Millimeter.

Vestibulär zeigten die 576 untersuchten Oberkieferzähne eine durchschnittliche Knochenbreite von 2,77 Millimetern im Ausgangsbefund bzw. 2,73 Millimetern im Endbefund (vgl. Tab. 41).

Tab. 41: Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im *Oberkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
16 bis 26 Ausgangsuntersuchung	576	2,77	1,86	0,56	6,47
16 bis 26 Enduntersuchung	576	2,73	1,88	0,57	6,31

Im Unterkiefer war vor Therapiestart ein Knochenbefund von fünf Millimetern, nach der Invisalign-Behandlung von 5,12 Millimetern feststellbar (vgl. Tab. 42).

Tab. 42: Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im *Unterkiefer* vor und nach der Behandlung

Zahn	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
36 bis 46 Ausgangsuntersuchung	504	5	1,66	2,32	8,44
36 bis 46 Enduntersuchung	504	5,12	1,68	2,39	8,7

Bezüglich der Veränderung des peridental Knochenangebotes in Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit war bei den 18 Patienten apikal an der vestibulären Knochen-seite folgendes Therapieergebnis feststellbar (Abb. 42):

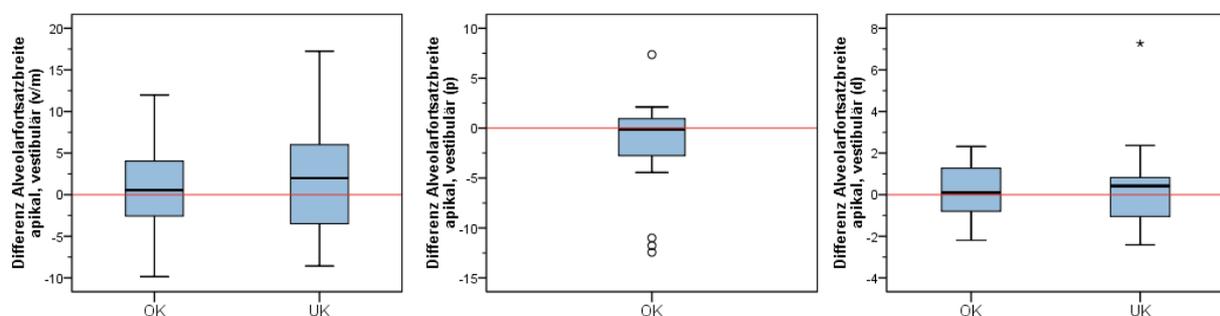


Abb. 42: *Kieferbezogener* Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten apikal, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben)

Im Oberkiefer verstärkte sich das peridentale Knochenangebot während der Invisalign-Therapie um 0,85 Millimeter, im Unterkiefer um 1,29 Millimeter. Im Bereich der distalen Wurzel der Molaren kann diese Verringerung mit 0,24 bzw. 0,35 Millimetern angegeben werden, die palatinale Wurzel der Oberkiefermolaren zeigte hingegen eine Abnahme der ossären Verhältnisse von rund 1,74 Millimetern.

Weder oral noch vestibulär zeigten sich apikal bei der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Kiefervergleich signifikante Tendenzen (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen, T-Test für verbundene Stichproben,  $p \geq 0,05$ ).

Die Nullhypothese „Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit auf“ konnte daher für den apikalen Knochenbereich nicht verworfen werden.

#### **4.6 Abhängigkeit von der Zahnart**

Um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen der Zahnart und der behandlungsbedingten Veränderung des peridentalen Knochenangebotes besteht, wurden alle untersuchten Zähne der Patienten anhand ihrer Morphologie in Gruppen unterteilt. Ein Test auf Normverteilung durch die Testmethoden Kolmogorow-Smirnow und Shapiro-Wilk zu beiden Behandlungszeitpunkten zeigte bei einigen Zähnen signifikante Abweichungen von einer Normalverteilung ( $p < 0,05$ ), die weitere statistische Analyse erfolgte demnach mit nichtparametrischen Methoden.

Im Anschluss wurden die Veränderungen zwischen Ausgangs- und Enduntersuchung einander gegenübergestellt, um signifikante Korrelationen zu ermitteln (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen).

#### **Orale und vestibuläre Dehiszenzen**

Bezüglich der oralen Dehiszenzen zeigten die mittleren Inzisivi mit einem Mittelwert von 2,08 Millimetern vor der Behandlung und 2,22 Millimetern nach der Behandlung mit rund 0,15 Millimetern die größte Veränderung zwischen den Behandlungszeitpunkten. Die Werte der seitlichen Inzisivi sowie der ersten und zweiten Prämolaren lagen mit 0,09, 0,07 und 0,04 Millimetern Dehiszenzverstärkung annähernd in einem ähnlichen Bereich. Bei den Eckzähnen konnte bei Mittelwerten von 2,4 Millimetern vor Behandlungsstart und 2,38 Millimetern nach Behandlungsende eine tendenzielle Verbesserung

des Dehiszenzausmaßes beobachtet werden. Ein ähnlicher Effekt war bei den Molaren im Bereich der palatinalen Wurzel feststellbar: Während mesial eine Veränderung von 2,53 Millimetern auf 2,57 Millimeter erfolgte, zeigte sich hier eine Stabilisierung von 2,6 Millimetern auf 2,57 Millimeter. Im distalen Wurzelbereich konnten im Mittel gleichbleibende Werte von 2,34 Millimetern diagnostiziert werden.

Tabelle 43 zeigt in der Übersicht Ausgangs- und Endbefunde der einzelnen Zahngruppen sowie die mittlere Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Behandlungszeitraum:

Tab. 43: Zahnartbezogener Unterschied der Dehiszenzen oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangsuntersuchung	Enduntersuchung	Veränderung	
mittlerer Inzisivus	n = 144	2,08	2,22	0,15	
seitlicher Inzisivus	n = 144	2,17	2,26	0,09	
Caninus	n = 144	2,4	2,38	-0,02	
erster Prämolare	n = 144	2,56	2,6	0,04	
zweiter Prämolare	n = 144	2,47	2,52	0,07	
Molar	n = 360	m/v	2,53	2,57	0,04
		p	2,6	2,57	-0,03
		d	2,34	2,34	0,02

Die Veränderung des peridentalen Knochenangebotes während der Invisalign-Behandlung war hierbei für die Zähne 11, 13 und 45 signifikant (vgl. Abb. 43):

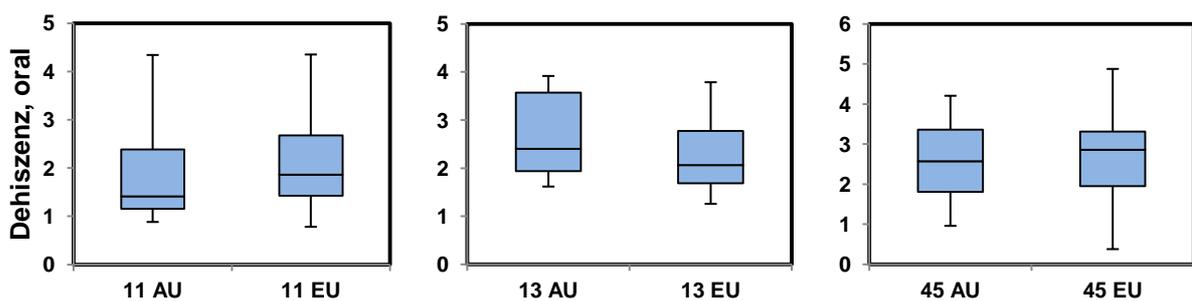


Abb. 43: Orale Dehiszenzen vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 11, 13 und 45

Zahn 11 der untersuchten Patienten wies vor der Behandlung orale Dehiszenzen mit einem Mittelwert von 1,76 Millimetern auf, im Endbefund konnten 2,07 Millimeter festgestellt werden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,029$ ). Zahn 13 zeigte ähnlich wie im oben beschriebenen Gruppenverband aller Eckzähne eine Verbesserung der

knöchernen Situation von im Mittel 2,62 Millimetern auf 2,31 Millimeter (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,08$ ). Im Unterkiefer konnten bei Zahn 45 während der Ausgangsuntersuchung Mittelwerte von 2,61 Millimetern gemessen werden, nach der Behandlung ergab sich diesbezüglich ein Befund von 2,82 Millimetern (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,039$ ).

Im vestibulären Knochenbereich zeigten sich im Frontzahn- und vorderen Seitenzahnbereich im Vergleich zum oralen Untersuchungsbereich höhere Dehiszenzhöhen zu beiden Befundzeitpunkten. Dieser Effekt war bei den Inzisivi am stärksten ausgeprägt: Die mittleren Schneidezähne wiesen im Mittel 2,56 Millimeter Dehiszenzhöhen vor der Behandlung auf, nach der Behandlung waren diese um 0,10 auf 2,66 Millimeter erhöht. Bei den seitlichen Schneidezähnen konnte mit 0,12 Millimetern eine Zunahme um 2,31 auf 2,43 Millimeter verzeichnet werden. Die Eckzähne zeigten mit 2,57 Millimetern vor und 2,62 Millimetern nach der Behandlung im Vergleich zum oralen Untersuchungsbereich keine tendenzielle Stabilisierung der ossären Situation. Beide Prämolaren wiesen im Mittel eine Dehiszenzveränderung von 0,20 Millimetern auf, bei einem Ausgangsbefund der ersten Prämolaren von 2,58 und der zweiten Prämolaren von 2,19 Millimetern. Im Wurzelbereich der ersten Molaren konnte bezüglich der vestibulären Dehiszenzen die geringste Veränderung befundet werden; hier war nach der Behandlung mesial eine tendenzielle Zunahme der Defekthöhe von 0,03 Millimetern auf 2,49 Millimeter erkennbar, während distal bei allen ersten Molaren und palatinal im Oberkiefer eine Abnahme der Dehiszenzhöhe von gemittelt 0,03 Millimetern auf 2,32 bzw. 2,48 Millimeter diagnostiziert werden konnte (vgl. Tab. 44).

Tab. 44: *Zahnartbezogener* Unterschied der Dehiszenzen vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangsuntersuchung	Enduntersuchung	Veränderung	
mittlerer Inzisivus	n = 144	2,56	2,66	0,1	
seitlicher Inzisivus	n = 144	2,31	2,43	0,12	
Caninus	n = 144	2,57	2,62	0,06	
erster Prämolare	n = 144	2,58	2,78	0,2	
zweiter Prämolare	n = 144	2,19	2,38	0,2	
Molare	m/v	n = 360	2,47	2,49	-0,03
			2,51	2,48	-0,03
			2,35	2,32	-0,03

Die Veränderung der Dehiszenzen während der Invisalign-Behandlung zeigte bei Zahn 35 und der distalen Wurzel des Zahnes 16 eine signifikante Korrelation (vgl. Abb. 44).

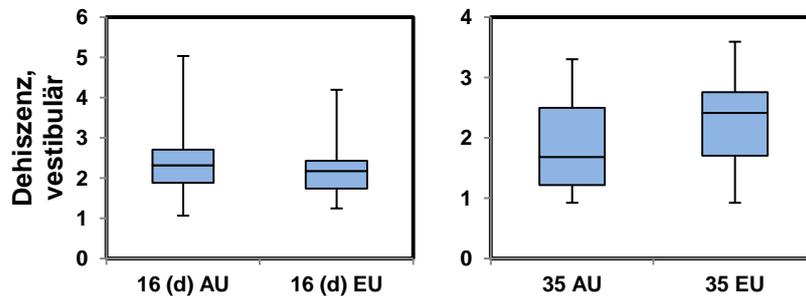


Abb. 44: Vestibuläre Dehiszenzen vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 16 (distale Wurzel) und 35

Zahn 35 zeigte im Ausgangsbefund eine mittlere Distanz von der Schmelz-Zement-Grenze zur vestibulären crestalen Knochenkante von 1,87 Millimetern. Im Endbefund konnte mit 2,25 Millimetern per definitionem eine „echte“ Dehiszenz diagnostiziert werden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,01$ ). Im vestibulären Knochenbereich der distalen Wurzel des Zahnes 16 war im Endbefund mit 2,23 Millimetern Defekthöhe eine signifikante Verbesserung der knöchernen Situation zu den ermittelten 2,42 Millimetern im Ausgangsbefund feststellbar (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,035$ ).

### Alveolarfortsatz, mittleres Wurzel Drittel

Bezüglich der Veränderung des peridental Knochenangebotes in Abhängigkeit von der Zahnart zeigten sich im Bereich des mittleren Wurzel drittels die meisten signifikanten Korrelationen.

Oral wiesen die zentralen Inzisivi einen mittleren Knochenrückgang von 0,37 Millimetern auf, Ähnliches war bei den seitlichen Schneidezähnen mit 0,24 Millimetern zu beobachten. Abgesehen von der distalen Wurzel der ersten Molaren im Oberkiefer, welche mit 0,11 Millimetern eine tendenzielle Zunahme des oralen Knochenangebotes zu verzeichnen hatten, blieb dieses bei den Eckzähnen und restlichen Seitenzähnen mit +/-0,01 bis 0,05 Millimetern Veränderung annähernd gleich.

Tabelle 45 zeigt in der Übersicht Ausgangs- und Endbefunde der einzelnen Zahngruppen sowie die mittlere Veränderung des peridental Knochenangebotes im Behandlungszeitraum:

Tab. 45: Zahnartbezogener Unterschied der Knochenbreiten, oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangs- untersuchung	End- untersuchung	Veränderung	
mittlerer Inzisivus	n = 144	1,58	1,21	-0,37	
seitlicher Inzisivus	n = 144	1,67	1,43	-0,24	
Caninus	n = 144	1,87	1,86	-0,01	
erster Prämolare	n = 144	1,87	1,89	0,02	
zweiter Prämolare	n = 144	2,14	2,19	0,05	
Molar	n = 360	m/v	3,99	4,02	0,03
		P	1,16	1,18	0,02
		D	5,04	5,16	0,11

Die Veränderung des oralen peridental Knochenangebotes im Bereich des mittleren Wurzeldrittels war hierbei für die Zähne 11, 21, 22 und 43 sowie für die distalen Wurzeln von 16 und 26 signifikant (vgl. Abb. 45):

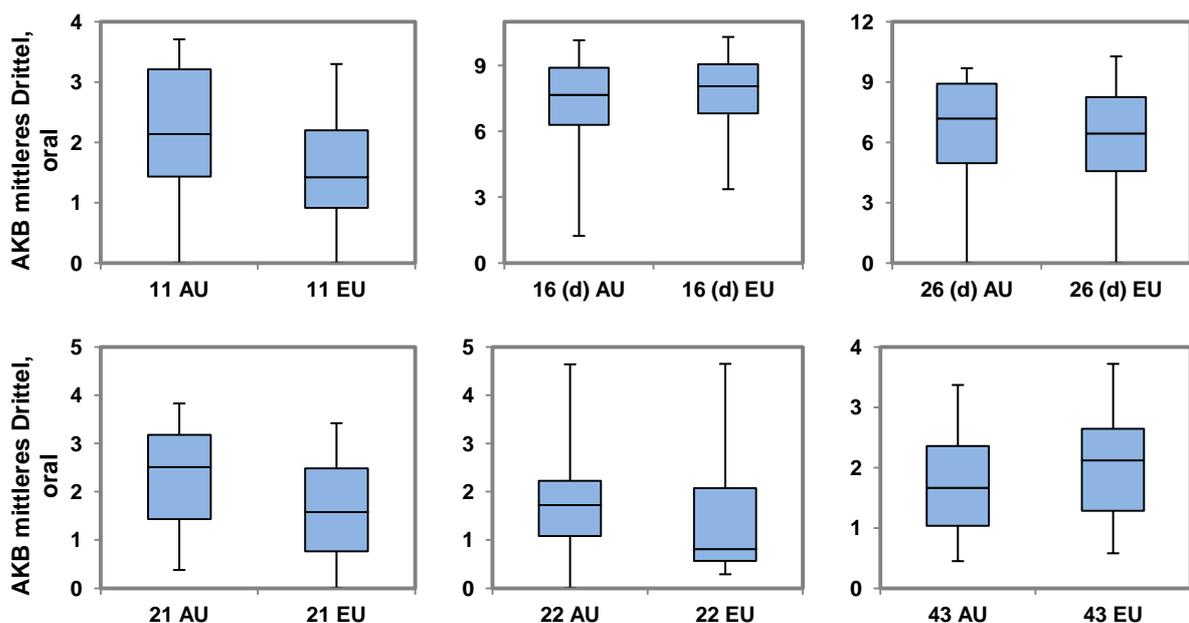


Abb. 45: Orale Alveolarknochenbreiten (AKB) im mittleren Wurzeldrittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 11, 16 (distale Wurzel), 26 (distale Wurzel), 21, 22 und 43

Zahn 11 und auch Zahn 21 wiesen hierbei vor der Behandlung eine orale Knochendicke von 2,2 bzw. 2,4 Millimetern auf, welche sich im Laufe der Invisalign-Behandlung auf 1,5 bzw. 1,6 Millimeter verminderte (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,001$  bzw.  $p = 0,002$ ). Auch der seitliche Schneidezahn 22 zeigte eine Knochenreduktion von rund 0,5 Millimetern (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,035$ ). Bei den distalen Wurzeln der ersten Molaren im Oberkiefer zeigte sich im Seitenvergleich eine unterschiedliche

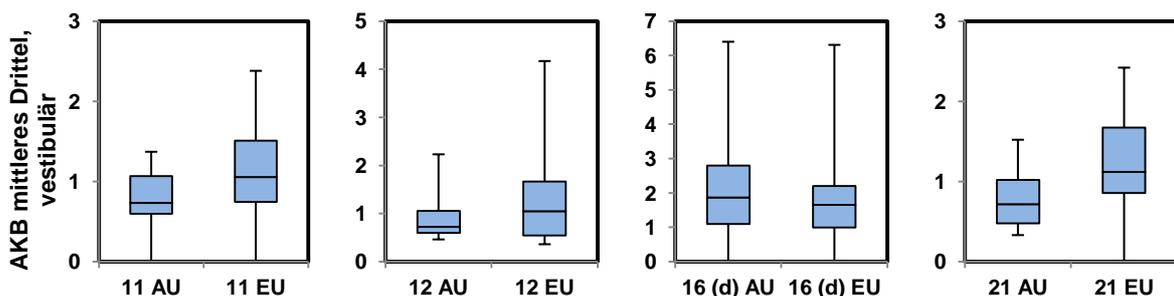
Tendenz: Während im zweiten Quadranten eine Minderung der Knochenstärke von 0,5 Millimetern erfolgte, konnte im ersten Quadranten eine Zunahme der knöchernen Strukturen von 0,7 Millimetern beobachtet werden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,042$  bzw.  $p = 0,007$ ). Zahn 43 zeigte bei einer Zunahme von im Mittel 0,26 Millimetern auf 2,00 Millimeter orale Knochenstärke ebenfalls eine signifikante Tendenz (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,004$ ).

Vestibulär konnte bei den mittleren und seitlichen Schneidezähnen allgemein eine Zunahme der Knochenstärke von 0,15 Millimetern gemessen werden, während die ossäre Wurzelbedeckung im Eck- und Seitenzahnbereich mit +/-0,03 bis 0,07 Millimetern Veränderung anzugeben war. Eine Ausnahme hiervon bildeten mit einer Verminderung des peridental Knochenangebotes von im Mittel 0,28 Millimetern die ersten Molaren im Bereich der distalen Wurzel und die zweiten Prämolaren mit rund 0,13 Millimetern (vgl. Tab. 46).

Tab. 46: Zahnartbezogener Unterschied der Knochenbreiten, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangsuntersuchung	Enduntersuchung	Veränderung
mittlerer Inzisivus	n = 144	0,67	0,82	0,15
seitlicher Inzisivus	n = 144	0,71	0,86	0,15
Caninus	n = 144	0,6	0,57	- 0,03
erster Prämolare	n = 144	0,68	0,63	-0,04
zweiter Prämolare	n = 144	1,3	1,17	-0,13
Molar	n = 360	0,89	0,81	-0,09
m/v		7,78	7,86	0,07
p		1,76	1,48	- 0,28
d				

Diese Veränderung war hierbei im Oberkiefer für die Zähne 11, 21, 12 und die distale Wurzel des Zahnes 16 sowie im Unterkiefer für die Zähne 33, 35 und beide Wurzeln des Zahnes 36 signifikant (vgl. Abb. 46):



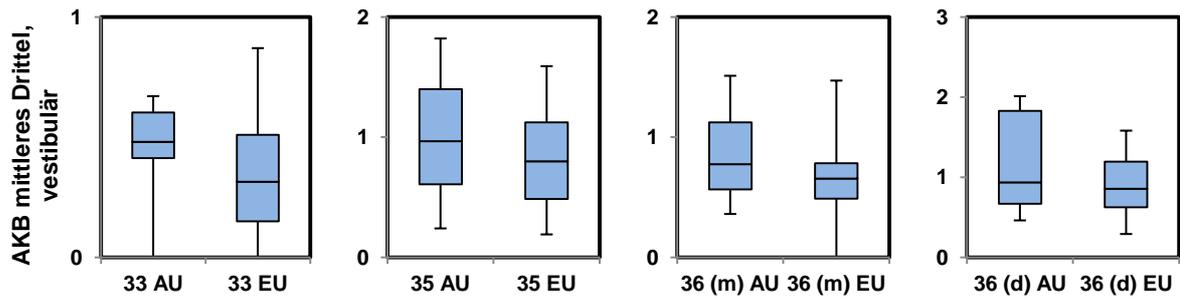


Abb. 46: Vestibuläre Alveolarknochenbreiten (AKB) im mittleren Wurzel Drittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 11, 12, 16 (distale Wurzel), 21, 33, 35 und 36 (beide Wurzeln)

So zeigte sich im Endbefund im Oberkiefer bei den beiden mittleren Schneidezähnen 11 und 21 und dem seitlichen Schneidezahn 12 eine Zunahme des peridentalen Knochenangebotes von 0,8 bis 0,9 Millimetern auf 1,1 bis 1,2 Millimeter (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,002$ ,  $p = 0,004$  bzw.  $p = 0,039$ ). Bei der distalen Wurzel des Zahnes 16 konnte im Therapieverlauf eine Reduktion der Knochenstärke von 2,1 auf 1,8 Millimeter festgestellt werden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,011$ ).

Im Unterkiefer zeigten alle signifikanten Zähne eine Reduktion des peridentalen Knochenangebotes von rund 0,2 Millimetern: Zahn 33 hatte hierbei mit einer ossären Ausgangsstärke von 0,5 Millimetern im Vergleich zu Zahn 35 mit 1,0 Millimetern und Zahn 36 mit 0,8 Millimetern im Bereich der mesialen Wurzel und 1,1 Millimetern im Bereich der distalen Wurzel den schwächsten Ausgangsbefund (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,011$ ,  $p = 0,031$  und  $p = 0,016$  bzw.  $p = 0,025$ ).

### **Alveolarfortsatz, unteres Wurzel Drittel**

Im unteren Wurzel Drittel zeigte sich oral, abgesehen von den mesialen und distalen Wurzeln der ersten Molaren, im Mittel eine tendenzielle Abnahme der Knochenstärke, mit dem stärksten Ausmaß im Frontzahnbereich. Tabelle 47 zeigt in der Übersicht Ausgangs- und Endbefunde der einzelnen Zahngruppen sowie die mittlere Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Behandlungszeitraum:

Tab. 47: Zahnartbezogener Unterschied der Knochenbreiten, oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangs- untersuchung	End- untersuchung	Veränderung	
mittlerer Inzisivus	n = 144	3,11	2,67	-0,44	
seitlicher Inzisivus	n = 144	2,8	2,48	-0,32	
Caninus	n = 144	3,87	3,67	-0,21	
erster Prämolare	n = 144	3,47	3,44	-0,03	
zweiter Prämolare	n = 144	3,89	3,82	-0,07	
Molar	n = 358	m/v	5,53	5,67	0,14
		p	1,45	1,29	-0,16
		d	6,56	6,66	0,10

Die Veränderung zeigte hierbei bei den beiden mittleren oberen Schneidezähnen, Zahn 11 und 21 sowie an Zahn 13 eine signifikante Tendenz (vgl. Abb. 47):

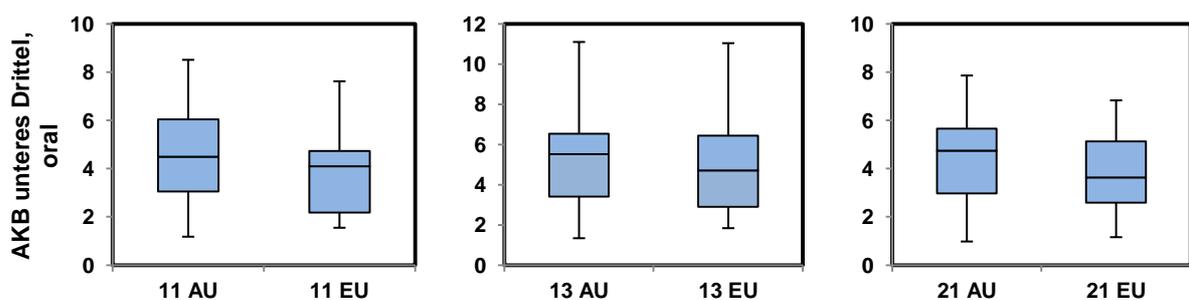


Abb. 47: Orale Alveolarknochenbreiten (AKB) im unteren Wurzel Drittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 11, 13 und 21

Hierbei konnte bei Zahn 11 eine Reduktion der Knochenstärke um 0,8 auf 3,9 Millimeter festgestellt werden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,043$ ). Im Bereich des zweiten oberen mittleren Schneidezahnes 21 war das Ausmaß mit 0,9 Millimetern von 4,6 Millimetern auf 3,7 Millimeter etwas stärker ausgeprägt (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,025$ ). Im unteren oralen Wurzel Drittel des Zahnes 13 reduzierte sich das peridentale Knochenangebot bei den untersuchten Zähnen ebenfalls wie bei Zahn 11 im Mittel um 0,8 Millimeter und zeigte einen Endbefund von rund 4,8 Millimetern (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,039$ ).

Vestibulär zeigte sich im Bereich der Molaren die stärkste Veränderung zwischen Anfangs- und Endbefund. So konnte an den mesialen Wurzeln eine allgemeine Minderung von 0,13 Millimetern und an den distalen Wurzeln der Molaren eine allgemeine Reduktion von 0,47 Millimetern festgestellt werden, während an den palatinalen Wurzeln der

Oberkiefermolaren eine Verbesserung der knöchernen Situation von rund 0,61 Millimetern erfolgte.

Im Bereich der mittleren Schneidezähne resultierte eine Zunahme der ossären Strukturen von rund 0,15 Millimetern, und auch die seitlichen Schneidezähne zeigten mit 0,22 Millimetern ähnliche Tendenzen. Eckzähne und Prämolaren blieben im Therapieverlauf bezüglich des peridental Knochenangebotes mit +/-0,01 bis 0,05 annähernd unverändert (vgl. Tab. 48).

Tab. 48: Zahnartbezogener Unterschied der Knochenbreiten, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangsuntersuchung	Enduntersuchung	Veränderung	
mittlerer Inzisivus	n = 144	1,06	1,21	0,15	
seitlicher Inzisivus	n = 144	0,86	1,09	0,22	
Caninus	n = 144	0,96	0,99	0,02	
erster Prämolare	n = 144	1,07	1,07	-0,01	
zweiter Prämolare	n = 144	1,8	1,75	-0,05	
Molar	n = 360	m/v	1,6	1,48	-0,13
		p	7,94	8,55	0,61
		d	2,86	2,39	-0,47

Für die Zähne 11, 21, 25 und die distale Wurzel des Zahnes 16 war hierbei die Veränderung innerhalb des Therapiezeitraums signifikant (vgl. Abb. 48).

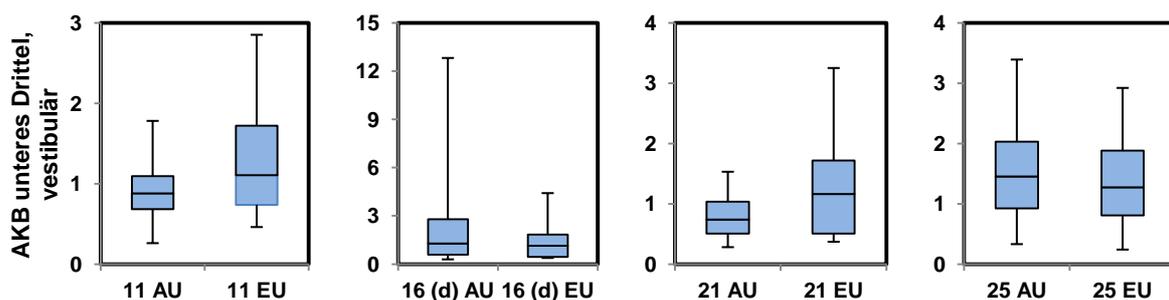


Abb. 48: Vestibuläre Alveolarknochenbreiten (AKB) im unteren Wurzel Drittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 11, 16 (distale Wurzel), 21 und 25

Während bei den mittleren oberen Schneidezähnen oral eine Abnahme der Knochenbreite zu verzeichnen war, zeigte sich hier eine Zunahme des vestibulären Knochens von rund 0,4 Millimetern und ergab im Endbefund für Zahn 11 eine Stärke von 1,3 Millimetern und für Zahn 21 von 1,2 Millimetern (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,016$  bzw.  $p = 0,031$ ).

Im Bereich der distalen Wurzel des rechten ersten Molaren fiel eine verhältnismäßig starke Reduktion des peridentalen Knochenangebotes um 1,1 auf 1,4 Millimeter auf (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,008$ ). Zahn 25 zeigte daher mit rund 0,1 Millimetern Abnahme eine weit geringere Veränderung um 1,5 auf 1,4 Millimeter Knochenstärke (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,038$ ).

### Alveolarfortsatz, apikal

Im oralen apikalen Wurzeldrittel zeigten die untersuchten Zähne abgesehen von den ersten Molaren die größte Veränderung. So konnte im Frontzahnggebiet im Mittel eine Reduktion der Knochendicke um 0,36 bis 0,47 Millimeter festgestellt werden. Auch die Eckzähne und Prämolaren wiesen mit einer Abnahme von 0,4 bis 0,63 Millimetern eine verhältnismäßig starke Veränderung des peridentalen Knochenangebotes auf. Tabelle 49 zeigt in der Übersicht Ausgangs- und Endbefunde der einzelnen Zahngruppen sowie die mittlere Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Behandlungszeitraum:

Tab. 49: Zahnartbezogener Unterschied der Knochenbreiten, oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangs- untersuchung	End- untersuchung	Veränderung	
mittlerer Inzisivus	n = 144	6,32	5,85	-0,47	
seitlicher Inzisivus	n = 144	5,85	5,49	-0,36	
Caninus	n = 144	8,64	8,24	-0,4	
erster Prämolare	n = 144	6,44	5,99	-0,45	
zweiter Prämolare	n = 144	6,29	5,66	-0,63	
Molar	n = 360	m/v	6,12	6,1	-0,02
		p	3,08	2,75	-0,33
		d	5,73	5,77	0,04

Signifikante Korrelationen bezüglich der zahnartbezogenen Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Therapiezeitraum ergaben die Zähne 11, 14, 24, 35 und 44 (vgl. Abb. 49).

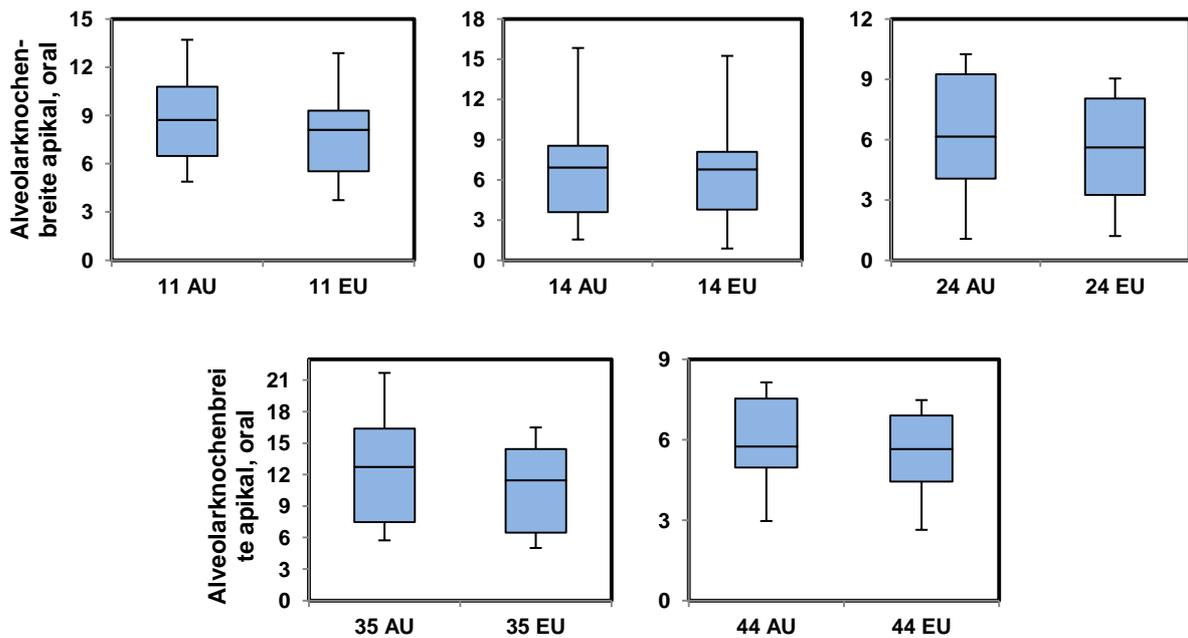


Abb. 49: Orale Alveolarknochenbreiten, apikal, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 11, 14, 24, 35 und 44

Das orale Knochenangebot im apikalen Wurzeldrittel des zentralen mittleren Schneidezahnes 11 zeigte hierbei im Therapieverlauf eine Abnahme von rund einem Millimeter, Gleiches konnte bei Zahn 24 beobachtet werden (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,019$  bzw.  $p = 0,025$ ). Der erste Prämolare der Gegenseite, Zahn 14, hingegen wies mit 0,4 Millimetern verminderter Knochenstärke eine weniger starke Reduktion auf (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,016$ ).

Im Unterkiefer konnte an Zahn 35 dem Endbefund von 4,8 Millimetern eine Ausgangsstärke von 5,5 Millimetern gegenübergestellt werden, und auch an Zahn 44 zeigte sich mit 0,4 Millimetern eine Reduktion der ossären Strukturen (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,048$  bzw.  $0,031$ ).

Vestibulär zeigte sich im Vergleich zum oralen Untersuchungsbereich ein weniger einheitliches Bild. Mit  $\pm 0,15$  Millimetern Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Therapiezeitraum konnte, abgesehen von der palatinalen Wurzel der ersten Molaren im Oberkiefer, auch ein weitaus geringeres Ausmaß diagnostiziert werden (vgl. Tab. 50).

Tab. 50: Zahnartbezogener Unterschied der Knochenbreiten, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)

Zahnart	N	Ausgangs- untersuchung	End- untersuchung	Veränderung
mittlerer Inzisivus	n = 144	3,61	3,79	0,18
seitlicher Inzisivus	n = 144	3,55	3,63	0,08
Caninus	n = 144	3,6	3,48	-0,12
erster Prämolare	n = 144	2,88	2,99	0,1
zweiter Prämolare	n = 144	3,71	3,87	0,16
Molar m/v	n = 360	3,93	4,07	0,13
p		5,79	4,92	-0,88
d		4,39	4,54	0,15

Bei der Vermessung des peridentalen Knochenangebotes im apikalen Wurzel Drittel und der anschließenden statistischen Analyse zeigten hier nur die Zähne 11 und 34 eine signifikante Korrelation bezüglich der Zahnart (vgl. Abb. 50).

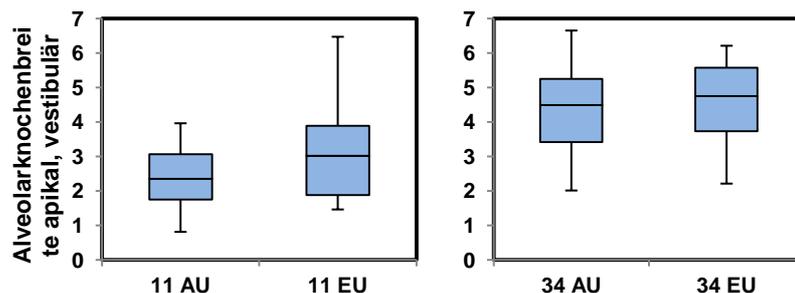


Abb. 50: Vestibuläre Alveolar Knochenbreiten, apikal, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, *signifikante* Zähne 11 und 34

Beide Untersuchungsgebiete wiesen hierbei eine Stabilisierung der knöchernen Verankerung auf. Während bei Zahn 11 eine Zunahme von rund 0,7 Millimetern auf 3,1 Millimeter festzustellen war, verbesserte sich das peridentale Knochenangebot des Zahnes 34 von 4,4 auf 4,6 Millimeter Knochenstärke im vestibulären Wurzelspitzenbereich (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,022$  bzw.  $p = 0,013$ ).

Aufgrund der Tatsache, dass in allen Untersuchungsgebieten vereinzelt signifikante Korrelationen ermittelt werden konnten, kann die Hypothese „Die durch die Therapie mit Invisalign® bedingten Veränderungen des peridentalen Knochenangebotes weisen keine Abhängigkeit von der Zahnart auf“ nicht bestätigt werden.

## 4.7 Abhängigkeit von der Zahnangulation

Insgesamt konnten im Behandlungsverlauf der 18 Patienten 1 080 Angulationswinkel vermessen werden. Bei einer Standardabweichung von 7,38° bzw. 6,19° lag der Winkel der Zahnachse zur Okklusionsebene im Mittel bei 84,4° bis 112,6° im Ausgangsbefund und 87,3° bis 110,2° im Endbefund.

Tabelle 51 und Abbildung 51 zeigen in der Übersicht die Angulation der einzelnen Zähne eines jeden Quadranten im Behandlungsverlauf:

Tab. 51: Zahnangulationen der Zähne 1 bis 6 eines jeden Quadranten (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in °)

Zahn	1	2	3	4	5	6
Winkel AU	110,72	111,34	106,06	90,40	87,48	87,11
Winkel EU	110,65	111,43	107,21	91,11	90,29	89,10
Differenz	-0,07	0,08	1,15	0,72	2,81	1,99

Während die gemittelte Angulation im Frontzahnggebiet ca. 110° betrug, konnte der Winkel im Seitenzahnbereich mit rund 90° angegeben werden.

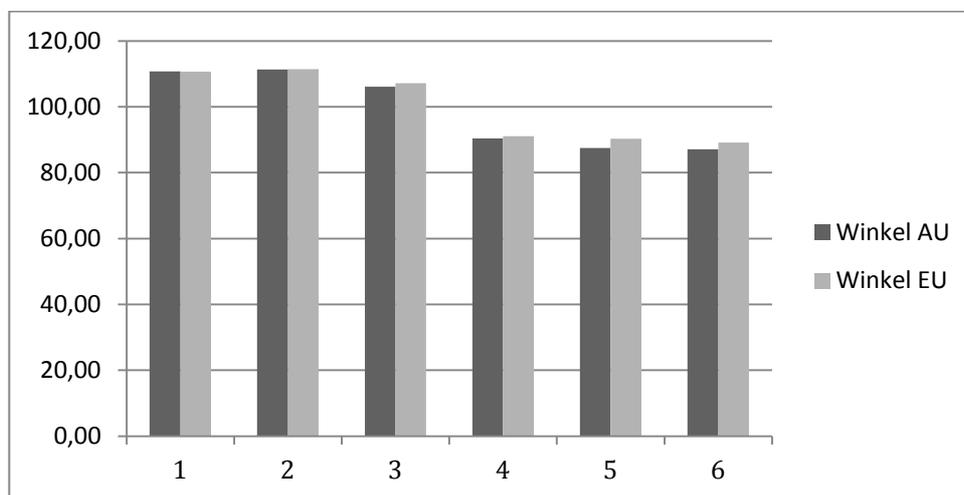


Abb. 51: Gemessene Angulationswinkel der Zähne 1 bis 6 eines jeden Quadranten zum Zeitpunkt der Ausgangsuntersuchung (AU) und Enduntersuchung (EU); Angabe in Grad (°)

Vergleicht man Anfangs- und Endbefund der Patienten, so zeigen die Differenzen der Winkel im hinteren Seitenzahnggebiet mit 2,81° im Bereich der zweiten Prämolaren und 1,99° im Bereich der ersten Molaren die größte Veränderung.

Durch die Berechnung des Spearman-Rho-Koeffizienten zwischen der Differenz der Zahnangulation und der Differenz der Dehiszenzen konnten die vorliegenden Daten im Anschluss auf signifikante Zusammenhänge untersucht werden; diese Prüfung erfolgte für jede Zahnart und jeden Quadranten gesondert, eine Korrelation wurde bei zweiseitigem Niveau von  $r \leq 0,05$  als signifikant bezeichnet.

So konnten bezüglich des oralen Knochenangebotes an den Prämolaren 25 (Spearman-Rho-Koeffizient,  $r = 0,027$ ) und 44 ( $r = 0,023$ ) sowie an der distalen und palatinalen Wurzel des Zahnes 26 ( $r = 0,006$ ) Korrelationen ermittelt werden, die einen signifikanten Zusammenhang vermuten lassen. Vestibulär zeigte Zahn 36 an der mesialen Wurzel ( $r = 0,025$ ) signifikante Tendenzen zwischen dem Ausmaß der therapeutisch bedingten Änderung der Zahnangulation und einer Dehiszenzveränderung (vgl. Abb. 52):

Zahn		25	26	44	36
Dehiszenz	AU	2,16	2,43	2,72	2,18
	EU	2,33	2,51	2,59	2,12
Differenz Dehiszenz EU-AU	<b>Mittelwert</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>-0,13</b>	<b>-0,06</b>
Differenz Angulation EU-AU	Minimum	-5,80	-8,10	-4,50	-19,80
	Maximum	9,40	13,90	10,10	8,40
	<b>Mittelwert</b>	<b>3,52</b>	<b>2,52</b>	<b>0,72</b>	<b>0,35</b>

Abb. 52: Veränderung des Dehiszenz- und Angulationsausmaßes im Therapieverlauf der signifikanten Zähne 25, 26, 44 und 36; Angabe in Millimeter und Grad (°)

Die Zähne 44 und 36 wiesen im Zuge einer Änderung des Angulationwinkels von weniger als einem Grad eine tendenzielle Verringerung des Dehiszenzausmaßes auf. Bei den Zähnen 25 und 26 hingegen konnte bei einer Differenz von 2,52 bzw. 3,52 Grad eine Defektverstärkung beobachtet werden.

Die Hypothese „Das Ausmaß der durch Invisalign® bedingten Dehiszenzen ist unabhängig vom Angulationsausmaß der Zähne“ kann aufgrund der signifikanten Korrelationen der Stichproben nicht uneingeschränkt bestätigt werden.

## 5. Diskussion

### 5.1 Diskussion der Methoden

In der vorliegenden Arbeit wurden retrospektiv an 36 volumentomographischen Datensätzen, welche aus kieferorthopädischer Indikation angefertigt wurden, 864 Zähne von 18 Patienten zu zwei Behandlungszeitpunkten bezüglich des peridental Knochenangebotes vermessen und befundet. Studien zeigen Unterschiede in der Prävalenz dentoalveolärer Defekte abhängig von Zahn- und Kieferfehlstellungen (Weigang 2015, Bollen 2014, Enhos 2012, Evangelista et al. 2010). Um aufgrund der geringen Patientenzahl eine Gewichtung der Befundklasse zu verhindern, beinhaltete jede Altersgruppe einen Patienten aus den Untergruppen *Engstand*, *Weitstand* und *sagittale Anomalie*, ausschlaggebend war hierbei die Einstufung des Behandlungsbedarfs nach der kieferorthopädischen Indikationsgruppe.

Die klinische Indikation der retrospektiven Aufnahmen ließ auf ein aussagekräftiges Datenmaterial schließen, und auch der Ausschluss bestimmter Parameter sicherte die interindividuelle Reproduzierbarkeit. Jedoch ergeben sich aufgrund der Tatsache, dass das der Arbeit zugrunde liegende Datenmaterial nicht an fixierten und präparierten Schädeln, sondern an Patienten gewonnen wurde, gleichzeitig Fehlerquellen, die in die Interpretation der Ergebnisse miteinbezogen werden müssen. So kann der Patient falsch positioniert werden oder sich während der Aufnahme bewegen. Auch fehlerhafte Parameter bei der Geräteeinstellung und Artefakte können die Interpretation und Vermessung bestimmter anatomischer Bereiche erschweren. Um dieser Gefahr Rechnung zu tragen, arbeiten alle Mitarbeiter bei MESANTIS® nach einem streng kontrollierten Protokoll und werden regelmäßig intensiv geschult.

Technische Parameter wie das verwendete Auflösungsprotokoll und die Voxelgröße von 0,25 Millimetern spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung des peridental Knochenangebotes. So besteht bei zu geringer Voxelgröße und abgebildeten Strukturen von weniger als einem Millimeter die Gefahr der Überschätzung von Dehiszenzen und Fenestrationen, ausreichend präzise Ergebnisse bei gleichzeitig geringem Risiko falsch negativer Ergebnisse für Knochenstrukturen ab 0,4 Millimetern wurden mit einer Voxelgröße von 0,25 Millimetern erreicht (Patcas 2012, Schattmann 2011). Die Erkennbarkeitsgrenze filigraner ossärer Strukturen wird bei einer Voxelgröße von 0,3 Millimetern in einer aktuellen Studie mit 0,39 Millimetern Knochendicke ange-

geben; hier erfolgte eine durchschnittlich zu geringe Darstellung der Knochenhöhe um 0,11 bis 0,13 Millimeter (Bessenroth 2015). Daher sollte man bei der Interpretation der gewonnenen Ergebnisse bedenken, dass es sich um eine rein radiologische Beurteilung des peridental Knochenangebotes handelt, ohne anschließende In-vivo-Überprüfung der Defekthöhen und Knochenbreiten. Eine minimale Abweichung der Bezugspunkte in der DVT kann bereits zu Unter- bzw. Überschätzung eines vertikalen Defektes führen, und selbst bei akkurater Messmethodik muss man eine minimale Abweichung zwischen radiologischer und klinischer Situation akzeptieren (Vandenberghe 2008). Mehrere Studien sehen jedoch gerade in der digitalen Volumentomographie ein geeignetes und zuverlässiges Verfahren zur Lokalisation von Hartgewebsstrukturen, welches zeigt, wie viel Knochen für Zahnbewegungen zur Verfügung steht (Bessenroth 2015, Christou 2014, Timock 2011, Lund 2010, Januario 2008, Müssig 2005).

Die Auswertung der DVT-Aufnahmen erfolgte mit der 3D-Imaging-Software *Invivo 5.1.0* (Anatomage Inc., San Jose, Kalifornien) im Institut MESANTIS<sup>®</sup>, Berlin.

Bereits die Vorgängerversion *Invivo 4* zeigt sich in der Literatur als geeignetes Programm, um vestibuläre parodontale Defekte und Zähne zu vermessen (Schattmann 2011, Nguyen et al. 2011). Die in der vorliegenden Arbeit verwendete aktualisierte Version der Anatomage-Software erzielte bei in jüngerer Vergangenheit veröffentlichten Studien ebenfalls reproduzierbare Ergebnisse im Bereich der linearen Abstandsmessung ossärer Strukturen (Jäger 2015, Weigang 2015).

In der vorliegenden Arbeit wurden alle Zähne bezüglich ihrer Zahnlänge, Zahnbreite, Wurzellänge, Wurzelbreite, Knochenbreiten sowie vorliegender Dehiszenzen befundet. Hierfür wurde der zu untersuchende Zahn in allen drei Raumebenen ausgerichtet und vermessen. Bezüglich des peridental Knochenangebotes wurde zum einen das vertikale Knochenangebot vestibulär und oral als lineare Strecke zwischen der Schmelz-Zement-Grenze bzw. dem größten Umfang des Zahnes bis zum zervikalen Knochenrand gemessen, zum anderen die transversale Knochenbreite als lineare Distanz zwischen Parodontalspalt und äußerstem lateralem Knochenrand senkrecht zur Zahnachse ermittelt. Die zu untersuchenden Zähne wurden im *Section-Modus* der Software in allen drei Raumebenen ausgerichtet. Orientierungshilfe gab hierbei das Pulpenkavum der Zähne, welches als zentrale Einheit des Zahnes gesehen wurde. Die Zahnachse wurde in der Sagittal- und Transversalebene im 90°-Winkel zur Horizontalebene ausgerichtet und verlief hierbei durch das Pulpenkavum von der Wurzelspitze zur Inzisalkante im Frontzahnbereich bzw. von der Wurzelspitze zur Zentralfissur im Seitenzahngebiet.

Studien von Weigang, Evangelista et al., Yagci et al., Schattmann et al. und Kim et al. beinhalten eine vergleichbare Zahnausrichtung, letztgenannte erzielten bereits 2009 reproduzierbare Ergebnisse und legten einen nicht signifikanten Fehler der Methodik von  $p \leq 0,05$  dar. Der Bezugspunkt *Schmelz-Zement-Grenze* wird aufgrund seines physiologisch girlandenförmigen Verlaufs in der Literatur teilweise kontrovers diskutiert, erzielte jedoch ebenfalls in oben genannten Studien reproduzierbare Ergebnisse (Weigang 2015, Bessenroth 2015). Des Weiteren offenbarte in vorliegender Studie der Vergleich von Zahnlänge, Wurzellänge und Wurzelbreite im Ausgangs- und Endbefund bereits während der Datenerhebung potenzielle Messungenauigkeiten.

Unter Berücksichtigung der Separation bei Mehrwurzigkeit ergaben sich 1 080 untersuchte Zähne und insgesamt 20 520 erhobene Messwerte. Dieser Aspekt führt zu einem hohen Konfidenzniveau, jedoch sollte man sich bei der Interpretation der Messwerte vor Augen halten, dass die Anzahl der untersuchten Zähne auf eine verhältnismäßig geringe Patientenzahl zurückzuführen ist. Ein Einfluss potenzieller individueller Parameter kann somit trotz gründlicher Recherche zur Auswahl geeigneter Patienten im Vorfeld nicht ausgeschlossen werden.

Als Parameter für das Ausmaß der kieferorthopädischen Bewegung wurde die vestibulo-orale Angulation der Zähne beurteilt. Während sich Angulationsmessungen anderer Studien beispielsweise der Okklusionsebene bedienen (Jäger 2015, Weigang 2015), wurde in vorliegender Arbeit die Frankfurter Horizontale als Bezugsachse zur digitalen Patientenpositionierung gewählt. Diese erreichte bereits ebenfalls unter Verwendung der Anatomage-Software reproduzierbare Ergebnisse (Spangler 2014, Krause 2013) und ändert sich im Zuge der kieferorthopädischen Behandlung im Vergleich zur Okklusionsebene nicht.

## **5.2 Diskussion der Ergebnisse**

### **5.2.1 Individuelle Reproduzierbarkeit von Knochenveränderungen**

Mit Ausnahme des vestibulären mittleren Wurzeldrittels des Zahnes 34 ergaben alle erhobenen Indizes mit einer Zuverlässigkeit von über 99 Prozent eine hervorragende Reliabilität. Mit 96,2 Prozent lag jedoch auch dieser Wert noch über der in der Literatur beschriebenen Zuverlässigkeit für den Bereich der vestibulären Knochendicke (Timock et al. 2011). Auch der Methodenfehler nach Dahlberg zeigte, dass sich die gewählte

Methode eignet, um Knochenbreiten und Dehiszenzen in der DVT reproduzierbar vermessen zu können. Der an der oralen Wurzelspitze des Zahnes 36 von diesem Bild abweichende Wert von  $\delta = 0,114$  könnte sich durch einen zufälligen Messfehler begründen, welcher durch die verhältnismäßig kleine Maßzahl schwerer ins Gewicht fallen könnte. Studien haben ergeben, dass bei Messungen in einem DVT-Datensatz bezüglich der Messgenauigkeit kleinere systemische Fehler zu erwarten sind, die sich jedoch erst im Zuge aufeinanderfolgender Messungen zu einem signifikanten Fehler potenzieren (Jäger 2015). Des Weiteren sollte man bei der Interpretation der Ergebnisse bedenken, dass die Erkennbarkeitsgrenze filigraner ossärer Strukturen begrenzt ist und bei einer Voxelgröße von 0,3 Millimetern ab einer Knochendicke von 0,39 Millimetern mit einer zu geringen Darstellung der Knochenhöhe bzw. -breite gerechnet werden muss (Bessenroth 2015).

### **5.2.2 Ausmaß der therapeutischen Knochenveränderung durch Invisalign®**

Die anfangs aufgestellte Hypothese, dass sich das peridentale Knochenangebot durch Behandlungsmaßnahmen mit Invisalign verändert, konnte im überwiegenden Teil der Untersuchungsbereiche nicht bestätigt werden. Mit Ausnahme der oralen Dehiszenzen änderte sich das peridentale Knochenangebot im Therapiezeitraum nicht signifikant.

In der Literatur findet man Anhaltspunkte dafür, dass Patienten bereits vor Therapiestart peridentale Läsionen aufweisen. Eine Studie an digitalen Volumentomographien ermittelte bei 51 Prozent der untersuchten Zähne Dehiszenzen, wobei 69,43 Prozent dieser erhobenen Knochendefekte auf der vestibulären Zahnseite zu finden waren (Evangelista et al. 2010). Auch Rupprecht beschreibt in seiner Studie an kaukasischen Schädeln eine Prävalenz für Dehiszenzen von rund 40 Prozent (Rupprecht 2001), Nimigean ermittelte diesbezüglich einen leicht höheren Wert von 54 Prozent (Nimigean 2009). In der vorliegenden Studie zeigten im Mittel 59,72 Prozent der Zähne oral und 76,39 Prozent vestibulär im Ausgangsbefund eine erhöhte Distanz über die physiologischen zwei Millimeter zwischen Schmelz-Zement-Grenze und Limbus alveolaris. Die ermittelten Werte liegen somit über der in der Literatur angegebenen Prävalenz, es zeigt sich jedoch ebenfalls ein verstärktes Aufkommen an vertikalen Knochendefekten auf der vestibulären Zahnseite. Dies könnte darin begründet liegen, dass die Definition der Dehiszenz an sich nicht einheitlich gehandhabt wird und keinen kompletten Konsens erfährt. Während sie in vorliegender Arbeit ab einer vertikalen Distanz von der

Schmelz-Zement-Grenze zur crestalen Knochenkante von zwei Millimetern definiert wurde, sehen manche Autoren aufgrund der klinischen Bedeutsamkeit einen Knochendefekt erst ab drei Millimetern als relevant an.

Bezüglich der Veränderung des Dehiszenzausmaßes im Therapiezeitraum zeigten sich zwischen den beiden Behandlungszeitpunkten ausschließlich auf der oralen Zahnseite signifikante Veränderungen (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p = 0,001$  für vestibuläre bzw. mesiale Wurzel,  $p = 0,010$  für distale Wurzel), während im Zuge einer vergleichbaren Studie bei Patienten, die mit festsitzender Multibracket- bzw. Multibandapparaturen therapiert wurden, auf beiden Seiten eine signifikante Verringerung des crestalen Knochens ermittelt wurde (Jäger 2015). Auch die ermittelten horizontalen Knochenbreiten verringerten sich in den Studien von Jäger beidseits signifikant, während in der vorliegenden Arbeit im Therapieverlauf stabile Verhältnisse diagnostiziert werden konnten. Ob sich der ermittelte Unterschied durch die unterschiedliche Behandlungsmethodik begründet, sollte Untersuchungsgegenstand weiterer Studien sein. Des Weiteren sollte man bei der Interpretation der gewonnenen Erkenntnisse bedenken, dass eine Abnahme bzw. Zunahme der Defekthöhe nicht ausschließlich auf die kieferorthopädische Behandlung zurückzuführen sein kann. Neben der biomechanischen Komponente sollten immer auch die bakteriologischen und serologischen Einflussfaktoren beachtet werden, die das peridentale Knochenangebot im Behandlungszeitraum beeinflussen können.

### **5.2.3 Abhängigkeit vom Geschlecht**

Aktuelle Studien kamen zu dem Ergebnis, dass die Prävalenz erhobener Dehiszenzen geschlechterunspezifisch erscheint (Weigang 2015, Jäger 2015, Nahm et al. 2012, Nowzari et al. 2010). Jedoch gibt es auch Anhaltspunkte für eine erhöhte Anzahl von Dehiszenzen bei weiblichen Patienten, während bei den männlichen Patienten ein größeres Ausmaß dieser zu befunden war (Weigang 2015, Springer 2012).

In der vorliegenden Studie zeigte sich ebenfalls, dass bei dem Großteil der untersuchten Zähne im Therapieverlauf keine geschlechterspezifischen Unterschiede bezüglich der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes festzustellen sind. Vereinzelt konnten jedoch signifikante Zusammenhänge ermittelt werden: So zeigte sich bezüglich der oralen Dehiszenzen bei Zahn 41 der weiblichen Patienten eine Verstärkung des Dehiszenzausmaßes, während bei den männlichen Patienten eine Verringerung der

Defekthöhe festzustellen war. Auf der vestibulären Zahnseite konnte insgesamt bei drei Zähnen eine geschlechterspezifische Veränderung des Dehiszenzausmaßes diagnostiziert werden, bei Zahn 42 und der distalen Wurzel des Zahnes 16 erfolgte ebenfalls wie im oralen Untersuchungsbereich eine Abnahme der Defekthöhe bei den männlichen Patienten, während dies an der distalen Wurzel des Zahnes 46 bei den weiblichen Patienten der Fall war.

Bezüglich des Ausmaßes der Defekthöhen konnte sowohl vestibulär als auch oral zu beiden Untersuchungszeitpunkten eine stärkere Defekthöhe bei den männlichen Patienten festgestellt werden, was sich mit den Erkenntnissen der Studie von Weigang deckt. Betrachtet man hingegen die Anzahl der befundeten Dehiszenzen im Geschlechtervergleich, weichen die Untersuchungen von den in der Literatur beschriebenen Erkenntnissen Springers ab und zeigen ein vermehrtes Aufkommen bei den männlichen Patienten.

Bei der Untersuchung der Knochenbreiten zeigte sich im unteren Wurzeldrittel beidseits und im mittleren Wurzeldrittel auf der vestibulären Zahnseite keine Geschlechterspezifität, was sich mit den Beobachtungen von Ferreira deckt, welcher für die vestibuläre Zahnseite keine Geschlechterspezifität bei der Abnahme der Alveolarknochendicke feststellen konnte (Ferreira 2010). Auf der oralen Zahnseite im mittleren Wurzeldrittel und an der Wurzelspitze beidseits zeigten sich hingegen signifikante Tendenzen einzelner Zähne bei der Geschlechterprüfung: Hier ließ sich jedoch kein eindeutiges Muster feststellen. Während im mittleren Wurzeldrittel an einem Zahn ein stärkeres Ausmaß bei den männlichen Patienten festzustellen war, zeigte sich am zweiten signifikant getesteten Zahn ein gegenteiliger Effekt. An der Wurzelspitze war hingegen bei zwei der drei signifikant getesteten Zähne ein stärkerer Verlust in der weiblichen Patientengruppe festzustellen. Dies relativiert sich jedoch durch die Tatsache, dass bei der Betrachtung der geschlechterspezifischen Unterschiede der allgemeinen Veränderung der oralen und vestibulären apikalen Knochenbreiten ein ähnliches Verhältnis an Veränderung unter bzw. über 0,3 Millimeter festzustellen war. Es kann festgehalten werden, dass bei den weiblichen Patienten an acht und bei den männlichen Patienten an drei von 240 Messpunkten ein Knochenverlust diagnostiziert werden konnte. In Anbetracht der Tatsache dass es sich hierbei jedoch um vereinzelte signifikante Korrelationen handelt, sollte dieses Teilergebnis vorerst nicht überbewertet und durch weitere, großflächigere Studien überprüft werden.

## 5.2.4 Abhängigkeit vom Alter

Während die Prävalenz der Rezessionen und Dehiszenzen geschlechterunspezifisch erscheint (Weigang 2015, Nahm et al. 2012, Nowzari et al. 2010), stellt das Patientenalter in der Literatur einen Progressionsfaktor dar (Weigang 2015, Garib 2010, Yoneyma 1988). Bezüglich der befundeten Dehiszenzen kann dieses Bild in der vorliegenden Studie bestätigt werden. Im Ausgangs- und Endbefund stieg die gemessene Defekthöhe mit zunehmendem Patientenalter an und zeigte so in der Teen-Gruppe das geringste Ausmaß zu beiden Behandlungszeitpunkten. Bei der Betrachtung der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes konnten auf der oralen Zahnseite keine signifikanten Korrelationen ermittelt werden. Vestibulär fiel bei den signifikant getesteten Zähnen 24, 41 und 45 hingegen auf, dass der stärkste Knochenverlust im Therapieverlauf bei den jüngsten Patienten festzustellen war, während bei den ältesten Patienten die geringste Zunahme der Defekthöhe zu befunden war.

Während Ferreira 2010 zu dem Ergebnis kam, dass kein Zusammenhang zwischen dem Patientenalter und der Abnahme der bukkalen Alveolarknochendicke besteht (Ferreira 2010), zeigte sich in dieser Studie bei einigen Zähnen eine altersspezifische Signifikanz bei der Veränderung der Knochenbreiten während der Invisalign-Therapie.

Es zeigt sich ein proportionales bzw. umgekehrt proportionales Verhältnis zwischen der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes und dem Patientenalter, wenn auch kein genaues Muster erkennbar wurde, wann ein Knochenzugewinn erfolgte und wann ein Knochenverlust. Die Altersprüfung ergab bei den jüngsten Patienten an 15 und bei den ältesten Patienten an neun von 240 Messpunkten eine signifikante Abnahme des Knochenangebotes. Bis auf eine Ausnahme zeigte die mittlere Patientengruppe der 21- bis 40-Jährigen bei allen signifikant getesteten Zähnen auch ein mittleres Ausmaß der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes im Therapiezeitraum. Jäger beschreibt in seiner Studie bei allen Altersgruppen eine signifikante Abnahme der transversalen Knochenbreiten und beobachtete keinen Knochengewinn. Dieser Knochenverlust war bei den unter 15-jährigen Patienten am stärksten ausgeprägt und verringerte sich im Ausmaß ebenfalls mit zunehmendem Patientenalter proportional (Jäger 2015).

Als Ursache für das größte Ausmaß der Zu- bzw. Abnahme des peridentalen Knochenangebotes in der Invisalign-Teen-Gruppe könnte der im Kinder- und Jugendalter verhältnismäßig stärkere Zellstoffwechsel angenommen werden. So reagiert der Knochen verstärkt auf äußere Einflüsse, welche eine Veränderung des peridentalen Knochenangebotes vermuten lassen könnten.

Der Gedanke, eine mangelnde Mundhygiene als ursächlich zu sehen, liegt gerade bei Betrachtung der pubertierenden jungen Patientengruppe nahe, sollte jedoch verworfen werden, da sich hierdurch nicht der Ausprägungsunterschied zwischen den beiden älteren Patientengruppen begründen lässt. Hier kann eine vergleichbare Handhabung der Zahnhygiene angenommen werden. Auch ein Knochenverlust begünstigender Nikotinabusus könnte diskutiert werden. Hier stellt sich jedoch die Frage, ob im Zeitalter der Aufklärung durch Anti-Tabakkampagnen und großflächigen Nichtraucherenschutz die jüngste Patientengruppe wirklich mehr Raucher beinhalten könnte als die älteren Patientengruppen, welche noch die Zeit miterlebt haben, in der Rauchen überall möglich war und als schick und kontaktfördernd galt. Laut Drogenaffinitätsstudie der BZgA liegt Nichtrauchen bei den Jugendlichen im Trend, der Anteil rauchender Jugendlicher hat sich im letzten Jahrzehnt von 27,5 Prozent (2001) auf 11,7 Prozent (2011) mehr als halbiert (BZgA 2012). Zudem erklärt sich hierdurch der teilweise beobachtbare Knochengewinn nicht.

Es scheint bei der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes während der Invisalign-Therapie eine Abhängigkeit vom Patientenalter zu geben, auch wenn die Zahl der signifikant getesteten Zähne verhältnismäßig gering war. Eventuell wäre dieser Aspekt deutlicher hervorgetreten, wenn die Fallzahl höher gewesen wäre, und sollte Bestandteil weiterer Untersuchungen sein.

### **5.2.5 Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit**

Während im Literaturvergleich Fenestrationsen vor allem im Oberkiefer festgestellt wurden, konnten im Unterkiefer vermehrt Dehiszenzen diagnostiziert werden (Yagci 2012, Lund 2011, Nimigean 2009, Rupprecht 2001). Als prädisponierte Stellen für Dehiszenzen sind hierbei vor allem die Unterkieferfront und der Unterkiefereckzahn zu nennen (Mostafa 2009, Rupprecht 2001), die sowohl vestibulär als auch oral eine generelle Anfälligkeit zeigen, während die Defekte bei den restlichen Zähnen vor allem vestibulär aufzufinden waren (Evangelista 2010). Weigang beschreibt in seiner Studie eine signifikant höhere Prävalenz von Dehiszenzen im Oberkiefer, bei der Unterteilung der Zahnregion zeigt sich dieser Unterschied jedoch ausschließlich im Seitenzahnbereich, während im Frontzahnsegment ebenfalls mehr Dehiszenzen im Unterkiefer zu befunden waren (Weigang 2015). Im Therapieverlauf ermittelte Jäger vestibulär eine signifikant

stärkere Dehiszenzentwicklung im Unterkiefer, auf der oralen Zahnseite zeigte sich hingegen kein kieferbezogener Unterschied (Jäger 2015).

Die in der vorliegenden Studie gewonnenen Ergebnisse verweisen weder vestibulär noch oral auf eine Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit bei der Veränderung des Dehiszenzausmaßes im Therapiezeitraum und decken sich somit zum Teil mit Jägers Ergebnissen. Betrachtet man die gemessenen Distanzen von der Schmelz-Zement-Grenze zur crestalen Knochenkante vor Therapiestart, wird vestibulär ebenfalls ein größeres Ausmaß im Oberkiefer erkennbar, während dies oral im Unterkiefer der Fall war. Bei der Betrachtung der Knochenbreiten hingegen wird im mittleren und unteren Wurzeldrittel eine kieferbezogene Abhängigkeit deutlich: Während hier auf der vestibulären Zahnseite im Oberkiefer eine Zunahme der transversalen Knochenbreiten zu beobachten war, zeigte sich im Unterkiefer eine Abnahme. Oral konnte Gegenteiliges befundet werden; hier nahm die Alveolarknochenbreite im Unterkiefer zu und verringerte sich gleichzeitig im Oberkiefer. Dieser Effekt war mit  $p = 0,003$  bis  $p = 0,016$  deutlich erkennbar. An der Wurzelspitze hingegen ließ sich auf keiner der beiden Untersuchungsseiten eine Abhängigkeit von der Kieferzugehörigkeit feststellen. Diese Veränderung der knöchernen Verhältnisse könnte auf eine therapiebedingte Kippung der Zähne schließen lassen. Da die Zahnbogenexpansion im Unterkiefer limitiert ist, bestimmt dieser den Platzbedarf im Oberkiefer. So könnte im Zuge der Behebung von Engständen und Zahnrotationen durch eine Bukkalkippung der Unterkieferzahnkronen eine Zunahme der oralen Knochensubstanz bei gleichzeitiger vestibulärer Reduktion dieser erfolgen. Um eine maximale Verzahnung zu gewährleisten, müssten die Zahnkronen im Oberkiefer demzufolge eine Oralneigung erfahren, was wiederum die orale Abnahme bzw. vestibuläre Zunahme der transversalen Knochenbreiten begründen könnte. Laut Clincheck sollte bei vier der 18 Patienten keine Zahnbogenexpansion erfolgen, bei den restlichen Patienten war diese als Therapieziel im Clincheck-Behandlungsplan angegeben.

### **5.2.6 Abhängigkeit von der Zahnart**

Als prädisponierte Stellen für Dehiszenzen sind laut Literaturvergleich vor allem die Unterkieferfront und der Unterkiefereckzahn zu nennen. Diese zeigen sowohl vestibulär als auch oral eine generelle Anfälligkeit, während die Defekte bei den restlichen Zähnen vor allem vestibulär aufzufinden sind (Enhos et al. 2012, Yagci 2011, Evangelista 2010,

Mostafa 2009, Rupprecht 2001). Auch der posteriore Seitenzahnbereich weist vermehrt vertikale Knochendefekte auf (Weigang 2015, Jäger 2015, Evangelista 2010). In vorliegender Studie zeigten die Frontzähne im Ober- und Unterkiefer vestibulär eine stärkere Defektausprägung als oral, im Seitenzahnbereich konnten abgesehen von den zweiten Prämolaren allgemein starke Ausgangsbefunde ermittelt werden.

Im Therapieverlauf zeigte sich in der Studie von Jäger im vestibulären Unterkieferfrontzahnbereich ein durchschnittlicher vertikaler Knochenverlust von rund 1,16 Millimetern. In der vorliegenden Studie konnte diesbezüglich lediglich ein Unterschied von 0,12 Millimetern diagnostiziert werden, der im Prüfverfahren der einzelnen Zahnarten keine Signifikanz zeigte. Bezüglich der oralen und vestibulären Dehiszenzen zeigten hier die Zähne 11, 13 und 45 eine deutliche Veränderung des peridental Knochenangebotes im Therapieverlauf, vestibulär konnte dieser an 35 und der distalen Wurzel des Zahnes 16 ermittelt werden.

Bezüglich der Vermessung von Knochenbreiten ist die Studienlage im Allgemeinen weniger aussagekräftig. Jäger, Garib et al. und Ferreira ermittelten prä- und posttherapeutisch breitere Knochenbreiten auf den oralen Zahnseiten (Jäger 2015, Garib et al., Ferreira 2010) – dieser Effekt zeigte sich in vorliegender Studie ebenfalls.

Bei der Untersuchung der Veränderung des peridental Knochenangebotes im Therapiezeitraum konnte Jäger vor allem bei den Prämolaren und Molaren eine deutliche Reduzierung des Knochens ermitteln. 54,5 Prozent der ermittelten 33 signifikanten Korrelationen im Bereich der Dehiszenzen und Knochenbreiten des mittleren, unteren und apikalen Wurzeldrittels konnten in vorliegender Studie ebenfalls im Seitenzahnbereich des Ober- und Unterkiefers ermittelt werden. Jedoch fallen auch 30 Prozent dieser Signifikanzen auf die oberen mittleren Schneidezähne; dieses Ergebnis steht somit in keinem direkten Zusammenhang zu den Ergebnissen von Jäger, der für die zentralen Frontzähne des Oberkiefers nur gemäßigte therapiebedingte Änderungen feststellen konnte. Betrachtet man die Veränderungen der Knochenbreiten im Therapiezeitraum, so fällt auf, dass das orale Knochenangebot der zentralen Inzisivi im Zuge der Invisalign-Behandlung auf allen Testebenen kleiner und die vestibuläre Alveolarknochenbreite im Gegenzug größer wurde. Dies könnte auf eine therapiebedingte Retrusion der Frontzähne schließen lassen, in deren Rahmen sich die Knochenverhältnisse aufgrund der körperlichen Bewegung im beschriebenen Ausmaß geändert haben könnten.

### 5.2.7 Abhängigkeit von der Zahnangulation

Nimigean et al. kamen in ihren Studien zu dem Erkenntnis, dass eine Angulationsänderung Einfluss auf die parodontale Struktur habe. So zeigten Zähne, welche eine Änderung der bukkolingualen Neigung aufwiesen, verstärkt Dehiszenzen oder Fenestrationen (Nimigean et al. 2009). Weigang konnte diesbezüglich keinen Zusammenhang ermitteln, seine Prüfverfahren ließen auf keine Abhängigkeit des peridentalen Knochenangebotes von der Zahnangulation schließen (Weigang 2015). Auch Jäger konnte aufgrund einer verhältnismäßig hohen Streuung auf keine eindeutige Tendenz der Zahnkipfung im Zuge einer Neigungsänderung nach oral schließen (Jäger 2015). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stellen eine Schnittstelle der ermittelten Datenlage dar. So konnte eine verallgemeinernde Wechselwirkung zwischen der Veränderung des peridentalen Knochenangebotes und der Angulationsänderung ausgeschlossen werden; es zeigten sich jedoch vereinzelt Signifikanzen, die eine tendenzielle Abhängigkeit vermuten lassen. Im oralen Untersuchungsbereich der Zähne 25, 44 sowie der distalen und palatinalen Wurzel des Zahnes 26 konnte zu Untersuchungsbeginn eine höhere bukkolinguale Neigung im Bezug zur Frankfurter Horizontalen als nach der Invisalign-Behandlung festgestellt werden. Während hier eine Neigungsminderung von  $-4,50^\circ$  bis  $-8,10^\circ$  erfolgte, zeigte sich dieser Effekt bei dem auf der vestibulären Untersuchungsseite signifikant getesteten Zahn 36 mit durchschnittlich  $-19,8^\circ$  verhältnismäßig stark. Zwar war diese Wechselbeziehung signifikant, jedoch wies dieser Zahn im Vergleich zu den anderen Zähnen, welche oral eine positive Korrelation der beide Parameter zeigten, keinen erhöhten Knochenabbau bzw. -zugewinn auf. Die allgemeine mittlere prätherapeutische Inklination der Zähne lag mit  $98,85^\circ \pm 12,45^\circ$  deutlich über den in Vergleichsstudien von Jäger und Weigang angegebenen Mittelwerten von rund  $80,49^\circ \pm 15,45^\circ$  und kann sich durch die unterschiedlichen Bezugsebenen im Messverfahren begründen. Aufgrund der Tatsache, dass die Okklusionsebene im Zuge kieferorthopädischer Intervention eine Änderung erfahren kann, wurde in vorliegender Studie die Frankfurter Horizontale zur virtuellen Patientenpositionierung gewählt. Diese erreichte bereits ebenfalls unter Verwendung der Anatomage-Software reproduzierbare Ergebnisse (Spangler 2014, Krause 2013) und ändert sich im Zuge der kieferorthopädischen Behandlung im Vergleich zur Okklusionsebene nicht. Eventuell wären bei identischem Messaufbau vergleichbarere Werte erzielt worden.

### 5.3 Schlussfolgerungen

Bei Berücksichtigung spezifischer Einstellparameter stellt die digitale Volumentomographie ein geeignetes Verfahren dar, um peridentale Knochenbreiten und Dehiszenzen individuell und reproduzierbar zu vermessen.

Im Therapiezeitraum verstärkten sich die Mittelwerte der oralen Dehiszenzen von 2,38 Millimeter auf 2,42 Millimeter signifikant, dahingegen zeigte sich keine eindeutige Veränderung der vestibulären Dehiszenzen und der Knochenbreiten. Pauschale Aussagen über Einfluss von Geschlecht und Alter können in Anbetracht der vereinzelt signifikanten Ergebnisse nicht eindeutig getroffen werden. Es zeigte sich keine allgemein gültige Regelmäßigkeit, wann ein Knochenverlust und wann ein -zugewinn zu erwarten ist. Die Kieferzugehörigkeit der Zähne stellt hingegen eine greifbare Einflussgröße dar und sollte bei kritischen Platzverhältnissen im Zuge der Therapieplanung berücksichtigt werden.

Die ermittelten signifikanten Unterschiede zwischen Ausgangs- und Endbefund fielen im Allgemeinen relativ gering aus. Während diese Ergebnisse eine statistische Relevanz besitzen, kann dies auf die klinische Situation nicht uneingeschränkt übertragen werden. Ein Unterschied des Dehiszenzausmaßes von weniger als einem halben Millimeter und eine Angulationsveränderung unter drei Grad fallen unter die klinische Nachweisgrenze.

Nach den vorliegenden Untersuchungen ist im Zuge der Invisalign<sup>®</sup>-Therapie lediglich an oralen Flächen mit einer signifikanten Zunahme des Dehiszenzausmaßes zu rechnen. Der Therapieansatz scheint im restlichen Untersuchungsbereich keine negativen Auswirkungen auf das peridentale Knochenangebot zu haben. Der Nachweis, inwieweit diese Ergebnisse auch fünf Jahre nach der Therapie noch bestätigt werden können, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Der Literaturvergleich zeigt jedoch bereits an dieser Stelle, dass bei konventioneller Behandlungsmethodik von einer deutlicheren Reduktion des horizontalen und vertikalen Knochenangebotes ausgegangen werden muss. So kann die Schientherapie gerade bei kritischen Knochenverhältnissen und parodontologischen Risikopatienten eine wertvolle Behandlungsmethodik darstellen. Ungeachtet dieser vielversprechenden Tendenzen sollten weitere Studien folgen, um die vorliegenden Ergebnisse eingehender zu verifizieren.

## 6. Literaturverzeichnis

- 1 Al Bourney M. Verwendung des Fernröntgenseitenbildes des Kopfes und des Orthopantogramms zur metrischen Analyse des Schädels in der Kieferorthopädie. Eine vergleichende Studie. Dissertation, Poliklinik für Kieferorthopädie, Justus-Liebig-Universität Gießen, 1999.
- 2 Arai Y, Tammisalo E, Iwai K, Hashimoto K, Shinoda K. Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofac Radiol* 1999; 28(4): 245–8.
- 3 Bai YX , Yang B, Dai Q, Tian J, Qi P, Wang BK. Patients with anterior spaces caused by periodontal disease treated with aligner technique. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*, 2009, 44(7): 421–424.
- 4 Bernimoulin JP, Curilovic Z. Gingival recession and tooth mobility. *J Clin Periodontol* 1977; 4: 107–14.
- 5 Bessenroth M. Einfluss klinischer und bildgebender Parameter auf die Genauigkeit der Darstellung knöcherner parodontaler Strukturen in der digitalen Volumentomographie. Dissertation. Charité-Universitätsmedizin Berlin. 2015.
- 6 Bollen AM. Malokklusion, kieferorthopädische Behandlung und parodontale Gesundheit. *Kieferorthopädische Nachrichten, Wissenschaft und Praxis*, 2014(3): 11–12.
- 7 Brachwitz J, Miethke RR. Die Entwicklungsgeschichte von Align Technology. *Quintessenz Online Select, Kieferorthopädie Sonderheft Invisalign 2001*, 2001: 55–56.
- 8 Bremke M, Sesterhenn AM, Murthum T, Al Hail A, Bien S, Werner JA. Digital volume tomography (DVT) as a diagnostic modality of the anterior skull base. *Acta Otolaryngol*. 2009 Oct; 129(10): 1106–14.
- 9 Buddecke E. *Biochemische Grundlagen der Zahnmedizin*. Berlin, Germany: De Gruyter, 1981: 74–75.
- 10 Bumann A. Es muss nicht immer hochauflösend sein. *Zahnärztlicher Fach-Verlag GmbH*. 2014 (accessed August 22, 2014, at <http://www.dzw.de/artikel/es-muss-nicht-immer-hochaufloesend-sein>).
- 11 Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung. *Die Drogenaffinität Jugendlicher in der Bundesrepublik Deutschland 2011, der Konsum von Alkohol, Tabak und illegalen Drogen: aktuelle Verbreitung und Trends*. Köln, 2012: Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung.
- 12 Çağlayan F, Tozoğlu U. Incidental findings in the maxillofacial region detected by cone beam CT. *Diagn Interv Radiol*. 2012 Mar-Apr; 18(2): 159–63.
- 13 Cattaneo PM, Treccani M, Carlsson K, Thorgeirsson T, Myrda A, Cevitanes LH, Melsen B. Transversal maxillary dento-alveolar changes in patients treated with active and passive self-ligating brackets: a randomized clinical trial using CBCT-scans and digital models. *Orthod Craniofac Res*. 2011 Nov; 14(4): 222–33.
- 14 Celenk M, Farrell ML, Eren H, Kumar K, Singh GD, Lozanoff S. Upper airway detection and visualization from cone beam image slices. *J Xray Sci Technol*. 2010; 18(2): 121–35.

- 15 Christou T, Kau CH, Abou-Kheir NS, Louis PJ. The use of three-dimensional evaluation in the management of a complex patient with mandibular fracture: a 5-year evaluation. *J Craniofac Surg*. 2014; 25(3): e223–8.
- 16 Cohnen M. *Kopf-Hals-Radiologie*. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag 2012: 289–294.
- 17 Corbridge JK, Campbell PM, Taylor R, Ceen RF, Buschang PH. Transverse dentoalveolar changes after slow maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2011; 140(3): 317–25.
- 18 Davies J, Johnson B, Drage N. Effective doses from cone beam CT investigation of the jaws. *Dentomaxillofac Radiol*. 2012 Jan; 41(1): 30–6.
- 19 Dierckx D, Saldarriaga Vargas C, Rogge F, Lichtherte S, Struelens L. Dosimetric analysis of the use of CBCT in diagnostic radiology: sinus and middle ear. *Radiat Prot Dosimetry*. 2015 Jan; 163(1): 125–32.
- 20 Domann CE, Kau CH, English JD, Xia JJ, Souccar NM, Lee RP. Cone beam computed tomography analysis of dentoalveolar changes immediately after maxillary expansion. *Orthodontics (Chic.)*. 2011 Fall; 12(3): 202–9.
- 21 Düker J. *Röntgendiagnostik mit der Panoramaschichtaufnahme*. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag 2000: 1–10.
- 22 Eickholz P. *Röntgendiagnostik in der Parodontologie*, Quintessenz Parodontologie 7. 1996(1): 7.
- 23 Enhos S, Uysal T, Yagci A, Veli İ, Ucar FI, Ozer T. Dehiscence and fenestration in patients with different vertical growth patterns assessed with cone-beam computed tomography. *Angle Orthod*. 2012; 82(5): 868–74.
- 24 Evangelista K, Vasconcelos Kde F, Bumann A, Hirsch E, Nitka M, Silva MA. Dehiscence and fenestration in patients with Class I and Class II Division 1 malocclusion assessed with cone-beam computed tomography. *American Journal of Orthodontics*, 2010. 138: 133.e1–133.e7.
- 25 Farmann AG. ALARA still applies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2005 Oct; 100(4): 395–7.
- 26 Ferreira M. Avaliação da espessura das tábuas ósseas alveolar vestibular e lingual dos maxilares, por meioda Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico, 2010: 1–168.
- 27 Foushee DG, Moriarty JD, Simpson DM. Effects of mandibular orthognathic treatment on mucogingival tissues. *J Periodontol* 1985; 56(12): 727–33.
- 28 Frongia G, Castroflorio T. Correction of severe tooth rotations using clear aligners: a case report. *Australian Orthodontic Journal*, 2012 (28): 15–19.
- 29 Fuhrmann R. Three-dimensional interpretation of alveolar bone dehiscences. An anatomical-radiological study-Part I. *J Orofac Orthop*. 1996 Apr; 57(2): 62–74.
- 30 Galgali SR, Gontiya G. Evaluation of an innovative radiographic technique – parallel profile radiography – to determine the dimensions of dentogingival unit. *Indian Journal of Dental Research*, 2011; 22: 237–241.

- 31 Gängler P, Hoffmann T, Willershäusen B, Schwenzer N, Ehrenfeld M. Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie. 3rd ed. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, 2010: 47–56.
- 32 Garib DG, Yatabe MS, Ozawa TO, Filho OG da Silva. Alveolar bone morphology under the perspective of the computed tomography: Defining the biological limits of tooth movement. *Dental Press J Orthod.* 2010; 15(5): 192–205.
- 33 Gibbs SJ. Effective dose equivalent and effective dose: comparison for common projections in oral and maxillofacial radiology. *Oral surgery oral medicine oral pathology oral radiology and endodontics.* 2000; 90(4): 538–545.
- 34 Gomes-Filho IS, Sarmiento VA, de Castro MS, da Costa NP, da Cruz SS, Trindade SC, de Freitas CO, de Santana Passos J. Radiographic features of periodontal bone defects: evaluation of digitized images. *Dentomaxillofac Radiol* 2007; 36(5): 256–62.
- 35 Gomolka K. Nebenbefunde im Sinus maxillaris im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlungsplanung – eine retrospektive Transversalstudie anhand von dentalen Volumentomographien. Dissertation, Charité-Universitätsmedizin Berlin. 2013.
- 36 Göz G. Stellungnahme der DGKFO zur Behandlung mit Alignern (accessed January, 2010 at [http://www.dgkfo-vorstand.de/fileadmin/redaktion/\\_stellungnahmen/\\_Stellungnahme\\_Aligner.pdf](http://www.dgkfo-vorstand.de/fileadmin/redaktion/_stellungnahmen/_Stellungnahme_Aligner.pdf)).
- 37 Grünheid T, Kolbeck Schieck JR, Pliska BT, Ahmad M, Larson BE. Dosimetry of a cone-beam computed tomography machine compared with a digital x-ray machine in orthodontic imaging. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2012 Apr; 141(4): 436–43.
- 38 Harzer W. Kieferorthopädie. Stuttgart, Germany. Georg Thieme Verlag, 2011: 3–153.
- 39 Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 5th ed. Köln, Germany: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009: 435.
- 40 Hickey BM, Schoch EA, Bigeard L, Musset AM. Complications following oral piercing. A study among 201 young adults in Strasbourg, France. *Community Dent Health* 2010; 27(1): 35–40.
- 41 Hirsch E, Wolf U, Heinicke F, Silva MA. Dosimetry of the cone beam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3D Accuitomo in different fields of view. *Dentomaxillofac Radiol.* 2008 Jul; 37(5): 268–73.
- 42 Hirschfelder U. Radiologische 3D-Diagnostik in der Kieferorthopädie (CT/DVT). Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kieferorthopädie (DGKFO), 2008 (accessed October, 2008 at [http://www.dgkfo-vorstand.de/fileadmin/redaktion/stellungnahmen/\\_Stellungnahme\\_Hirschfelder\\_DVT.pdf](http://www.dgkfo-vorstand.de/fileadmin/redaktion/stellungnahmen/_Stellungnahme_Hirschfelder_DVT.pdf)).
- 43 Hsu JT, Chang HW, Huang HL, Yu JH, Li YF, Tu MG. Bone density changes around teeth during orthodontic treatment. *Clin Oral Investig.* 2011; 15(4): 511–9.
- 44 Ito K, Gomi Y, Sato S, Arai Y, Shinoda K. Clinical application of a new compact CT-system to assess 3-D images for the preoperative treatment planning of implants in the posterior mandible. A case report. *Clinical Oral Implants Research* 2001; 12: 539–542.

- 45 Jäger F. Veränderung des peridentalen Knochenangebotes in dreidimensionalen Röntgenbildern während einer festsitzenden Kieferorthopädischen Behandlung. Dissertation. Charité-Universitätsmedizin Berlin. 2015.
- 46 Januário AL, Barriviera M, Duarte WR. Soft tissue cone-beam computed tomography: a novel method for the measurement of gingival tissue and the dimensions of the dentogingival unit. *J Esthet Restor Dent.* 2008; 20(6): 366–373.
- 47 Jin SH, Park JB, Kim N, Park S, Kim KJ, Kim Y, Kook YA, Ko Y. The thickness of alveolar bone at the maxillary canine and premolar teeth in normal occlusion. *J Periodontal Implant Sci.* 2012; 42(5): 173–8.
- 48 Kahl-Nieke B. Einführung in die Kieferorthopädie: Diagnostik, Behandlungsplanung, Therapie. Köln, Germany. Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009: 84–91.
- 49 Källestål C, Uhlin S. Buccal attachment loss in Swedish adolescents. *J Clin Peridontol* 1992; 19(7): 485–91.
- 50 KaVo 3D eXam Bedienungsanleitung. KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland, 2009.
- 51 Khocht A, Simon G, Person P, Denepitiya JL. Gingival recession in relation to history of hard toothbrush use. *J Periodontol* 1993; 64(9): 900–5.
- 52 Kiefer H, Lambrecht JT, Roth J. Dose exposure from analog and digital full mouth radiography and panoramic radiography. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 2004; 114(7): 687–93.
- 53 Kiefer H, Lambrecht JT, Roth J. Dose exposure from analog and digital full mouth radiography and panoramic radiography. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 2004; 114(7): 687–93.
- 54 Kim Y, Park JU, Kook YA. Alveolar bone loss around incisors in surgical skeletal Class III patients. *Angle Orthod* 2009; 79(4): 676–82.
- 55 Krause J. Untersuchungen zum erforderlichen Field of View für die bildgebende 3D-Diagnostik in der Zahnmedizin. Dissertation. Charité-Universitätsmedizin Berlin. 2013.
- 56 Kruse BA. Digitale Volumetomographie in der Diagnostik von periimplantären Knochendefekten. In-vitro Studie an Schweinekiefern. Dissertation. Philipps-Universität Marburg, 2008.
- 57 Lagos ML, Sant'ana AC, Gregghi SL, Passanezi E. Keratinized Gingiva Determines a Homeostatic Behavior of Gingival Sulcus through Transudation of Gingival Crevice Fluid. *International Journal of Dentistry* 2011 (published online, 2011, doi: 10.1155/2011/953135).
- 58 Lee KM, Kim YI, Park SB, Son WS. Alveolar bone loss around lower incisors during surgical orthodontic treatment in mandibular prognathism. *Angle Orthod.* 2012 Jul; 82(4): 637–44.
- 59 Löst C. Depth of alveolar bone dehiscences in relation to gingival recessions. *J Clin Periodontol* 1984; 11(9): 583–9.
- 60 Loubele M, Bogaerts R, Van Dijck E, Pauwels R, Vanheusden S, Suetens P, Marchal G, Sanderink G, Jacobs R. Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *Eur J Radiol.* 2009; 71(3): 461–8.

- 61 Ludlow JB, Ivanovic M. Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2008 Jul; 106(1): 106–14.
- 62 Ludlow JB, Walker C. Assessment of phantom dosimetry and image quality of i-CAT FLX cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013 Dec; 144(6): 802–17.
- 63 Lüllmann-Rauch R, Paulsen F. *Taschenlehrbuch Histologie.* 4th ed. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, 2012: 383–385.
- 64 Lund H, Gröndahl K, Gröndahl HG. Cone beam computed tomography for assessment of root length and marginal bone level during orthodontic treatment. *Angle Orthod.* 2010.
- 65 Lund H. Cone beam computed tomography in evaluations of some side effects of orthodontic treatment. *Swed Dent J Suppl.* 2011; (219): 4–78.
- 66 Ma ZG, Fan LF, Fang B. The role of CBCT in evaluation of alveolar bone state during orthodontic-periodontal treatment. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue.* 2010; 19(2): 113–7.
- 67 Machado GL. CBCT imaging – A boon to orthodontics. *Saudi Dent J.* 2015 Jan; 27(1): 12–21.
- 68 Melsen B, Allais D. Factors of importance for the development of dehiscences during labial movement of mandibular incisors: a retrospective study of adult orthodontic patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2005; 127(5): 552–61.
- 69 Mengel R, Candir M, Shiratori K, Flores-de-Jacoby L. Digital volume tomography in the diagnosis of periodontal defects: an in vitro study on native pig and human mandibles. *J Periodontol* 2005; 76(5): 665–73.
- 70 Mengel R, Kruse B, Flores-de-Jacoby L. Digital volume tomography in the diagnosis of peri-implant defects: an in vitro study on native pig mandibles. *J Periodontol* 2006; 77(7): 1234–41.
- 71 Mjör IA, Fejerskov O. *Histology of the human tooth.* 2nd ed, Copenhagen: Munksgaard, 1979: chapter 2.
- 72 Monsour PA, Dudhia R. Implant radiography and radiology. *Aust Dent J.* 2008 Jun; 53 Suppl 1: 11–25.
- 73 Mostafa YA, El Sharaby FA, El Beialy AR. Do alveolar bone defects merit orthodontists' respect? *World J Orthod* 2009; 10(1): 16–20.
- 74 Müssig E, Wörtche R, Lux CJ. Indications for digital volume tomography in orthodontics. *J Orofac Orthop.* 2005; 66(3): 241–9.
- 75 Nahm KY, Kang JH, Moon SC, Choi YS, Kook YA, Kim SH, Huang J. Alveolar bone loss around incisors in Class I bidentoalveolar protrusion patients: a retrospective three-dimensional cone beam CT study. *Dentomaxillofac Radiol.* 2012; 41(6): 481–8.
- 76 Nardi C, Borri C, Regini F, Calistri L, Castellani A, Lorini C, Colagrande S. Metal and motion artifacts by cone beam computed tomography (CBCT) in dental and maxillofacial study. *Radiol Med.* 2015 Jul; 120(7): 618–26.

- 77 Nguyen E, Boychuk D, Orellana M. Accuracy of cone-beam computed tomography in predicting the diameter of unerupted teeth. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2011 Aug; 140(2): 59–66.
- 78 Nimigean VR, Nimigean V, Bencze MA, Dimcevic-Poesina N, Cergan R, Moraru S. Alveolar bone dehiscences and fenestrations: an anatomical study and review. *Rom J Morphol Embryol* 2009; 50(3): 391–7.
- 79 Nötzel F, Schultz C. Leitfaden der kieferorthopädischen Diagnostik: Analysen und Tabellen für die Praxis. 2nd ed, Köln, Germany: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2008: 20–53.
- 80 Nowzari H, Molayem S, Chiu CH, Rich SK. Cone Beam Computed Tomographic Measurement of Maxillary Central Incisors to Determine Prevalence of Facial Alveolar Bone Width  $\geq 2$  mm. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2010.
- 81 Okano T, Harata Y, Sugihara Y, Sakaino R, Tsuchida R, Iwai K, Seki K, Araki K. Absorbed and effective doses from cone beam volumetric imaging for implant planning. *Dentomaxillofac Radiol.* 2009; 38(2): 79–85.
- 82 Pasler FA, Visser H. Zahnmedizinische Radiologie. Bildgebende Verfahren (Band 5, Farb- atlanten der Zahnmedizin). 2th ed. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, 2000: 25 ff.
- 83 Pasler FA. Zahnärztliche Radiologie. 5th ed. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag 2008 :33–35, 78–193, 277 ff.
- 84 Patcas R, Müller L, Ullrich O, Peltomäki T. Accuracy of cone-beam computed tomography at different resolutions assessed on the bony covering of the mandibular anterior teeth. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2012 Jan; 141(1): 41–50.
- 85 Patel A, Sandler J. Richtlinien für Röntgenaufnahmen in der kieferorthopädischen Praxis. *Inf Orthod Kieferorthop* 2009; 41: 51–60.
- 86 Pauwels R, Beinsberger J, Collaert B, Theodorakou C, Rogers J, Walker A. Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. *Eur J Radiol.* 2012 Feb; 81(2): 267–71.
- 87 Peck S. A Biographical Portrait of Edward Hartley Angle, the first specialist in Orthodontics, Part 1. *Angle Orthodontics*, Vol 79 (6), 2009.
- 88 Popat H, Richmond S, Drage NA. New developments in: three-dimensional planning for orthognathic surgery. *J Orthod.* 2010 Mar; 37(1): 62–71.
- 89 Reed BE, Polson AM. Relationship between bitewing and periapical radiographs in assessing crestal alveolar bone levels. *J Periodontol* 1984, 55(1): 22–7.
- 90 Rossini G, Parrini S, Castrolforio T, Deregibus A, & Debernardi CL. Periodontal health during clear aligners treatment: a systematic review. *European Journal of Orthodontics*, 2014 (Dec 29. pii: cju083).
- 91 Rothe LE. Trabecular and cortical bone as risk factors for orthodontic relapse. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006; 130(4): 476–84.
- 92 Roulet JF, Zimmer S. Prophylaxe und Präventivzahnmedizin. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, 2002: 230 ff.

- 93 Rupprecht RD, Horning GM, Nicoll BK, Cohen ME. Prevalence of dehiscences and fenestrations in modern American skulls. *J Periodontol* 2001; 72(6): 722–9.
- 94 S2k-Leitlinie. Dentale digitale Volumetomographie, Version Nr. 9, 2013 (accessed August 5, 2013, at <http://www.dgzmk.de/zahnaerzte/wissenschaft-forschung/leitlinien/details/document/dentale-digitale-volumetomographie.html>).
- 95 Sangnes G, Gjermo P. Prevalence of oral soft and hard tissue lesions related to mechanical toothcleansing procedures. *Community Dent Oral Epidemiol* 1976; 4(2): 77–83.
- 96 Schattmann S. Dentale Volumetomographie in der Diagnostik vestibulärer parodontaler Defekte. Experimentelle Untersuchungen an Formalin-fixierten menschlichen Unterkiefern. Dissertation. Medizinische Fakultät Charité-Universitätsmedizin Berlin. 2011.
- 97 Schroeder HE, Listgarten MA. The gingival tissues: the architecture of peridontal protection. *Periodontol* 2000, 1997; 13: 91–120.
- 98 Schulze D, Heiland M, Thurmann H, Adam G. Radiation exposure during midfacial imaging using 4- and 16-slice computed tomography, cone beam computed tomography systems and conventional radiography. *Dentomaxillofac Radiol.* 2004; 33(2): 83–6.
- 99 Schwenzer N, Ehrenfeld M. *Chirurgische Grundlagen*. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag 2008: 81 ff.
- 100 Serino G, Wennstrom JL, Lindhe J, Eneroth L. The prevalence and distribution of gingival recession in subjects with a high standard of oral hygiene. *J Clin Periodontol* 1994; 21(1): 57–63.
- 101 Silva MA, Wolf U, Heinicke F, Bumann A, Visser H, Hirsch E. Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: a radiation dose evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008 May; 133(5): 640.e1–5.
- 102 Singh P, Cox S. Nance palatal arch: a cautionary tale. *J Orthod* 2009; 36(4): 272–6.
- 103 Sirona Galileos Bedienungsanleitung. Sirona Dental GmbH, Bensheim, Deutschland.
- 104 Slutzkey S, Levin L. Gingival recession in young adults: occurrence, severity, and relationship to past orthodontic treatment and oral piercing. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008, 134(5): 652–6.
- 105 Soares MR, Batista WO, Antonio Pde L, Caldas LV, Maia AF. Study of effective dose of various protocols in equipment cone beam CT. *Appl Radiat Isot.* 2015 Jun; 100: 21–6.
- 106 Songa VM, Jampani ND, Babu V, Buggapati L, Mittapally S. Accuracy of cone beam computed tomography in diagnosis and treatment planning of periodontal bone defects: a case report. *J Clin Diagn Res.* 2014 Dec; 8(12): ZD23–5.
- 107 Spangler S. Dentale Volumetomographie zur Diagnostik von impaktierten Eckzähnen – quantitative Untersuchungen zum Knochenangebot, zur Lage und zur Resorption benachbarter Zähne. Dissertation. Charité-Universitätsmedizin Berlin. 2014.
- 108 Springer K. Zufallsbefunde im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlungsplanung unter besonderer Berücksichtigung dentoalveolärer Aspekte – eine retrospektive Transversalstudie anhand von dentalen Volumetomographien. Dissertation. Charité-Universitätsmedizin Berlin. 2012.

- 109 Steiniger B, Schwarzbach H, Stachniss V. *Mikroskopische Anatomie der Zähne und des Parodonts*. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, 2010: 51–58.
- 110 Suomalainen A, Pakbaznejad Esmaeili E, Robinson S. Dentomaxillofacial imaging with panoramic views and cone beam CT. *Insights Imaging*. 2015; 6(1): 1–16.
- 111 Tenenbaum H. A clinical study comparing the width of attached gingiva and the prevalence of gingival recessions. *J Clin Periodontol* 1982; 9: 86–92.
- 112 Timock AM, Cook V, McDonald T, Leo MC, Crowe J, Benninger BL, Covell DA Jr. Accuracy and reliability of buccal bone height and thickness measurements from cone-beam computed tomography imaging. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2011 Nov; 140(5): 734–44.
- 113 Valderhaug J. Periodontal conditions and carious lesions following the insertion of fixed prostheses: a 10-year follow-up study. *Int Dent J* 1980; 30(4): 296–304.
- 114 Vandenberghe B, Jacobs R, Yang J. 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*, 2008; 37(5), 252–260.
- 115 Vandenberghe B, Jacobs R, Yang J. Diagnostic validity (or acuity) of 2D CCD versus 3D CBCT-images for assessing periodontal breakdown. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics*. 2007; 104(3): 395–401.
- 116 Weber T. *Memorix Zahnmedizin*. 3rd ed. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, 2010: 168–223.
- 117 Wehrbein H, Fuhrmann RA, Diedrich PR. Human histologic tissue response after long-term orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1995; 107(4): 360–71.
- 118 Weigang J. *Quantitative Untersuchungen zur Prävalenz von dentoalveolären Dehiszenzen in Abhängigkeit von Zahn- und Kieferfehlstellungen*. Dissertation. Charité-Universitätsmedizin Berlin, 2015.
- 119 Wolf HF, Rateitschak K. *Farbatlant der Zahnmedizin Band 1: Parodontologie*. 3rd ed. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, 2004: 8–9.
- 120 Wu TH, Lin WC, Chen WK, Chang YC, Hwang JJ. Predicting cancer risks from dental computed tomography. *J Dent Res*. 2015 Jan; 94(1): 27–35.
- 121 Yagci A, Veli I, Uysal T, Ucar FI, Ozer T, Enhos S. Dehiscence and fenestration in skeletal Class I, II, and III malocclusions assessed with cone-beam computed tomography. *Angle Orthod*. 2012 Jan; 82(1): 67–74.
- 122 Yoneyama T, Okamoto H, Lindhe J, Socransky SS, Haffajee AD. Probing depth, attachment loss and gingival recession. Findings from a clinical examination in Ushiku, Japan. *J Clin Periodontol* 1988; 15(9): 581–91.
- 123 Yu Q, Pan XG, Ji GP, Shen G. The association between lower incisal inclination and morphology of the supporting alveolar bone- a cone-beam CT study. *Int J Oral Sci*. 2009; 1(4): 217–23.
- 124 Zawawi KH. *Orthodontic Treatment of a Mandibular Incisor Extraction Case with Invisalign*. Hindawi Publishing Corporation, *Case Reports in Dentistry*, 2014 (published online, 2014, doi:[10.1155/2014/657657](https://doi.org/10.1155/2014/657657)).

- 125 Ziegler CM, Woertche R, Breifand J, Hassfeld S. Clinical indications for digital volume tomography in oral and maxillofacial surgery. *Dentomaxillofaciale Radiology* 2002; 31: 126–130.

## 7. Eidesstattliche Erklärung

„Ich, Anneke Elefant, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: *„Peridentales Knochenangebot vor und nach kieferorthopädischer Behandlung mit Invisalign®-Schielen – eine retrospektive Longitudinalstudie anhand von dentalen Volumetomographien“* selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

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

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

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

Berlin, 14.12.2015

Anneke Elefant

## **8. Lebenslauf**

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

## **9. Publikationsliste**

Publikation in Vorbereitung.

## 10. Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Axel Bumann für die Ermöglichung der Promotion, das große entgegengebrachte Vertrauen und die zielführende, unkomplizierte Betreuung während der gesamten Dissertationszeit.

Ich danke Herrn Dr. Thomas Drechsler, MESANTIS® Wiesbaden, für die Überlassung der anonymisierten Patientendaten und für die herzliche Aufnahme während meiner Datenrecherche vor Ort.

Ich danke den Mitarbeitern des MESANTIS®-Röntgeninstituts Berlin bzw. Wiesbaden Ilka Münnich, Ramona Keilbach und Sebastian Sohst für die kompetente Beantwortung technischer Fragen.

Ich danke Frau Dr. Ulrike von Hehn für die statistische Beratung und Unterstützung bei der Auswertung der endlos erscheinenden Messdaten.

Ich danke meinen Kolleginnen Konstanze und Betül für ihren fachlichen Rat.

Ich danke meinen Großeltern und Geschwistern für die moralische Unterstützung in herausfordernden Situationen.

Ich danke meinem Ehemann, der mir stets Mut zugesprochen hat, für seine unermüdliche Rückendeckung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Ich danke meinem kleinen Sohn, der die Fertigstellung dieser Dissertation durch seine Geduld und sein großartiges, unkompliziertes Wesen überhaupt erst möglich gemacht hat.

Und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt haben.

# 11. Anhang

## 11.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	<i>Strukturen des Parodontium</i> (Wolf & Rateitschak 2004)	07
Abb. 2	<i>Invisalign-Schienensystem</i> ( <a href="http://www.invisalign.de">www.invisalign.de</a> )	10
Abb. 3	<i>Clincheck</i> ; simulierte Bewegung von Zahnfleisch und Zähnen im Zuge der virtuellen Behandlungsplanung	11
Abb. 4	<i>Patientenfall</i> . Ausgangsposition, klinische Befunderhebung vor Behandlungsstart	11
Abb. 5	<i>Patientenfall</i> . Situation nach je 35 Schienen im Ober- und Unterkiefer. Im Anschluss an diesen Zwischenbefund erfolgten noch ein abschließendes Case Refinement und die Retention	12
Abb. 6	Effektive Dosen verschiedener DVT-Geräte. Angabe in $\mu\text{Sv}$ . Berechnung der effektiven Dosen nach den ICRP-Richtlinien 2007 (Gomolka 2013)	22
Abb. 7	Klinische Beispiele der Untergruppen <i>Engstand (A)</i> , <i>Weitstand (B)</i> und <i>sagittale Anomalie (C)</i>	27
Abb. 8	DVT-Gerät „MESANTIS® line“	28
Abb. 9	Arbeitsoberfläche der Software <i>Invivo 5.1.0</i> . Axiale (1), sagittale (2) und koronare Ebene (3)	29
Abb. 10	<i>Messmethodik, schematisch</i> . Die Darstellung zeigt die Vermessung eines unteren Inzisivus bezüglich Zahnlänge, Zahnbreite, Wurzellänge, Knochenbreite und Dehiszenz	30
Abb. 11	Beispiel der <i>Vermessung von Zahnlänge, Wurzellänge, Wurzelbreite sowie des periodontalen Knochenangebotes</i> eines Inzisivus (A), Caninus (B), Prämolaren (C) und Molaren (D), wobei bei mehreren Wurzeln eine Separation der Wurzeln vorgenommen wurde (D1 und D2)	31
Abb. 12	Beispiel der <i>Vermessung von Dehiszenzen</i> eines Inzisivus (A), Caninus (B), Prämolaren (C) und Molaren (D), wobei bei mehreren Wurzeln eine Separation der Wurzeln vorgenommen wurde (D1 und D2)	31
Abb. 13	Ausrichtung des Datensatzes anhand der Bezugsebene Frankfurter Horizontale im <i>Volume-Render-Modus</i> der Anatomage-Software	32
Abb. 14	Beispiel der <i>Vermessung des Angulationswinkels</i> bezogen auf die Frankfurter Horizontale eines Inzisivus (A), Caninus (B), Prämolaren (C) und Molaren (D), wobei bei mehreren Wurzeln eine Separation der Wurzeln vorgenommen wurde (D <sub>1</sub> und D <sub>2</sub> )	32
Abb. 15	Prozentuale Verteilung der erhobenen <i>vestibulären Dehiszenzen</i> . Es zeigte sich eine Verteilung der Zähne auf alle Gruppen mit der größten Prävalenz des Ausmaßes 0–3 mm und 3–6 mm	42

Abb. 16	Prozentuale Verteilung der erhobenen oralen <i>Dehiszenzen</i> . Die Gruppe > 9 mm bleibt unbesetzt, 0,23 % der Zähne zeigten im Ausgangsbefund eine Dehiszenzstärke von 6–9 mm	42
Abb. 17	<i>Summe der oralen Dehiszenzen vor (AU) und nach (EU) der Behandlung</i> im Bereich der vestibulären bzw. mesialen (v/m), palatinalen (p) und distalen (d) Wurzeln	43
Abb. 18	<i>Summe der vestibulären Dehiszenzen vor (AU) und nach (EU) der Behandlung</i> im Bereich der vestibulären bzw. mesialen (v/m), palatinalen (p) und distalen (d) Wurzeln	44
Abb. 19	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der oralen Dehiszenzen zu beiden Behandlungszeitpunkten	48
Abb. 20	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der vestibulären Dehiszenzen zu beiden Behandlungszeitpunkten	49
Abb. 21	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der Veränderung der oralen Knochenbreiten im mittleren Wurzel Drittel	50
Abb. 22	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der Veränderung der vestibulären Knochenbreiten im mittleren Wurzel Drittel	51
Abb. 23	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der Veränderung der oralen Knochenbreiten im unteren Wurzel Drittel	52
Abb. 24	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der Veränderung der vestibulären Knochenbreiten im unteren Wurzel Drittel	53
Abb. 25	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der Veränderung der oralen Knochenbreiten apikal	53
Abb. 26	<i>Geschlechterspezifischer</i> Unterschied der Veränderung der vestibulären Knochenbreiten apikal	54
Abb. 27	Mittelwerte der oralen Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Gruppenvergleich vor (AU) und nach der Behandlung (EU); Angabe in mm	56
Abb. 28	Mittelwerte der vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Gruppenvergleich vor (AU) und nach der Behandlung (EU); Angabe in mm	57
Abb. 29	Mittelwerte der <i>altersspezifischen</i> Veränderung der vestibulären Dehiszenzen im Therapieverlauf; Angabe in mm	58
Abb. 30	Mittelwerte der <i>altersspezifischen</i> Veränderung der oralen Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, mittleres Wurzel Drittel; Angabe in mm	59
Abb. 31	Mittelwerte der <i>altersspezifischen</i> Veränderung der vestibulären Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, mittleres Wurzel Drittel; Angabe in mm	60
Abb. 32	Mittelwerte der <i>altersspezifischen</i> Veränderung der oralen Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, unteres Wurzel Drittel; Angabe in mm	61

Abb. 33	Mittelwerte der <i>altersspezifischen</i> Veränderung der vestibulären Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, unteres Wurzel Drittel; Angabe in mm	62
Abb. 34	Mittelwerte der gruppenspezifischen Veränderung der oralen Alveolarknochenbreiten im Therapieverlauf, Wurzelspitze; Angabe in mm	63
Abb. 35	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Dehiszenzen oral (Werte im Mittelwert beschrieben)	65
Abb. 36	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Dehiszenzen vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben)	67
Abb. 37	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzel Drittel, oral (Werte im Mittelwert beschrieben). Der Unterschied zwischen Oberkiefer und Unterkiefer war im Bereich vestibulär / mesial signifikant	69
Abb. 38	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzel Drittel, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben). Der Unterschied zwischen Oberkiefer und Unterkiefer war im Bereich vestibulär / mesial signifikant	69
Abb. 39	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzel Drittel, oral (Werte im Mittelwert beschrieben)	71
Abb. 40	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzel Drittel, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben)	72
Abb. 41	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten apikal, oral (Werte im Mittelwert beschrieben)	73
Abb. 42	<i>Kieferbezogener</i> Unterschied der Alveolarfortsatzbreiten apikal, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben)	74
Abb. 43	Orale Dehiszenzen vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 11, 13 und 45	76
Abb. 44	Vestibuläre Dehiszenzen vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 16 (distale Wurzel) und 35	78
Abb. 45	Orale Alveolarknochenbreiten (AKB) im mittleren Wurzel Drittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 11, 16 (distale Wurzel), 26 (distale Wurzel), 21, 22 und 43	79
Abb. 46	Vestibuläre Alveolarknochenbreiten (AKB) im mittleren Wurzel Drittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 11, 12, 16 (distale Wurzel), 21, 33, 35 und 36 (beide Wurzeln)	81
Abb. 47	Orale Alveolarknochenbreiten (AKB) im unteren Wurzel Drittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 11, 13 und 21	82
Abb. 48	Vestibuläre Alveolarknochenbreiten (AKB) im unteren Wurzel Drittel, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 11, 16 (distale Wurzel), 21 und 25	83

Abb. 49	Orale Alveolarknochenbreiten, apikal, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 11, 14, 24, 35 und 44	85
Abb. 50	Vestibuläre Alveolarknochenbreiten, apikal, vor und nach der Invisalign®-Behandlung, <i>signifikante</i> Zähne 11 und 34	86
Abb. 51	Gemessene Angulationswinkel der Zähne 1 bis 6 eines jeden Quadranten zum Zeitpunkt der Ausgangsuntersuchung (AU) und Enduntersuchung (EU); Angabe in Grad (°)	87
Abb. 52	Veränderung des Dehiszenz- und Angulationsausmaßes im Therapieverlauf der signifikanten Zähne 25, 26, 44 und 36; Angabe in Millimeter und Grad (°)	88

## 11.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	<i>Gruppeneinteilung</i> des Patientenkollektives	26
Tab. 2	<i>Untergruppen</i> Engstand / Weitstand / sagittale Anomalie	26
Tab. 3	<i>Ausschlusskriterien</i>	27
Tab. 4	<i>Technische Daten</i> MESANTIS® line	28
Tab. 5	Kriterien für ein <i>reproduzierbares Messergebnis</i>	33
Tab. 6	Unterteilung der 18 Patienten in die Gruppen <i>weiblich</i> (n = 9) und <i>männlich</i> (n = 9)	34
Tab. 7	Unterteilung der 18 Patienten anhand ihres <i>Alters</i>	35
Tab. 8	Interpretation der <i>Korrelationskoeffizienten</i>	36
Tab. 9	Unterteilung der vermessenen Zähne nach ihrer <i>Kieferzugehörigkeit</i>	36
Tab. 10	Unterteilung des Datenmaterials anhand der unterschiedlichen <i>Zahnarten</i>	37
Tab. 11	<i>Methodenfehler nach Dahlberg</i> und <i>Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston</i> der Zähne 32, 34 und 36. Der Molar 36 wurde an beiden Wurzeln untersucht und ist somit mit jeweils zwei Werten beschrieben (mesiale Wurzel / distale Wurzel)	39
Tab. 12	Allgemeines Ausmaß der <i>oralen Dehiszenzen</i> in mm	40
Tab. 13	Allgemeines Ausmaß der <i>vestibulären Dehiszenzen</i> in mm	41
Tab. 14	Unterteilung der befundeten Zähne anhand der erhobenen Messwerte in verschiedene <i>Dehiszenzklassen</i> und prozentualer Vergleich zwischen Ausgangsuntersuchung (AU) und Enduntersuchung (EU)	41
Tab. 15	Allgemeine Breite des <i>Alveolarknochens im mittleren Wurzeldrittel, oral</i>	44
Tab. 16	Allgemeine Breite des <i>Alveolarknochens im mittleren Wurzeldrittel, vestibulär</i>	45

Tab. 17	Allgemeine Breite des <i>Alveolarknochens im unteren Wurzelf Drittel, oral</i>	45
Tab. 18	Allgemeine Breite des <i>Alveolarknochens im unteren Wurzelf Drittel, vestibulär</i>	46
Tab. 19	Allgemeine Breite des <i>Alveolarknochens apikal, oral</i>	46
Tab. 20	Allgemeine Breite des <i>Alveolarknochens apikal, vestibulär</i>	47
Tab. 21	Veränderung der oralen Dehiszenzen im Geschlechtervergleich	48
Tab. 22	Veränderung der vestibulären Dehiszenzen im Geschlechtervergleich	49
Tab. 23	Veränderung der oralen Knochenbreiten im Geschlechtervergleich, mittleres Wurzelf Drittel	51
Tab. 24	Veränderung der oralen Knochenbreiten im Geschlechtervergleich, apikal	54
Tab. 25	Veränderung der vestibulären Knochenbreiten im Geschlechtervergleich, apikal	55
Tab. 26	Mittelwerte der oralen und vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im Gruppenvergleich vor (AU) und nach der Behandlung (EU); Angabe in mm	57
Tab. 27	Mittelwerte der oralen Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	64
Tab. 28	Mittelwerte der oralen Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	65
Tab. 29	Mittelwerte der vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	66
Tab. 30	Mittelwerte der vestibulären Dehiszenzen aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	66
Tab. 31	Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzelf Drittel aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	67
Tab. 32	Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzelf Drittel aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	68
Tab. 33	Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzelf Drittel aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	68
Tab. 34	Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im mittleren Wurzelf Drittel aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	68
Tab. 35	Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzelf Drittel aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	70
Tab. 36	Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzelf Drittel aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	70

Tab. 37	Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzeldrittel aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	71
Tab. 38	Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten im unteren Wurzeldrittel aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	72
Tab. 39	Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	73
Tab. 40	Mittelwerte der oralen Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	73
Tab. 41	Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im <i>Oberkiefer</i> vor und nach der Behandlung	74
Tab. 42	Mittelwerte der vestibulären Alveolarfortsatzbreiten apikal aller untersuchten Zähne im <i>Unterkiefer</i> vor und nach der Behandlung	74
Tab. 43	<i>Zahnartbezogener</i> Unterschied der Dehiszenzen oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	76
Tab. 44	<i>Zahnartbezogener</i> Unterschied der Dehiszenzen vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	77
Tab. 45	<i>Zahnartbezogener Unterschied</i> der Knochenbreiten, oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	79
Tab. 46	<i>Zahnartbezogener Unterschied</i> der Knochenbreiten, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	81
Tab. 47	<i>Zahnartbezogener Unterschied</i> der Knochenbreiten, oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	82
Tab. 48	<i>Zahnartbezogener Unterschied</i> der Knochenbreiten, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	83
Tab. 49	<i>Zahnartbezogener Unterschied</i> der Knochenbreiten, oral (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	84
Tab. 50	<i>Zahnartbezogener Unterschied</i> der Knochenbreiten, vestibulär (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in mm)	86
Tab. 51	<i>Zahnangulationen</i> der Zähne 1 bis 6 eines jeden Quadranten (Werte im Mittelwert beschrieben, Angabe in °)	87