

Aus dem Institut für 3D-Dentalradiologie - MESANTIS Berlin

DISSERTATION

Dentale Volumetomografie zur Diagnostik von Molaren- lücken im Unterkiefer – quantitative Untersuchungen zum Knochenangebot nach frühzeitigem Verlust der ersten Molaren

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Julia Beier

aus Medellin

Datum der Promotion: 09.09.2016

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt	5
Abstract	7
1. Einleitung	9
1.1. Aufbau des Parodonts	9
1.2. Kieferorthopädische Zahnbewegung	12
1.3. Behandlungskonzepte für Lücken im Molarenbereich	18
1.4. Bildgebende Verfahren in der kieferorthopädischen Diagnostik	22
2. Fragestellung	30
3. Methodik	32
3.1. Allgemeine Methodik	32
3.1.1. Patientengut	32
3.1.2. DVT-Aufnahmen	32
3.1.3. Auswertungssoftware und Befundungsmonitor	33
3.1.4. Messmethodik	34
3.1.5. Statistische Auswertung	37
3.2. Spezielle Methodik	41
3.2.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter im DVT	41
3.2.2. Vertikales Knochenangebot	50
3.2.3. Transversales Knochenangebot im DVT	50
3.2.4. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Patienten	51
3.2.5. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Lücke	51
3.2.6. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Geschlecht	51
3.2.7. Korrelation zwischen vertikalem und transversalem Knochenangebot	52

3.2.8.	Korrelation zwischen Knochenhöhe und Querschnittsfläche	52
3.2.9.	Korrelation zwischen Knochenbreite und Querschnittsfläche	53
4.	Ergebnisse	54
4.1.	Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter im DVT	54
4.2.	Vertikales Knochenangebot	63
4.3.	Transversales Knochenangebot	64
4.4.	Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Patienten	66
4.5.	Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Lücke	69
4.6.	Knochenangebot in Abhängigkeit vom Geschlecht	71
4.7.	Korrelation zwischen vertikalem und transversalem Knochenangebot	74
4.8.	Korrelation zwischen Knochenhöhe und Querschnittsfläche	75
4.9.	Korrelation zwischen Knochenbreite und Querschnittsfläche	76
5.	Diskussion	78
5.1.	Diskussion der Methoden	79
5.2.	Diskussion der Ergebnisse	80
5.2.1	Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter im DVT	80
5.2.2.	Vertikales Knochenangebot im DVT	81
5.2.3.	Transversales Knochenangebot im DVT	82
5.2.4.	Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Patienten	85
5.2.5.	Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Lücke	87
5.2.6.	Knochenangebot in Abhängigkeit vom Geschlecht	88
5.2.7.	Korrelation zwischen vertikalem und transversalem Knochenangebot	89
5.2.8.	Korrelation zwischen Knochenhöhe und Querschnittsfläche	90
5.2.9.	Korrelation zwischen Knochenbreite und Querschnittsfläche	91
5.3.	Schlussfolgerung	92

6.	Literaturverzeichnis	94
7.	Eidesstaatliche Erklärung	108
8.	Lebenslauf	109
9.	Publikationsliste	110
10.	Danksagung	110

Abstrakt

Ziel:

Ziel dieser Studie war es, anhand von bereits vorhandenen DVT-Datensätzen, retrospektiv die Reproduzierbarkeit der Vermessung des vertikalen und transversalen Knochenangebotes in einer Unterkieferlücke im Molarenbereich (Regio 36 oder 46) zu ermitteln. Dadurch sollte aufgezeigt werden, wie häufig eine Implantation bzw. ein kieferorthopädischer Lückenschluss aufgrund des vorhandenen Knochenangebotes in einem klinischen Patientengut möglich ist. Ebenso sollte ein positiver Zusammenhang zwischen transversalem und vertikalem Knochenangebot überprüft werden.

Methodik:

Es wurden DVT-Datensätze von insgesamt 100 Patienten mit einer Unterkiefermolarenlücke untersucht. Das jeweilige Knochenangebot in der Molarenlücke (Regio 36/46) und an den mesialen Wurzeln der zweiten Molaren wurde in axialen, sagittalen und koronalen Ansichten analysiert. Ebenso wurde die intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter Höhe, Breite und Fläche in der Unterkieferlücke statistisch überprüft. Mit Hilfe des T-Tests wurde überprüft, ob das transversale und vertikale Knochenangebot im Lückenbereich gegenüber dem Knochenangebot an der mesialen Wurzel des zweiten Molaren statistisch signifikant verringert war. Die Messparameter wurden in Abhängigkeit von Alter, Alter der Zahnücke und Geschlecht der Patienten untersucht. Mit Hilfe der Korrelationsanalyse nach Pearson wurden die Messparameter auf einen statistisch signifikanten Zusammenhang untersucht.

Ergebnisse:

Die intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter in der Unterkieferlücke lag zwischen 97 und 99 %. Im Lückenbereich resultierte ein signifikant reduziertes vertikales Knochenangebot ($p < 0,001$) im Vergleich zum Knochenangebot der mesialen Wurzel des zweiten Molaren. Bei 74 % der Patienten reichte das Knochenangebot für einen mesialen Lückenschluss im Lückenbereich nicht aus, da hierfür eine Breitendifferenz von 1 mm zwischen transversalem Knochen und Breite der mesialen Wurzel gefordert wird. Bei 68 % der Patienten reichte das geforderte Knochenangebot im basalen Bereich für die Insertion eines Implantats aus. Das Patientenalter und das Alter der Zahnücke hatten keinen Einfluss auf das Knochenangebot. Jedoch war das vertikale und transversale Knochenangebot vom Geschlecht der Patienten abhängig, mit Ausnahme der Knochenquerschnittsfläche. Es konnte kein positiver Zusammenhang zwischen dem vertikalen und transversalen Knochenangebot ermittelt werden ($p = 0,837$). Jedoch lag ein positiver Zusammenhang zwischen dem vertikalen Knochenangebot

und der Knochenquerschnittfläche sowie dem transversalen Knochenangebot und der Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich vor.

Schlussfolgerung:

Nur bei 26 % der untersuchten Patienten war das transversale Knochenangebot für einen mesialen Lückenschluss ausreichend. Ebenso korrelierte das transversale Knochenangebot nicht mit dem vertikalen Knochenangebot in der untersuchten Region. Somit sind ausreichende Informationen über die untersuchte Region nicht alleine aus einem 2D-Orthopantomogramm herauszuziehen. Nach den vorliegenden Ergebnissen stellt die Analyse des Knochenangebotes einer Lücke im unteren Molarenbereich eine rechtfertigende Indikation für die Anfertigung einer digitalen Volumentomographie dar.

Schlüsselwörter: DVT, Molarenlücke, transversales Knochenangebot, kieferorthopädischer Lückenschluss

Abstract

Purpose:

This study's purpose was to retrospectively determine the measuring reproducibility of the vertical and transversal bone availability in a gap in the lower mandibular regio 36 or 46 based on existing CBCT data images. Aim was to demonstrate how successful an implant supply, respectively an orthodontic gap closure, is possible in a clinical patient population on the patients available bone. A positive relationship between the transversal and vertical bone was hypothesized.

Methods:

The bone availability in the molar gap and at the mesial roots of the second molars was examined in 100 patients with a mandibular molar gap from axial, sagittal and coronal views. The intraindividual reproducibility of the measurement parameters height, breadth and surface area in the molar gap was reviewed statistically. Using a t-test testing for a decreased transversal and vertical bone availability in the gap compared to the mesial roots of the second molars. The measurement parameters were examined depending on age, age of the gap and gender of the patients. By means of the Pearson correlation, the measurement parameters were examined in respect to a statistic relevant relationship.

Results:

The intraindividual reproducibility of the measurement parameters in the molar gap was 97-99 %. A significantly reduced vertical bone resulted in the gap area compared to the mesial roots of the second molars. 74 % of the patients surveyed, showed no sufficient bone material for a mesial gap closure, demanding a width difference of 1 mm between transversal bone and the width of the mesial root.

68 % of the patients showed adequate bone availability in the basal area for the insertion of an implant. The patient's age and the age of the gap had no effect on the bone. Yet, the vertical and transversal bone was dependent on the patients' gender with the exception of the cross-sectional area. There was no positive correlation between the vertical and transversal bone ($p = 0.837$), but a positive correlation between the vertical bone and the cross-sectional bone area and between the transversal bone and the cross-sectional bone area in the gap.

Conclusion:

Only at a rate of 26 % of the examined patients the transversal bone for a mesial gap closure

was sufficient. The transversal bone did not correlate with the vertical bone of the region to be examined. Thus, there is no sufficient information about the area to be examined using solely a 2D-Orthopantomogram. Based on the existing evidence, the analysis of the bone availability in a gap in the lower molar region represents a justifiable indication for the preparation of a digital volume tomography.

Keywords: DVT, mandibular molar gap, transversal bone, orthodontic gap closure

1. Einleitung

1.1. Aufbau des Parodonts

Der Begriff Parodont leitet sich vom lateinischen Wort „para“= neben und dem griechischen Wort „odus“= Zahn ab. Das Parodont besteht aus verschiedenen Hart- und Weichgeweben, die den Zahn umgeben. Dazu gehören Gingiva, Desmodont, Wurzelzement und Alveolarknochen (Rateitschak und Wolf 2003). Es hat die Aufgabe, den Zahn im Knochen zu verankern und Kaukräfte zu dämpfen, indem diese aufgenommen und abgeleitet werden. Des Weiteren wehrt das Parodont von außen einwirkende Noxen ab und schafft eine Trennung zwischen Mundhöhlenmilieu und Zahnwurzel. Damit stellt es die Kontinuität der Oberflächenauskleidung der Mundhöhle sicher (Schroeder und Listgarten 1997).

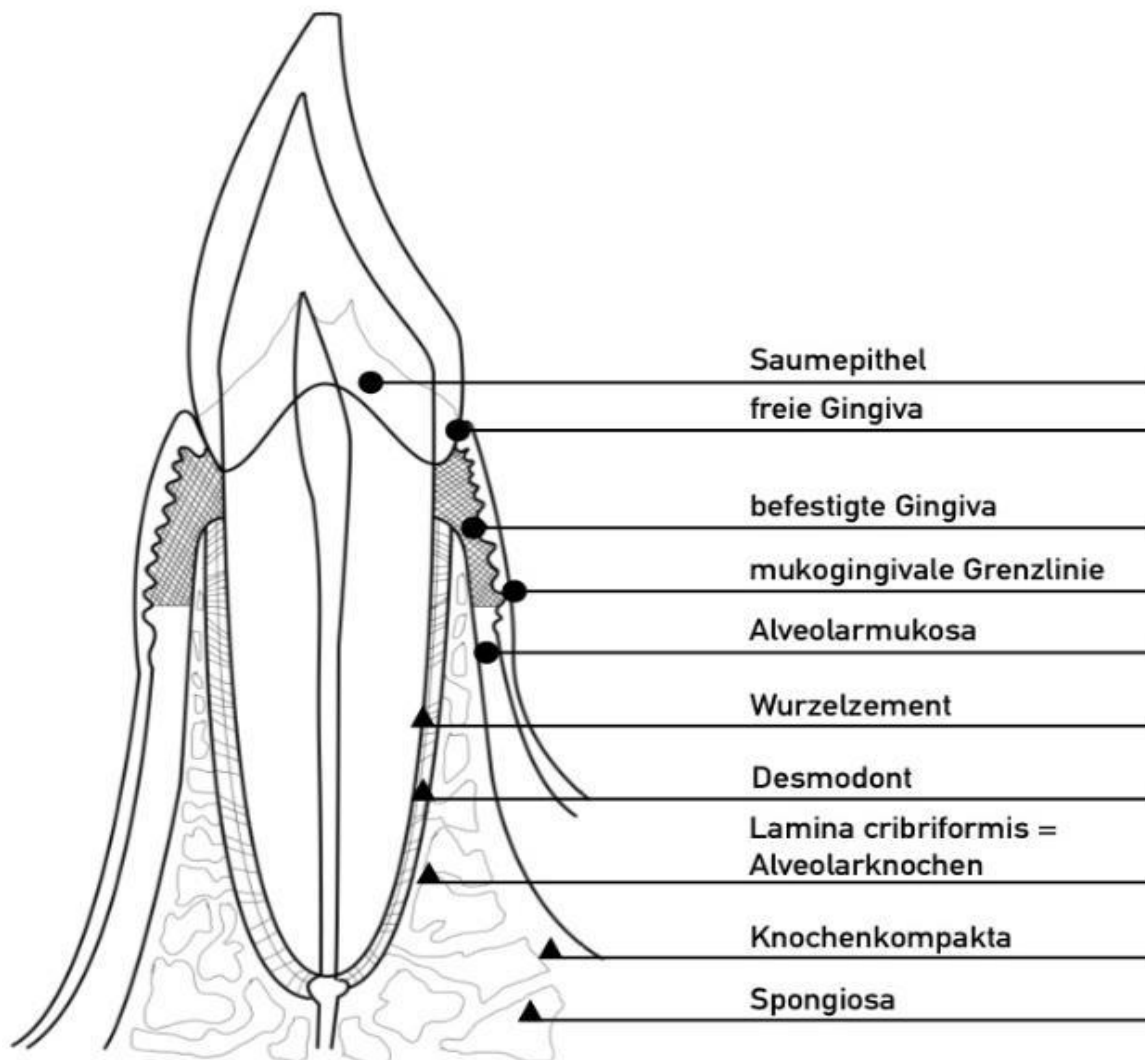


Abb. 1: Aufbau des Parodonts (Zeichnung nach Rateitschak & Wolf 2003)

Gingiva

Die Gingiva zählt neben der Gaumenschleimhaut zur mastikatorischen Mukosa. Die weiteren Bestandteile der Mundschleimhaut sind spezielle und auskleidende Mukosa. Die Gingiva wird unterteilt in freie marginale, befestigte und interdental Gingiva und besteht im Wesentlichen aus Bindegewebe und Epithel (Schroeder und Listgarten 1997).

Koronal entlang des Zahnes verläuft die freie Gingiva mit ihrer glatten Oberfläche in einer Breite von 0,8 mm–2,5 mm. Die Breite der befestigten Gingiva beträgt 1-9 mm. Diese liegt unterhalb der freien Gingiva und wird durch die gingivale Furche auf Höhe der Schmelz-Zementgrenze von dieser getrennt. Die befestigte Gingiva ist nicht auf ihrer Unterlage beweglich, im Gegensatz zu der weiter apikal gelegenen Alveolarmukosa.

Die interdental Gingiva, das Gewebe zwischen jeweils 2 direkt benachbarten Zähnen, füllt den Raum aus, der durch die unterschiedliche Form der aneinander stehenden Zähne entsteht. Dadurch variiert die Breite der interdentalen Gingiva je nach Zahnform. Die interdental Gingiva besteht aus einem oralen und einem vestibulären Papillenzipfel und dem dazwischen liegenden Col (= Sattel). Das Col stellt die Verschmelzung der Saumeithelien zweier Nachbarzähne dar. Diese interdental Gingiva besitzt einen freien Anteil mit Bindegewebsfasern, die vom Wurzelzement einstrahlen und einen befestigten Anteil der transseptale-, alveolo- und dentogingivale Faserbündel enthält. Er liegt zwischen der Schmelz-Zementgrenze und dem interdentalen Knochenseptum. Die Gingiva ist einer ständigen Erneuerung unterworfen (Turnover). Dadurch schützt sie sich hauptsächlich vor mechanischen Reizen (Radlanski 2011, Fawzy El-Sayed et al. 2012).

Desmodont

Das Desmodont füllt den Spalt zwischen Wurzeloberfläche und Alveolarknochen aus. Zusammen mit dem Wurzelzement und dem Knochen bildet es eine funktionelle Einheit. Es ist im Durchschnitt ca. 0,2 mm dick (Rateitschak und Wolf 2003). Das desmodontale Gewebe besteht aus Bindegewebsfasern, den primären und sekundären Fasern. Den überwiegenden Teil stellen die primären Fasern dar. Die primären Fasern bestehen aus kollagen- und oxytalanhaltigen Faserbündeln. Ihre Ausrichtung ist horizontal, quer, apikal und interradiär. Als Sharpey-Fasern bezeichnet man den Teil der kollagenen Fasern, der in das Hartgewebe einstrahlt (Feneis 1952). Die sekundären Fasern bestehen aus kollagenen und zu einem kleinen Teil aus elastischen Fasern. Diese Fasern umgeben Blutgefäße und Nerven. Primäre und sekundäre Fasern befinden sich im Parodontalspalt. Da die Fasern unterschiedliche Funktionen und Verlaufsrichtungen haben unterscheidet man sie in einzelne Gruppen. Die schräg verlaufenden zementoalveolären Fasern sind verantwortlich für axiale (in- und extrudierende) Bewegungen. Für die ho-

Horizontale Stabilisierung sorgen die horizontal verlaufenden zementoalveolären Fasern. Der Parodontalspalt ist koronal und apikal breiter als in der Mitte und ähnelt so der Form einer Sanduhr. Er besitzt eine Pufferfunktion. Bei funktioneller Belastung bewirkt er eine Verbreiterung des Spalts und eine Verdickung der primären Faserbündel. Bei Funktionsausfall verschmälert sich das Desmodont und die Faserbündel werden dünner und atrophisch.

Die Zellen des Desmodonts sind Fibroblasten, Zementoblasten, Osteoklasten und Osteoblasten (Wolf et al. 2005). Diese Zellen sind in der Lage, folgende drei unterschiedliche Gewebe zu bilden und sich somit selbst zu erhalten: Das Desmodont selbst, das Zement und den Alveolarknochen. Diese Fähigkeit macht es unter den parodontalen Geweben einzigartig.

Die Fibroblasten nehmen den größten Anteil der Zellen im Desmodont ein und sind für die Kollagensynthese, für die Bildung der bindegewebigen Grundsubstanz sowie auch für den Abbau des Kollagens verantwortlich. Für den Anbau des Eigen- und Gemischtfaserzements sind die Zementoblasten verantwortlich. Die Osteoklasten und Osteoblasten befinden sich im zementnahen Drittel des Desmodonts. In alternierenden Zyklen erfolgt die Knochenanlagerung und –resorption, wodurch ein Austausch des alten durch neuen Knochen resultiert. Das Desmodont ist stark vaskularisiert. Die nervale Versorgung des Desmodonts besteht aus sensorischen und autonomen Nervenfasern. Diese sind unter anderem verantwortlich für die Schmerzperzeption, Druckempfindung und die lokale Regulation der desmodontalen Gefäße (Huang et al. 2011).

Zement

Das Zement besteht aus mineralisiertem Gewebe und bedeckt das Dentin in nicht von Zahnschmelz bedeckten Bereichen. In der Region des Wurzeldentins befindet sich das radikuläre Zement (Wurzelzement). Es besteht zu 65 Gew.% aus anorganischem Material, der Rest sind zu 23 Gew.% organisches Material und 12 Gew.% Wasser (Berkovitz et al. 2009). Das koronale Zement bedeckt das Dentin im Bereich der Schmelz-Zementgrenze. Es dient der Verankerung der desmodontalen Fasern und verbindet somit das parodontale Ligament mit dem Zahn. Das Zement wird zeitlebens durch Apposition verdickt. Das Zementwachstum variiert distal und mesial. Distal sind höhere Wachstumsraten als mesial zu verzeichnen. Daher ist bei einer Zahnbewegung das Zement in der Lage, sich an die Mesialdrift zu adaptieren. Zelluläres Eigenfaserzement und zelluläres Gemischtfaserzement befinden sich an apikalen Wurzelregionen und an Furkationen so wie an Stellen, an denen es zu Reparationsprozessen kommt. Nur zelluläres Eigenfaserzement ist in der Lage, resorptive Defekte zu reparieren, weshalb es eine wichtige Rolle in der Beibehaltung der richtigen Position des Zahnes spielt. Zelluläres Gemischtfaserzement besteht aus abwechselnden Lagen von Fremdfaserzement und Eigenfaserzement (Bosshardt und Schroeder 1991, Bosshardt und Schroeder 1992, Bosshardt und Selvig 1997). Dieses

geschichtete Gewebe ist in der Lage, sich während der Zahnbewegung funktionell anzupassen. Dabei kommt es bei einer Mesialwanderung oder durch die okklusale Drift zur Veränderungen in der äußeren Form der Wurzel.

Alveolarknochen

Mit der Bildung und dem Durchbruch der Zähne entwickelt sich auf dem Ober- und Unterkiefer der Alveolarfortsatz. Der unmittelbar zahntragende Teil des Alveolarfortsatzes stellt den Alveolarknochen dar (Rateitschak und Wolf 2003). Dieser atrophiert bei Verlust der Zähne mehr oder weniger.

Zwischen der äußeren und inneren Kortikalis befindet sich die Spongiosa. Die äußere Kortikalis ist von Periost bedeckt und geht am Eingang der Alveole (*Limbus alveolaris*) in die innere Kortikalis (*Lamina cribrosa*) über. Die stark durchlöchernte Alveolenwand ist periostfrei. Sie erscheint im Röntgenbild aufgrund eines Überlappungseffekt als röntgendichte Linie und wird als *Lamina dura* bezeichnet (Manson 1963). Aus der Spongiosa verlaufen Nervenfasern, sowie Blut- und Lymphgefäße durch die Öffnungen der *Lamina cribrosa* bis in das Desmodont und versorgen dieses. Die Spongiosa besteht aus Knochenbälkchen in netzartiger Anordnung. Zwischen den Bälkchen befinden sich mit Fettmark gefüllte Knochenmarksräume. Im vestibulären und lingualen/palatinalen Abschnitt der Alveolarfortsätze sind die Bälkchen horizontal angeordnet. Eine vertikale und leiterförmige Anordnung ist in lingualen/palatinalen Abschnitten zu finden. Entlang der Drucklinien, den sogenannten Trajektorien, sind diese Knochenbälkchen angeordnet. Hier werden Kaukräfte oder andere auf den Körper einwirkende Kräfte aufgefangen und abgeleitet (Küppers 1971). Man unterscheidet in drei verschiedene Zelltypen des Alveolar-knochens: die Osteoblasten, Osteoklasten und Osteozyten. Die Osteoblasten sorgen für Knochenanbau, die Osteoklasten für den Abbau (Lewis 1906). Die Osteozyten entstehen aus Osteoblasten, die sich in den Knochen einmauern. Sie befinden sich in Lakunen des Knochens und stehen über ihre langen dendritischen Fortsätze untereinander und mit den Osteoblasten an der Oberfläche in Verbindung (Jakob und Felsenberg 2013).

1.2. Kieferorthopädische Zahnbewegung

Unter einer kieferorthopädischen Zahnbewegung versteht man (dosierte) Maßnahmen, die zur Veränderung der Zahnstellung im dreidimensionalen Raum durchgeführt werden. Die kieferorthopädische Zahnbewegung umfasst alle Bewegungen, die durch applizierte Kräftesysteme herbeigeführt werden. Dabei unterscheidet sich die kieferorthopädische Zahnbewegung in histologischer Hinsicht nur geringfügig von der physiologischen Zahnbewegung. Die physiologische Zahnbeweglichkeit ist sowohl in horizontaler als auch in vertikaler und rota-

torischer Richtung möglich (Mühlemann und Rateitschak 1963). Die Höhe des Alveolarknochens, die Breite der Parodontalfasern so wie auch die Gestalt und Anzahl der Wurzeln sind entscheidend für die Beweglichkeit eines Zahns in horizontaler Richtung. Bei steigender Belastung unterscheidet man die physiologische Zahnbeweglichkeit in zwei Phasen. Die erste Phase beschreibt die desmodontale Zahnbeweglichkeit. Bei Belastung des Zahnes ist sie die erste Bewegungsphase und wird mit 2-5 N in orofazialer Richtung gemessen. Innerhalb der Alveole bewegt sich der Zahn nur sehr wenig. Dabei wird der knöcherne Alveolarfortsatz nicht wesentlich deformiert. Die desmodontalen Faserbündel werden in dieser Phase gespannt oder entspannt. Je nach Breite des Desmodontalspalts und nach der histologischen Struktur des Parodonts kann diese initiale Zahnbeweglichkeit ca. 50-100 µm betragen. In der zweiten Phase, der parodontalen Zahnbeweglichkeit, kommt es zur elastischen Deformation des Alveolarfortsatzes. Der Alveolarfortsatz setzt in diesem Fall der weiteren Zahnauslenkung einen Widerstand entgegen. Die Belastung des Zahnes in orofazialer Richtung wird hier mit 5 N gemessen. In der Regel liegt die Zahnbeweglichkeit hier bei 60-150 µm (Rateitschak und Wolf 2003). Schwankungen sind abhängig von der Masse und der Qualität des Alveolarfortsatzes (Buchmann 2010). Die einwirkenden Kaukräfte werden vom Alveolarfortsatz abgepuffert und somit durch die eigene Auslenkung abgepuffert. Dadurch wird die Druckbelastung in abgeschwächter Form auf die Knochentrabekel bis in die Spongiosa weitergeleitet. Da die Kaukräfte zwischen 20-300 N nur sehr kurzzeitig einwirken, besteht eine reversible Dehnung oder Kompression des Parodontalligaments (PDL) und des Alveolarfortsatzes. Somit kehrt der Zahn wieder in seine alte Position zurück. Wirken auf den Zahn jedoch lang anhaltende Kräfte, oder wirken diese in geringen Abständen wiederholt auf die Zähne ein, so kommt es zu irreversiblen parodontalen Verformungen. Diesen Verformungen folgen Gefäße, Parodontalfasern, Alveolarknochen und Spongiosa im Sinne einer Anpassungsreaktion. Der Zahn wird dadurch in Richtung Belastung bewegt (Chang et al. 2014).

Bei der orthodontischen Bewegung wirken labiale, orale oder proximale Kräfte auf den Zahn und das Parodontium ein. Schon bei geringen Dauerbelastungen zwischen 1,0 und 2,0 N wird eine irreversible Reaktion ausgelöst (Harzer 2011). Bei den kieferorthopädischen Belastungen unterscheidet man in unterschwellige und wirksame Belastungen. Bei unterschweligen Belastungen wirken kurzzeitig einwirkende Kräfte, welche durch Dämpfung und Verteilung zu keiner zellulär einseitigen Reaktion führen. Die Folge sind reversible parodontale Gewebereaktionen mit Rückstellbewegung. Die wirksamen Belastungen treten nach der Ausschöpfung von Dämpfungsmechanismen auf. Bei unterschweligen Belastungen treten verschiedene Mechanismen auf. Der Sprungbretteffekt entsteht durch Eigenelastizität der Zahnhartsubstanzen. Der Wasserbetteffekt beschreibt einen hydrodynamischen Polstereffekt

der desmodontalen Gewebsflüssigkeit und des Gefäßnetzes (Lapatki und Radeke 2014, Palamidakis et al. 2013). Der Hängematteneffekt tritt durch die initiale Streckung der Desmodontalfasern auf. Die Deformation der knöchernen Strukturen an denen das Desmodont befestigt ist, ist ein weiterer Mechanismus der zu den unterschwelligen Belastungen zählt. Diese Mechanismen treten kaskadenartig auf und bewirken, dass bei physiologischen und teilweise auch parafunktionellen Belastungen die desmodontale Zirkulation und das zelluläre Gleichgewicht erhalten bleiben. Anschließend erfolgt das belastungsfreie Intervall. Dieses muss lang genug sein, damit eine Rückstellung der Strukturen erfolgen kann. Ist das Intervall jedoch nicht lang genug, wird aus der unterschwelligen Kraft eine kieferorthopädisch wirksame Kraft (Diedrich 2000).

Diese kieferorthopädisch wirksame Kraft entsteht auch bei einer Kippung des Zahns in eine Lücke nach Zahnverlust. Hier liegt eine langfristige, einseitige Unterbrechung des Kräftegleichgewichts vor. Eine kieferorthopädisch wirksame Kraft tritt auf, wenn die initialen Dämpfungsmechanismen ausgeschöpft sind. Es finden hier Veränderungen am Desmodont statt, d.h. es kommt zu einer Kompression in den Druckzonen und einer Erweiterung in den Zugzonen. *Reitan* (1989) beschrieb (Abb. 2) die einzelnen Phasen (Phase 1-3) der Zahnbewegung unter kontinuierlicher Belastung (Diedrich 2000).

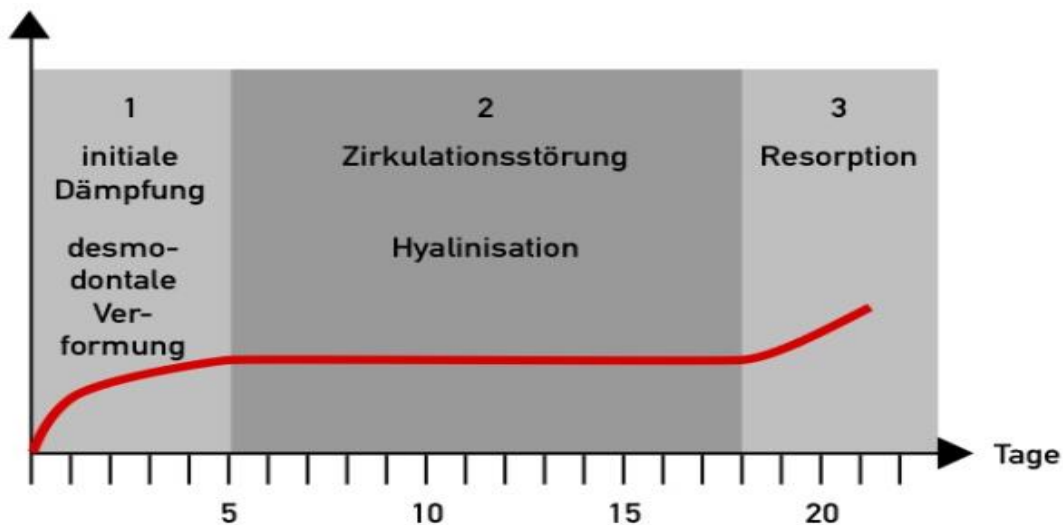


Abb. 2: Darstellung der einzelnen Phasen der Zahnbewegung (nach Diedrich 2000)

Die Phase 1 beschreibt, eine initiale Dämpfung und desmodontale Verformung. Diese Phase dauert 0-5 Tage und erreicht am Ende eine maximale Kompression in den desmodontalen Druckzonen. Phase 2, die Latenzphase, beschreibt die Zirkulationsstörung und Hyalinisation (Jónsdóttir et al. 2012). Dabei kommt es durch die Kompression des Desmodonts zur partiellen

Nekrose von Desmodont und Alveolarknochen. Kommt es zu einer vollständigen Zirkulationsunterbrechung, wird die *Lamina cribriformis* nicht durch das Desmodont resorbiert, sondern unterminierend vom Alveolarkamm aus, was dann als unterminierende Resorption bezeichnet wird. In dieser Phase kommt es bis zu 14 Tage zum Stillstand der Zahnbewegung. Wird die Zirkulation nur teilweise unterbrochen, erfolgt die direkte Resorption, wodurch Phase 2 übersprungen werden kann. In der Konstanzphase, der 3.Phase, ist die weitere Zahnbewegung durch Resorptionsvorgänge am Alveolarknochen möglich. Die Vaskularisation und Zirkulation in den Resorptionszonen ist erhöht. Nach der unterminierenden Resorption kann diese Phase plötzlich einsetzen wenn die Knochenplatte einbricht. Dies entsteht durch ruckartige Bewegungen, welche vermieden werden sollen. Man strebt daher einen sanften Übergang von Phase 1 zu Phase 3 an, mit einer direkten Resorption und ohne eine Hyalinisation herbeizuführen (Engström et al. 1988, Yokoya et al. 1997).

Von Bedeutung für die kieferorthopädische Zahnbewegung sind Biomechanische Faktoren wie Struktur, Dichtigkeit des Knochens und das Ausmaß der Knochenbedeckung der einzelnen Zähne. Vor allem anatomische und mikromorphologische Eigenschaften des Alveolarknochens sind von Bedeutung (Duterloo 1980). Da der Oberkiefer im Gegensatz zum Unterkiefer direkt mit dem *Cranium* verbunden ist, können sich die Spannungen, welche durch Kaukräfte entstehen, gut verteilen. Somit ist im Oberkiefer ein weniger kompakter Knochen nötig. Auch die trabekuläre Struktur ist im Oberkiefer wesentlich graziler. Je höher die Dichte des Knochens und je höher der Anteil der Kompakta im Knochen ist, desto geringer ist die Reaktion bei einer Zahnbewegung. Dadurch wandern die Molaren im Unterkiefer langsamer nach mesial als im Oberkiefer. Bei Extraktionen der 1. Molaren im Unterkiefer findet auf Grund dessen keine körperliche Mesialbewegung, sondern eher eine Zahnkipfung statt (Normando et al. 2009). So erklärt sich der vereinfachte Lückenschluss im Oberkiefer.

Eine kieferorthopädische Zahnbewegung sollte effizient, schonend und mit minimalen Nebenefekten sowohl für den Zahn, als auch für das Gewebe und für den Knochen erfolgen. Dazu ist ein optimales Kräftesystem von entscheidender Bedeutung (Lapatki und Radeke 2014). Um die orthodontischen Kräfte zu bemessen beschrieb A.M. Schwarz 4 biologische Wirkungsgrade. Er legte dabei den kapillaren Blutdruck im Desmodontalspalt von 0,25 N/cm² als Maßstab für die optimalen Kraftgrößen fest (Schwarz 1932). Allgemein sind die für die kieferorthopädische Zahnbewegung erforderlichen Kräfte charakterisiert durch Größe, Richtung, Dauer und Ansatzpunkt.

Die Größe der anzuwendenden Kraft hängt ab von der Wurzeloberfläche des zu bewegenden Zahnes. Dabei tolerieren Zähne mit einer größeren Wurzeloberfläche, z.B. die Molaren, größere Kräfte als Zähne mit kleiner Wurzeloberfläche, wie die zweiten Inzisivi. Die neuere Literatur

empfiehlt kleinere Kräfte von 10-60 cN in der Behandlung anzuwenden, da diese eine effektivere Zahnbewegung und weniger Resorptionen erzeugen (Gonzales et al. 2008, Van Leeuwen et al. 2010). Diese Zahnbewegung ist mit abnehmbaren kieferorthopädischen Geräten, z.B. einer aktiven Platte möglich, bei der primär sehr starke Kräfte wirken und es anschließend zu einem Abfall der Kraftintensität kommt. Kontinuierliche, bzw. dauernde Kräfte, wirken bei der Behandlung mit festsitzenden Apparaturen. Die kontinuierliche Krafteinwirkung ist hier nur so lange gewährleistet, wie die aktiven Elemente wirksam sind.

Der Kraftansatzpunkt ist ausschlaggebend für die resultierende Zahnbewegung. Eine körperliche Zahnbewegung (Translation) findet statt, je näher der Ansatzpunkt am Widerstandszentrum lokalisiert ist. Je weiter der Kraftansatz vom Widerstandszentrum entfernt ist, desto mehr erfolgt eine reine Kronenbewegung bzw. Kippbewegung.

Bei der orthodontischen Zahnbewegung unterscheidet man in verschiedene Grundbewegungen. Dazu gehören körperliche Zahnbewegungen, oder auch Translationsbewegungen, Rotationsbewegungen, kippende Zahnbewegungen, Torque und Vertikale Bewegungen, welche sowohl einzeln als auch in Kombination durchgeführt werden. Von besonderer Bedeutung hierfür, ist die Lage des Widerstandszentrums (WZ) und des Rotationszentrums (RZ) (Smith und Burstone 1985). Das Widerstandszentrum ist definiert als Massenschwerpunkt eines Zahnes. Die Lokalisation ist abhängig von der jeweiligen Wurzelgeometrie des Zahnes, sowie der Höhe des Alveolarkamms. Auch besteht eine Abhängigkeit der Lokalisation bei Attachmentverlust. Dabei wandert das WZ nach apikal. Bei einem einwurzeligen Zahn befindet sich das WZ zwischen zervikalem Wurzeldrittel und halber Wurzellänge. Bei einem mehrwurzeligen Zahn liegt es 1-2 mm apikal der Bi- oder Trifurkation (Bourauel et al. 2007). Das Rotationszentrum ist definiert als ein Punkt, um den sich der Zahn dreht. Die Lage des RZ ist abhängig vom applizierten Drehmoment-Kraft-Verhältnis. D.h., wenn die Wirklinie einer Kraft nicht durch das WZ geht, erfolgt nicht nur eine Translation, sondern immer auch eine Rotation. Je größer das Drehmoment-Kraft-Verhältnis, desto näher liegt das Rotationszentrum am Widerstandszentrum. Liegen Drehmoment und Rotationszentrum zusammen, bewegt sich der Zahn körperlich ohne Rotation. Diese Translationsbewegung umfasst die parallele Verschiebung des Zahnes und der Wurzel. Dabei wird die Achsenrichtung beibehalten. Translationsbewegungen sind jedoch nur möglich, wenn die Kraft durch das WZ des zu bewegenden Zahnes verläuft (Burstone und Pryputniewicz 1980). Dies ist auf Grund der anatomischen Gegebenheiten nur mit einer kombinierten Anwendung der Kräfte und Momente möglich. Über der gesamten Palatinalfläche der Wurzel und des angrenzenden Alveolarknochens entsteht eine Druckzone. Der Parodontalspalt wird in der Druckzone komprimiert und in der Zugzone gedehnt (Reitan 1989). Körperliche Zahnbewegungen bewirken z.B.

das Schließen von Lücken nach Zahnverlust und können nur mit Hilfe von festsitzenden Apparaturen, wie mit der Straight-Wire-Technik, erreicht werden.

Die Zahnrotation beschreibt die Drehung eines Zahnes um seine eigene Längsachse. Durch zwei gleichgroße, entgegen gesetzt wirkende Kräfte im Sinne eines Kräftepaars, erfolgt diese Drehbewegung (Smith und Burstone 1985). Die Spannung wird hier auf das gesamte Parodontalligament verteilt. Dadurch können größere Kräfte appliziert werden. Mit Hilfe von herausnehmbaren Geräten erreicht man eine geringe Rotation. Stärkere Drehbewegungen können mit Multibracketapparaturen, sowie mit gegenläufigen Bändern und Gummizügen erfolgen.

Kippende Zahnbewegungen unterscheidet man in unkontrollierte Kippung und kontrollierte Kippung. Der Kraftangriff der unkontrollierten Kippung befindet sich ca. 10 mm koronal des Widerstandszentrums (Proffit 2000). Das Rotationszentrum liegt ca. 1-2 mm apikal des Widerstandszentrums. Die Position der Zahnwurzel ändert sich hierbei nur wenig. Die Druckzone entsteht bei dieser Bewegungsart nur im zervikalen Drittel und im apikalen Drittel des Alveolarknochens und führt zu einer Kompression des PA-Spalts. Auf den gegenüberliegenden Seiten entstehen Zugzonen mit einem erweitertem PA-Spalt. Diese Bewegung erreicht man durch herausnehmbare Geräte, wie z.B. durch einen Labialbogen oder eine Protrusionsfeder. Die kontrollierte Kippung wird im Gegensatz, mit festsitzenden Apparaturen, wie z.B. über Ketten oder Ni-Ti-Zugfedern erreicht. Dadurch kommt es zu einer Auslenkung der Zahnkrone. Der Kraftansatz befindet sich hier 5-7 mm koronal vom Widerstandszentrum. Das Rotationszentrum liegt am Apex, weshalb der Zahn um seinen Apex rotiert (Lapatki und Radeke 2014).

Unter der Torque-Bewegung versteht man die reine Wurzelbewegung. Dabei liegt der Kraftangriff apikal des Widerstandszentrums und das Rotationszentrum im koronalen Bereich. D.h., der Zahn rotiert hier um seine Schneidekante. Diese Bewegungsart ist mit Hilfe von festsitzenden Apparaturen wie mit der Straight-Wire Technik erreichbar (Wichelhaus 2012).

Zur Korrektur von vertikalen Fehlstellungen (Zahnelongation und -retension), ist eine Zahnbewegung in vertikaler Richtung erforderlich. Die Extrusion beschreibt dabei die Bewegung des Zahnes aus seinem Zahnfach heraus. Dabei werden im PDL Zugspannungen erzeugt, die zu einer Knochenapposition apikal und koronal des Alveolarknochens führen. Die Extrusion bei Einzelzähnen erfolgt in der Regel bei retinierten oder verlagerten Zähnen. Bei der Intrusion erfolgt die Bewegung des Zahnes in seine Alveole hinein. Hier kommt es im apikalen Bereich zu einer Kompression des Parodontalspalts, weshalb hier kleine Kräfte von 0,1-0,5 N zu applizieren sind (Proffit 2000, Wichelhaus 2012, Seiffert 2012).

1.3. Behandlungskonzepte für Lücken im Molarenbereich

Die Therapiemöglichkeiten von Lücken im Molarenbereich, sogenannte Schaltlücken, sind breit gefächert. Es gibt prothetische, chirurgische, kieferorthopädische, und konservierende Lösungen. Entscheidende Einflussfaktoren in der Therapiefindung sind Alter, Morphologie, Funktion, aber auch die ästhetischen Ansprüche des Patienten.

Wesentliche Ursachen für Zahnverlust sind Karies und Parodontitis. Die Folgen des Zahnverlusts führen zu Einbußen der orofazialen Funktion, wie Mastikation, Phonetik, Ästhetik und Okklusion. Um diese Einbußen zu vermeiden, gibt es in der Zahnmedizin verschiedene Möglichkeiten (Lang 1994).

Prothetische Versorgungen von Unterkiefer Molarenlücken, können herausnehmbar oder feststehend sein. Herausnehmbare Lösungen können mittels Prothesen, feststehende Lösungen mittels Brücke oder Implantat getragener Krone erfolgen. Eine Brücke besteht aus Brückenankern und Brückenglied. Dazu werden die Zähne, welche die Lücke begrenzen - die sogenannten Brückenpfeiler - zur Aufnahme der Brückenanker präpariert und überkront. Zwischen den beiden Ankerzähnen besteht somit eine starre Verbindung. Einwirkende Kaukräfte werden über die Brückenpfeiler auf den Zahnhalteapparat übertragen und weitergeleitet, weshalb für solch eine Versorgung die Pfeilerzähne gesunde parodontale Verhältnisse aufweisen sollten. Folgende Indikationen gelten für die Versorgung einer Lücke mit Brückenzahnersatz: Störungen in der Kaufunktion, Phonetik und Ästhetik. Eine Kontraindikation besteht bei zu großer Spannweite, einem zu geringen Restzahnbestand, einem Zustand nach frischer Extraktion, sowie mangelhaften parodontalen Verhältnissen der Pfeilerzähne (Bruhn 1926).

Die Vorteile einer Brückenversorgung liegen in der kurzen Behandlungsdauer, der guten Akzeptanz der Patienten und den gesicherten Langzeitergebnissen (Creugers et al. 1994, Scurria et al. 1998). Nachteile sind der Abtrag von Zahnhartsubstanz und die mögliche Folge einer Sekundärkaries. Auch besteht die Gefahr einer Alveolarkammatrophy in der Lückenregion. Eine Alternative zur konventionellen Brücke stellt die Adhäsivbrücke dar. Die minimalinvasive Präparationstechnik der Pfeilerzähne schont hierbei die Zahnhartsubstanz. Eine Adhäsivbrücke im Seitenzahnbereich ist jedoch nur in besonderen Fällen indiziert sein (Kern 2005). Für den Einsatz im posterioren Kieferbereich liegen noch keine ausreichenden Langzeitergebnisse vor. Die häufigste chirurgische Therapiemöglichkeit für eine Lückenversorgung ist das Implantat. Diese schraubenförmigen künstlichen Zahnwurzeln bestehen aus Titan oder einer Zirkonoxidkeramik. Implantate werden durch ein operatives Verfahren in den Kieferknochen inseriert, heilen über eine bestimmte Zeit ein, und dienen, nach Abschluss der Osseointegration, zur Verankerung von Zahnersatz. Bei zweiteiligen Implantaten perforiert der Implantatpfosten (engl. Abutment) dabei die Schleimhaut und ist über eine Halteschraube mit dem Implantat verbunden. Über das eingeschraubte Abutment wird der Zahnersatz dann verankert. Bei einteiligen Implantaten liegt

keine Trennlinie zwischen dem intraossären und prothetischen Bereich vor. Beide Implantatarten können im Molarenbereich eingesetzt werden. Eine 7-Jahres-Überlebensrate der zweiteiligen Implantate lag in einer Studie von *French et al.* (2014) bei 98,4 %. Die Überlebens- und Erfolgsrate der einteiligen Implantate lag in einer Studie von *Carinci* (2012) bei 91,7 % und 97 %. Indikationen für eine Implantation sind intakte Nachbarzähne, eine Lückenbreite in der Molarenregion von mindestens 9 mm und maximal 13 mm, suffizientes Knochenangebot und die Möglichkeit einer achsengerechten Positionierung (Ehrenfeld und Schwenger. 2000). Kontraindikationen liegen bei einer zu geringen Lückenbreite, nicht ausreichendem Knochenangebot und der Gefahr der Verletzung des *Nervus alveolaris*.

Implantate als Einzelzahnersatz finden in der heutigen Zeit eine immer häufigere Indikation für eine Lückenversorgung. Medizinisch sind Implantate den konventionellen Brücken vorzuziehen, da sie eine gleich gute Tauglichkeit aufzeigen. Vor allem wenn keine Notwendigkeit besteht naturgesunde, an die Lücke grenzende Nachbarzähne zu überkronen. Entscheidend für diese Therapiemöglichkeit ist die Breite der Lücke, in die das Implantat gesetzt werden soll. Wichtiger Anhaltspunkt ist die mesial – distale Breite auf Höhe der Zahnhäule. Hier sollte ein Abstand von mindestens 1,5 mm zum jeweiligen Nachbarzahn vorhanden sein (Salama et al. 1998). Auch die mesiale distale Breite des neben stehenden Zahnhalses sollte gemessen werden, welche einen wichtigen Anhaltspunkt für den Durchmesser des Implantats aufzeigt. Allgemein wird ein Durchmesser von 3,75-4,5 mm empfohlen (Schiegnitz und Al-Nawas 2013). Dies setzt ein ausreichendes Knochenangebot im Lückenbereich voraus. Ist dies nicht gegeben muss vor der Implantation ein chirurgischer Knochenaufbau erfolgen. Von der chirurgischen Insertion bis zur prothetischen Versorgung können teilweise mehrere Monate vergehen. Die längere Behandlungsdauer für eine Implantatversorgung sollte daher immer berücksichtigt werden. Laut einer Studie von *Urban et al.* (2012) liegen bei sofortiger Implantation im Molarengebiet, hohe Verlustraten vor. Die Möglichkeit besteht jedoch, Implantate mit einem niedrigeren Durchmesser (NDI= Narrow Diameter Implants) unter 3,5 mm, zu verwenden. Vor allem in Bereichen mit geringem transversalem Knochenangebot, stellen die NDI ein erweitertes Therapiespektrum dar (Mazor et al. 2012). Ein Knochenaufbau und somit auch eine längere Behandlungsphase kann mit Hilfe der NDI umgangen werden (Schiegnitz und Al-Nawas 2013). Ebenso finden bei geringem vertikalem Knochenangebot vermehrt "Kurzimplantate" Anwendung. Die Replantation oder die Transplantation eines Zahnes ist eine weitere Option der Lückenversorgung nach traumatischem Verlust eines Zahnes oder einer Nichtanlage. Transplantiert werden vorwiegend die dritten Molaren. Therapeutische Misserfolge liegen hier vor allem in der Pulpanekrose, einer infektionsbedingten Wurzelresorption und einer Ankylose. Die Indikation muss hier sehr streng gestellt werden. Erfolgsraten liegen dann bei 94,4 % (Filippi et al. 2004). Entscheidend vor allem

für die Replantation eines Zahns bei traumatischem Verlust, ist die Aufbewahrung des Zahnes. Um die Wahrscheinlichkeit der Revaskularisierung der Pulpa zu erhöhen, sollte der Zahn in einem speziellen Lagerungsmedium (Dentosafe) aufbewahrt werden (Schütz et al. 2012).

Einen kieferorthopädischen Lückenschluss erreicht man mit Hilfe verschiedener Behandlungsgeräte. Dazu gehören festsitzende Apparaturen, wie die Multibrackte-Apparaturen, Platten, funktionskieferorthopädische Geräte, Gummizüge und Schienen (engl. Aligner) (Schopf 2008, Schupp 2010). Ein orthodontischer Lückenschluss in der Molarenregion ist jedoch nur erfolgreich mit Hilfe von festsitzenden Apparaturen. Indikationen für diesen Lückenschluss liegen vor bei ausreichendem Knochenangebot und bei der Neigung der Zahnkronen in die Lücke. Die Indikation ist nicht gegeben, wenn der Umfang eines vorhandenen Knochendefekts zu groß ist, oder bei ausgeprägter Dysgnathie (Bauer et al 1991).

Bestehen größere Zahnlücken wie bei einer Molarenlücke, wird eine körperliche Zahnbewegung benötigt. Um diese Bewegung durchführen zu können, sind hauptsächlich festsitzende Apparaturen indiziert. Um unerwünschte Nebenwirkungen zu vermeiden, werden Apparaturen eingesetzt, die eine spezielle Verankerung besitzen. Dabei unterscheidet man verschiedene Formen der Verankerung, abhängig von der Ausprägung des Engstandes. Die Unterscheidung erfolgt in maximale, mittlere und minimale Verankerung. Bei maximaler Verankerung wird der Lückenschluss durch die Distalisierung der Frontzähne erreicht. Die Molaren werden hier in ihrer Position gehalten. Hilfsmittel sind hier extraorale Geräte wie der Headgear oder intraorale Abstützungskomponente wie der Unterkieferlingualbogen. Die mittlere Verankerung beschreibt den Lückenschluss durch die Mesialisierung der Seitenzähne zur einen Hälfte und der Front- und Eckzähne zur anderen Hälfte. Unter der minimalen Verankerung versteht man den Lückenschluss ausschließlich durch die Mesialisierung der Seitenzähne (Diedrich 2005).

Eine Verankerung kann skelettal und somit direkt im Gaumengewölbe oder im alveolären Knochen vorkommen. Dafür werden heute hauptsächlich Minischrauben aus Titan verwendet. Diese kleinen Implantate werden mit Hilfe eines chirurgischen Eingriffs in den gewünschten Verankerungsort inseriert. Minischrauben sind in der Lage, einen orthodontischen Vierkantbogen aufzunehmen, an dem sich unterhalb ein Loch befindet, welches zur Befestigung von Ligaturen dient. Vorteilhaft ist hier der Aufbau zweier voneinander unabhängiger Kraftsysteme, die einfachere Handhabung und die schnellere Zahnbewegung (Ludwig et al. 2009). Es wirken keine unerwünschten reaktiven Kräfte auf die übrigen Zähne (Fortini et al. 2004). Probleme können durch einen möglichen Schraubenverlust entstehen. Eine ausführliche Aufklärung des Patienten sollte daher erfolgen. Voraussetzung für diese Behandlungsmethode ist das Vorhandensein und die Einordbarkeit des dritten Molaren, um eine Abstützung der Antagonisten zu gewährleisten (Ludwig et al. 2009).

Soll ein Lückenschluss bei einer Lückenbreite von mehr als 3 mm mit Hilfe der konventionellen (parodontalen) Verankerung von distal nach mesial erfolgen, wird der Molar sowohl an der Wurzel als auch an der der Krone nach mesial bewegt. Dies wird jedoch nicht allein durch die Bewegung der Wurzel am Bogen erreicht. Für eine ausreichende Bewegung müssen spezielle Drehmomente wirken. Diese werden an der Wurzel durch einen Teilbogen, eine Aufrichtefeder und an der Krone durch eine Kette oder eine Stahlligatur erreicht (Wichelhaus 2012). Erfolgt die Mesialisierung der ersten Molaren ohne eine skelettale Verankerung, sollte das Therapiekonzept die Profilveränderung als Nebenwirkung berücksichtigt werden. Die Belastung der Ankerzähne kann außerdem zu Mittellinienverschiebung oder zu einer Lingualkippung der Frontzähne führen (Jacobs et al. 2011).

Die letzte Alternative zur Versorgung einer Lücke bietet die konservierende Zahnheilkunde. Durch direkte Zahnverbreiterung besteht die Möglichkeit eine Lücke zu schließen. Die Voraussetzung ist jedoch hier, dass die Lücke nicht größer als 6-7 mm sein darf. Das Material zur Verbreiterung besteht aus Komposit, welches mit Hilfe der Adhäsivtechnik appliziert wird (Staehele 2012).

Tab. 1: Vor- und Nachteile verschiedener Behandlungsmethoden zur Versorgung einer Molarenlücke.

Behandlungsmethode	Vorteile	Nachteile
Brücke	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gute Akzeptanz der Patienten • Kurze Behandlungsdauer • Gute Langzeiterfolge 	<ul style="list-style-type: none"> • Verlust der Zahnhartsubstanz • Gefahr der Alveolarkammatrophie • Risiko einer Sekundärkaries
Adhäsivbrücke	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Verlust der Zahnhartsubstanz • Kurze Behandlungsdauer 	<ul style="list-style-type: none"> • Stark eingeschränkte Indikation • Keine ausreichenden Langzeiterfahrung
Implantat	<ul style="list-style-type: none"> • Schonung der Zahnhartsubstanz • Hoher Langzeiterfolg 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Behandlungsdauer • Erfordert ausreichendes Knochenangebot
Replantation/ Transplantation	<ul style="list-style-type: none"> • Schonung der Zahnhartsubstanz • Erfolgsrate bis 94 % möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Strenge Indikation • Gefahr der Ankylose, Wurzelresorption, Pulpanekrose
Kieferorthopädischer Lückenschluss mit Mischschrauben- Verankerung	<ul style="list-style-type: none"> • Lückenschluss mit eigenen Zähnen • Keine unerwünschten Kräfte auf übrigen Zähne • Schonung der Zahnhartsubstanz • Knochenerhalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Behandlungsdauer • Verankerungsverlust, Schraubenverlust • Dritter Molar muss angelegt sein
Kieferorthopädischer Lückenschluss mit konventioneller Verankerung	<ul style="list-style-type: none"> • Lückenschluss mit eigenen Zähnen • Kein chirurgischer Eingriff notwendig • Knochenerhalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Behandlungsdauer • Mittellinienverschiebung • Profilveränderung
Direkte Zahnverbreiterung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Verblockung der Zähne notwendig • Schonung der Zahnhartsubstanz • Kurze Behandlungsdauer 	<ul style="list-style-type: none"> • Strenge Indikationsstellung • Keine ausreichenden Langzeitergebnisse • Gingivale/parodontale Irritationen sind möglich

1.4. Bildgebende Verfahren in der kieferorthopädischen Diagnostik

Für die kieferorthopädische Diagnostik, sind bildgebende Verfahren von substantieller Bedeutung. Häufig werden mehrere Aufnahmen in verschiedenen Ebenen benötigt, um beispielsweise die Lokalisation verlagerter oder retinierter Zähne zu beurteilen. Die rechtfertigende Indikation für eine bildhafte Darstellung ergibt sich durch die vorherige klinische Untersuchung.

In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen bildgebenden Verfahren mit ihren diagnostischen Möglichkeiten beschrieben.

Orthopantomogramm

Das Orthopantomogramm (OPTG oder Panoramaschichtaufnahme) ist ein zweidimensionales Röntgenverfahren. Es dient hauptsächlich als Übersichtsaufnahme und wird in der Kieferorthopädie überwiegend zur Routinediagnostik verwendet. Daher stellt die Panoramaschichtaufnahme ein wesentliches Instrument für die allgemeine diagnostische Befundung dar (Pasler 2008).

Es gibt Aufschluss über verschiedene Fragestellungen:

- ob eine Vollständigkeit aller Zahnanlagen vorliegt,
- ob überzählige Zähne vorhanden sind,
- ob möglicherweise Zahnretentionen oder dystopische Veränderungen vorliegen,
- ob die Kiefergelenke symmetrisch sind,
- ob Traumabefunde vorliegen und wie groß der horizontale und vertikale Knochen ist (Harzer 2011).

Im Praxisalltag wird häufig zuerst eine Panoramaschichtaufnahme angefertigt um vorliegende klinische Befunde zu unterstützen. Die effektive Dosis für eine digitale Panoramaschichtaufnahme laut internationaler Strahlenschutzkommission ICRP 1990 liegt nach *Ludlow et al.* (2003) bei 6,2 μSv , nach *Gavala et al.* (2009) bei 23 μSv . Die ICRP 2007 welche zusätzlich die Speicheldrüse mit berücksichtigt reichte in der Studie von *Gijbels et al.* (2005) von 4,7 bis 14,9 μSv und lag bei *Grünheid et al.* (2012) bei 21,5 μSv .

Fernröntgenseitenbild

Als diagnostische Grundlage für die Kephalometrie bzw. die Fernröntgenseitenanalyse dient das Fernröntgenseitenbild. Die Darstellung des Schädels erfolgt bei diesem Verfahren in der Seitenansicht (*Norma lateralis*). Mit Hilfe dieses zweidimensionalen Verfahrens, können Gebiss- und Schädelstrukturen sowie Gesichtsteile dargestellt und vermessen werden (Nötzel und Schultz 2009). Diese metrische Analyse des Gesichtsschädels ist für die Kieferorthopädie unabdingbar (Bartelt et al. 2014). Damit eine Aussage über kraniofaziale Beziehungen und Wachstumsvorgänge möglich ist, werden Winkel und Strecken mit Hilfe von definierten anatomischen oder konstruierten Punkten bestimmt. In der Literatur sind mehr als 100 Analyseverfahren beschrieben worden (Vehr 2013). Kritisch anzumerken ist bei dieser Art der Bildgebung die hohe Strahlenbelastung, die für die Patienten besteht (Jacobson und Jacobson 2006). Laut ICRP 2007 liegt die effektive Dosis bei 5,6 μSv (Fuhrmann 2013). In der Literatur finden sich

Werte von 1-3 μSv (Isaacson und Thom, 2001) sowie Werte von 1,6-1,7 μSv (Gijbels et al. 2005) und Werte von 4,5 μSv (Grünheid et al. 2012).

Handröntgenaufnahme

Das zweidimensionale bildgebende Verfahren in Form der Handröntgenaufnahme wird dafür eingesetzt, das zu erwartende Wachstumspotential eines Patienten zu bestimmen. Es kann überprüft werden ob das Wachstum eines Kindes durchschnittlich, verzögert oder beschleunigt verläuft (Herpetz-Dahlmann et al. 2008). Die kieferorthopädische, diagnostische Indikation ist hier gegeben, wenn eine skelettale Diskrepanz zwischen Ober- und Unterkiefer vorliegt. Mit Hilfe dieser Analyse kann anschließend ein Behandlungsplan erstellt werden, die Reihenfolge der Therapieschritte geplant werden sowie ein Behandlungszeitraum festgelegt werden. (Kahl-Nieke 2009, Nötzel et al. 2007, Schopf 1987). In der Literatur taucht immer wieder die kritische Fragestellung nach der Notwendigkeit einer zusätzlichen Handröntgenaufnahme auf und der damit niedrigeren Strahlenbelastung für den Patienten (Stiehl et al. 2009, Flores-Mir et al. 2006). Diverse Studien zeigen, dass die Analyse der Halswirbelkörper im Fernröntgenseitenbild ausreichend ist um eine Aussage über das skelettale Wachstum zu treffen (Stiehl et al. 2009, Lai et al. 2008).

Zahnfilmaufnahme

Zahnfilme dienen häufig als zusätzliche Aufnahme in der kieferorthopädischen Diagnostik. Liegen auffällige Befunde im OPTG vor, dient eine Zahnfilmaufnahme dazu, diese Befunde überlagerungsfrei darzustellen. Vor allem für die präzise Darstellung eines Mesiodens, sind Einzelzahnaufnahmen der Oberkieferschneidezähne diagnostisch relevant, da diese Region im OPTG durch die Wirbelsäule häufig überlagert wird (Harzer 2011). Auch für die genaue Diagnostik von Wurzelresorptionen eignen sich intraorale Zahnfilme besonders (Sameshima und Asgarifar 2001). Die hier auftretende relativ geringe Strahlenbelastung ist ein wesentliches Argument, intraorale Einzelbildaufnahmen den extraoralen Aufnahmen vorzuziehen. Die effektive Dosis pro Zahnfilm liegt bei 1 bis 8,3 μSv (Patel und Sander 2009) und bei einem Zahnfilmstatus bei 388 μSv nach *Ludlow et al* (2008).

Aufbissaufnahme

Ebenfalls eine ergänzende Aufnahme ist die Aufbissaufnahme im Oberkiefer. In der kieferorthopädischen Diagnostik dient sie zur Lokalisation verlagelter Zähne (traumatisch oder atraumatisch) oder zur Lokalisation eines Mesiodens. Auch liefert diese Aufnahme die benötigte Information bei Spaltbildung. Vor allem bei Kleinkindern oder ängstlichen Kindern wird zur orien-

tierenden Übersicht in der Frontzahnregion häufig eine Aufbissaufnahme vorgenommen (Pasler 2008). In der kieferorthopädischen Diagnostik von palatinal verlagerten Eckzähnen wird die klinische und palpatorische Diagnose verifiziert (Helgert 2008). Eine Studie von *Hoffmann* (2008) zeigt jedoch unter anderem, dass die Aufbissaufnahme bei bestimmten vorliegenden Befunden limitiert ist. Er belegte mit seiner Studie, dass eine sehr stark kraniale Verlagerung eines Eckzahns nicht mehr mit Hilfe der herkömmlichen Aufbissaufnahme, jedoch mit Hilfe der DVT, darzustellen ist.

Computertomographie

In der Computertomographie werden skelettale Strukturen dreidimensional abgebildet und können digitalisiert werden. Kieferorthopädische Indikationen liegen hier zum größten Teil in der Diagnostik von knöchernen Strukturen wie Kiefergelenksstrukturen, craniofazialer Fehlentwicklungen und mikromorphologischer Strukturbesonderheiten (Hirschfelder 1994). Allerdings wird in der kieferorthopädischen Diagnostik die Computertomographie nur noch selten genutzt. Der Grund liegt in der höheren Strahlenbelastung für den Patienten. In der Literatur variieren die Angaben der effektiven Dosis immens. *Rogers* (2001) beschrieb die effektive Dosis einer Kopf-Hals-CT von bis zu 6000 μSv . In der Studie von *Cohnen et al.* (2002) wird sogar eine Dosis von nur 150 μSv für ein CT angegeben. *Van der Molen et al* (2007) beschreiben eine Dosis von bis zu 2300 μSv . Ein Jahr später postulierten *Ludlow und Ivanovic* (2008) die effektive Dosis einer Multislice CT von 860 μSv .

Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie ist ein nicht-invasives Verfahren ohne die Verwendung von ionisierender Strahlung. Dieses Verfahren dient in der Kieferorthopädie hauptsächlich zur Diagnostik des *Discus articularis*, zur Beurteilung von Knorpel-, Muskel- und Weichgewebestrukturen und der Beurteilung von Umbauvorgängen im Gesichtsschädel. Vor allem die Beurteilung von Weichgewebestrukturen ist ein entscheidender Vorteil zu den anderen genannten Verfahren. Die Lokalisation und den Zustand der *Disci articulares*, die Feststellung von Gelenkergüssen, den Zustand des Kondylenknochenmarks, sowie Veränderungen des Bandapparates, können mit Hilfe der MRT dargestellt werden (Gutwald et al. 2010, Stelzenmüller und Wiesener 2010). Der Vorteil der MRT zu den anderen Verfahren, liegt in der fehlenden Strahlenbelastung.

Digitale Volumentomographie

Die Digitale Volumentomographie (DVT) auch als „cone beam computed tomography“ bezeichnet, wurde erstmals 1998 in der Zahnmedizin eingeführt (Mozzo et al 1998). Die Bezeichnung „Cone Beam“ beschreibt den kegelförmigen Röntgenstrahl, der von der Röntgenröhre ausgesendet wird und den zu untersuchenden Bereich durchdringt. Die Sender-Detektor-Einheit eines DVTs ist in der Lage bis zu 360° um den Patientenkopf zu rotieren. Hierbei werden zweidimensionale Einzelbilder aufgenommen und mit Hilfe dreidimensionaler Bildrekonstruktionsalgorithmen so umgerechnet, dass ein Volumendatensatz entsteht. Mit nur einem Umlauf ist es bei der DVT möglich, einen dreidimensionalen Datensatz zu gewinnen. Der Datensatz entsteht mit Hilfe dieser Aufnahmetechnik in einer kürzeren Zeit und mit einer geringeren Strahlenbelastung für den Patienten. In der Literatur werden unterschiedliche Werte für die effektive Strahlendosis angegeben. Die Werte reichen von 20,3 bis 43,27 μSv (Hirsch et al. 2008), 13 bis 82 μSv (Loubele et al. 2009) und 17,25 bis 51,06 μSv (Patzelt 2013). Diese Werte werden in der älteren Literatur angegeben. Laut aktuellsten Studien liegt die effektive Strahlendosis einer DVT nach *Qu et al.* (2014) bei 79,1 μSv . Zudem ist die unterschiedliche Größe der abgebildeten Volumina (Field of View, FoV) von maßgeblicher Bedeutung für die effektive Strahlendosis. Man unterscheidet in ein großes, mittleres und kleines FoV. Je nach Hersteller und Gerät, unterscheidet sich die jeweilige Größe dieser Abbildungsvolumina und somit die effektive Strahlendosis.

Das DVT kann laut *Gribel et al.* (2011) in der kieferorthopädischen Diagnostik als ein quantitatives Werkzeug verwendet werden. Die rechtfertigende Indikation für eine DVT liegt laut *Fuhrmann et al.* (2013) vor, wenn durch eine Panoramaschichtaufnahme oder durch die intraorale Aufnahme keine sicheren Erkenntnisse gewonnen werden. Von entscheidender Bedeutung für den Einsatz ist ebenfalls, ob bei einer DVT-Aufnahme neue und notwendige Erkenntnisse erlangt werden. Seit den letzten Zehn Jahren findet die DVT in der kieferorthopädischen Diagnostik eine weitläufige Anwendung. Die DVT liefert eine verbesserte Visualisierung der Zahnstellung, eine detailliertere Darstellung von Skelettmerkmalen sowie der Atemwege und auch des Weichgewebes (Nervina 2012). Vor allem die hochauflösende Darstellung kleinster Hartgewebsstrukturen im Kopf–Halsbereich zeichnet die DVT aus (Dalchow et al. 2006). Mit Hilfe der digitalen Volumentomographie, ist die Verbildlichung von Kiefergelenken und von Knochenangebot bei der Durchführung von Zahnbewegungen sowie die Lokalisation von retinierten und verlagerten Zähnen möglich. Auch bietet die DVT eine sichere Darstellung und Quantifizierung parodontaler Defekte (Misch et al. 2006) sowie die genaue Darstellung von Extraktionsalveolen (Agbaje et al. 2007). Dadurch ist eine erleichterte Befundung sowie eine erhöhte Genauigkeit der Diagnose möglich. Dies führte im Vergleich zur bildlichen Darstellung mit Hilfe von zweidimensionalen Verfahren zu einer unterschiedlichen Diagnose und Behandlungsplanung (Bot-

ticelli et al. 2011, Gomes-Filho et al. 2007, Haney et al. 2010). Ebenfalls ist mit Hilfe der DVT eine ausführliche Diagnostik von Lippen-, Kiefer-, Gaumen-Spalten (LKG-Spalten) möglich. Da die kieferorthopädische Behandlung von Patienten mit LKG-Spalten einer ausführlichen Röntgendiagnostik bedarf, sollte eine rechtzeitige und sorgfältige Planung erfolgen. Gründe hierfür liegen im vermehrten Auftreten von diversen Nichtanlagen, Fehlstellungen und der unterschiedlichen Ausprägung der LKG-Spalte (Müssig et al. 2005). Die kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlung bedarf daher ebenfalls einer präzisen präoperativen bildgebenden Diagnostik. Mit Hilfe eines DVTs ist es mittlerweile möglich, eine genaue Wiedergabe der Patientensituation zu erhalten. Für die weitere chirurgische Behandlung kann somit die präoperative Planung detailgetreu erfolgen (Davids et al. 2012).

Die digitale Volumentomographie bietet eine hervorragende Bildqualität und eine reduzierte Strahlenbelastung (Rossini et al. 2012). Die Vorteile liegen in der Diagnostik und Strahlenhygiene sowie auch in der Datennutzung und Datenerhaltung (Kopp 2011). Nicht nur in der Kieferorthopädie, sondern auch in sämtlichen anderen Fachbereichen der Zahnmedizin, hat sich die digitale Volumentomographie in den letzten zehn Jahren stark etabliert (Christell et al. 2012).

Im folgenden Abschnitt werden die oben genannten konventionellen Röntgenaufnahmen der digitalen Volumentomographie gegenübergestellt:

DVT und OPG:

Mit der heutigen DVT können die gleichen Strukturen wie in einem OPTG dargestellt werden. Der Vergleich von konventionellen OPTGs mit DVT-OPTGs ergab in Studien entweder zumindest eine vergleichbare Qualität (Vandenberghe et al. 2007), oder in der Studie von *Angelopoulos et al.* (2008) sogar einer Überlegenheit des DVT-OPTGs zum konventionellen OPTG. Die effektive Dosis einer DVT kann mit einem sog. „extra low dose“ Protokoll bei nur 16 μSv liegen. Bei zusätzlicher Verwendung eines Schilddrüsenschutzes während der DVT, kann die Dosis auf sogar nur 12 μSv gesenkt werden (Bumann 2014). Dies entspricht einer um 25 % geringeren Strahlenbelastung, welche ein Patient bei einer konventionellen Aufnahme ausgesetzt gewesen wäre.

DVT und FRS:

Immer wieder wird in der Literatur kritisiert, dass die Darstellung eines dreidimensionalen Körpers mit Hilfe der zweidimensionalen Technik Einschränkungen aufweist (Hartmann 2010). Durch die stetige Weiterentwicklung der Untersuchungsmethodik, ist nicht mehr nur die Analyse in der zweidimensionalen, sondern auch in der dreidimensionalen Ebene möglich. Diese Möglichkeit der alternativen bildgebenden Verfahren wurde in verschiedenen Studien beschrieben

(Furmann 2005, Vegter und Hage 2001). Viele Studien untersuchten die 3D-Kephalometrie mit Hilfe der DVT. Der Unterschied zwischen der herkömmlichen Fernröntgenaufnahme und der Alternative mit Hilfe der DVT konstruierten Fernröntgenaufnahme, war in einer Studie von *van Vlijmen et al.* (2009) nicht signifikant. Jedoch lag eine verbesserte Reproduzierbarkeit der Messungen mit der DVT vor. *Chien et al.* (2009) und *Kumar et al.* (2008) legten in ihren Studien die hohe Genauigkeit und Verlässlichkeit der DVT in Bezug auf kephalometrischen Messungen dar. *Farronato* (2012) beschrieb, wie viele andere, die Vorteile der DVT für die Fernröntgenseitenanalyse. Zusätzlich stellte er in seiner Studie die Methode der Direct 3D Cephalometry vor, welche die kieferorthopädische Diagnose zukünftig vereinfachen soll. Jedoch fordert er weitere Studien um diese Methode zu untermauern.

DVT und Aufbissaufnahme

Da mit Hilfe des OPGs, des FRS, des Zahnfilms und der Aufbissaufnahme, Darstellungen nur in der zweidimensionalen Ebene möglich sind, erhält man hierbei nur limitierte Informationen zu Fragestellungen, bei denen verlagerte Zähne wieder korrekt eingeordnet werden sollen. Auch pathologische Veränderungen können in der zweidimensionalen Darstellung keinen ausreichenden Informationsgehalt liefern. Diverse Studien belegen die limitierte Aussagekraft der zweidimensionalen Aufnahmeverfahren. Durch Überlagerungen der Strukturen, Streuungen, Verzerrungen und Bildvergrößerung besteht die Möglichkeit, dass wichtige Informationen nur unzureichend dargestellt werden (Agrawal 2013, Park 2013, Farronato 2012). Dreidimensionale Verfahren wie die Computertomographie und die digitale Volumentomographie liefern eine Bildgebung in mehreren Schichten sowie eine dreidimensionale Rekonstruktion des gesamten Gesichtsschädels.

DVT und CT:

In diversen Studien wurde bereits die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der DVT und der CT gegenübergestellt. In einer Studie von *Holberg et al.* (2005) erwies sich das Dentale CT dem DVT überlegen. Bei Beurteilung von feinen Strukturen im Bereich der Zahnwurzeln und des umgebenden Knochens war hier das Dentale-CT dem DVT überlegen. Auch in einer Studie von *Kyriakou et al* (2010) wurde die Multislice-CT der DVT vorgezogen. Die Begründung lag hier in der konstanten Bildqualität. Die effektive Dosis bei einem Multislice-CT liegt zwischen 335-425 μSv (Jeon 2012, Pasler 2008). Die Indikation für ein CT wird daher mittlerweile eher restriktiv gesehen. Gründe sind die höhere Strahlenbelastung der CT gegenüber dem DVT als strahlenschonendere Methode (Ludlow und Ivanovic, 2008). Daher sollte heutzutage eine sehr strenge Indikation zur Anfertigung einer CT-Aufnahme gestellt werden. Die Studie von

Coppenrath et al (2008) zeigte, dass die effektive Strahlendosis mit der DVT um ein drei- bis vierfaches gesenkt werden kann. In der Literatur sind viele weitere verschiedene Studien zu finden, welche die DVT einer CT vorziehen. Die häufigste Begründung dafür liegt in der niedrigeren Strahlenbelastung für den Patienten. (Silva et al. 2008, Loubele et al. 2009, Suomalainen et al. 2009). Auch in der Implantationsplanung gibt es Untersuchungen welche keinen signifikanten Unterschied zwischen der Genauigkeit der DVT und der CT aufzeigen konnten (Poeschl et al. 2013). Ebenfalls konnte in der Studie von *Honda et al.* (2006) und *Hintze et al.* (2007) kein signifikanter Unterschied zwischen DVT und CT in der Kiefergelenksdiagnostik gefunden werden. Die diagnostische Genauigkeit der knöchernen Veränderung an den Kondylen und oder dem *Tuberculum articulare*, ergab mittels DVT und CT ähnliche Resultate. In einer anderen Studie war das DVT dem CT in Bezug auf die Genauigkeit der linearen Messungen überlegen (Patcas et al. 2012).

DVT und MRT:

Eine Studie von *Chau* (2012) zeigte, dass die Diagnostik des Mandibularkanals mit Hilfe der MRT zuverlässiger ist als mit der DVT. Andere Studien belegen, dass vor allem die genaue Darstellung des Kiefergelenks auch mit der DVT möglich ist (Hilgers et al. 2005). Die Studie von *Kau et al.* (2005) fügt hinzu, dass jedoch die Muskelstruktur oder andere komplizierte Strukturen weiterhin mit der herkömmlichen MRT dargestellt werden sollten. Eine Studie von *Honey et al* (2007) bestätigt, dass die Befundung von Cranio-mandibulären-Dysfunktionen mit Hilfe einer DVT-Aufnahme erleichtert wird. Die Studie besagt, dass durch eine viel genauere Darstellung des Kiefergelenks mit Hilfe einer Volumetomographie, die Dysfunktionen besser erkannt werden können.

2. Fragestellung

Lücken im Bereich der ersten Unterkiefermolaren können prinzipiell mit Hilfe von drei verschiedenen Methoden versorgt werden:

- Brückenversorgung durch Beschleifen der benachbarten Zähne
- Setzen eines Implantates in die Lücke mit anschließender prothetischer Versorgung
- kieferorthopädischer Lückenschluss durch Mesialisieren der zweiten und dritten Molaren

Die zweite und dritte Methode setzt – zumindest ohne zusätzliche operative Maßnahmen zur Verbesserung des aktuellen Knochenlagers – ein ausreichendes transversales und vertikales Knochenangebot voraus. Nach *Ehrenfeld und Schwenger (2009)* sollte ein Implantat im Unterkiefer von mindestens 1 mm Knochen umgeben sein. Das Knochenangebot in der Molarenlücke müsste dazu 2 mm breiter sein als der Durchmesser des zu setzenden Implantates. Bei einer kieferorthopädischen Behandlung ist davon auszugehen, dass das Knochenangebot in der Molarenlücke 1 mm breiter sein sollte, als die transversale Ausdehnung der mesialen Wurzel des zweiten Molaren.

Eine dentale Volumetomografie kann prinzipiell das transversale und vertikale Knochenangebot im Bereich einer Molarenlücke erfassen. Wie reproduzierbar die Vermessung des transversalen und vertikalen Knochenangebotes ist, und wie häufig eine Implantatversorgung bzw. ein kieferorthopädischer Lückenschluss aufgrund des vorhandenen Knochenangebotes in einem klinischen Patientengut überhaupt möglich ist, wurde bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht. Die Präferenz einer möglichen Behandlung hat zugleich auch eine direkte Auswirkung auf die rechtfertigende Indikation zur Anfertigung einer dentalen Volumetomografie. Je gezielter ein/e Zahnarzt/ärztin durch den Einsatz einer dentalen Volumetomografie die individuelle Behandlung planen kann, umso mehr wäre die Anfertigung einer dentalen Volumetomografie im Rahmen der Behandlungsplanung für eine untere Molarenlücke erforderlich.

Mit der vorliegenden Arbeit sollten daher insbesondere die folgenden spezifischen Hypothesen überprüft werden:

1. Die Höhe, Breite und Fläche des Knochenquerschnitts im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist im DVT intraindividuell hinreichend reproduzierbar zu bestimmen.
2. Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert.

3. Das transversale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert.
4. Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter des Patienten.
5. Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter der Lücke.
6. Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind unabhängig vom Geschlecht der Patienten.
7. Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot.
8. Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem vertikalen Knochenangebot in der Lücke.
9. Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot in der Lücke.

3. Methodik

3.1. Allgemeine Methodik

3.1.1. Patientengut

Aus anonymisierten DVT-Datensätzen wurden 100 Patienten ausgewählt. An diesen Patienten erfolgten anschließend die Messungen um die oben genannten Hypothesen zu überprüfen. Von diesen Patienten waren 51 weiblichen und 49 männlichen Geschlechts. Das Gesamalter rangierte von 26 bis 78 Jahren. Das Durchschnittsalter der männlichen Patienten lag bei 54,16 Jahren, das der weiblichen Patienten bei 54,44 Jahren. Das durchschnittliche Alter aller 100 Patienten lag bei 54,3 Jahren.

Tab. 2: Darstellung der Alters- und Geschlechtsverteilung der untersuchten Patienten mit Mittelwert und Standardfehler.

	Anzahl (n)	Alter	Mittelwert	SD
Männlich	49	31 bis 74	54,16	13,004
Weiblich	51	26 bis 78	54,44	9,968
Gesamt	100	26 bis 78	54,3	11,528

3.1.2. DVT-Aufnahmen

Die vorliegenden Datensätze entstammen dem Langzeitarchiv des nationalen 3D-Röntgen-netzwerkes MESANTIS®. Aus den archivierten Datensätzen des MESANTIS®-Netzwerks wurden 1000 Patienten ausgewählt, bei denen DVTs in der Zeit von Februar 2011 bis Juli 2011 angefertigt wurden. Anschließend erfolgte die Festlegung spezifischer Ausschlusskriterien. Ziel war es 100 Patienten zu finden, die folgende Kriterien erfüllten:

- Es sollte eine gleichmäßige Verteilung zwischen den Geschlechtern vorliegen.
- Es gab keine Altersbegrenzung.
- Es sollte eine Unterkiefermolarenlücke im Bereich der ersten Molaren vorhanden sein.
- Die Bilder mussten für die vorgesehenen metrischen Untersuchungen tauglich sein.

Die Aufnahmen wurden mit dem DVT-Gerät „i-CAT classic“ (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA) oder der Sonderedition MESANTIS® *line* (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA) angefertigt. Technische Daten der DVT-Geräte sind unten stehender Tabelle zu entnehmen. Die Bilder wurden durch dentalradiologische Assistenten/-innen des 3D-Röntgeninstituts MESANTIS® angefertigt. Von Zahnärzten/Zahnärztinnen mit gültiger DVT-

Fachkunde wurde eine rechtfertigende medizinische Indikation zur Anfertigungen der DVT-Aufnahmen gestellt. Keine der hier verwendeten DVT-Aufnahmen wurde speziell für diese Arbeit angefertigt. Die entstandenen Aufnahmen der Kopf- und Halsregion der geröntgten Patienten wurden in einem DICOM (*digital imaging and communications in medicine*) -Datensatz erstellt und anschließend über eine spezielle Auswertungssoftware verarbeitet und gespeichert. Über diese Auswertungssoftware sind Ärzte und Zahnärzte in der Lage, die Daten im DICOM-Format an ihren eigenen Computern wiederzugeben, oder an andere Behandler zu versenden.

Tab. 3: Technische Daten der vorhandenen DVT-Geräte.

	iCAT classic	MESANTIS® <i>line</i>
Bilddetektor	Flachfeld, amorphes Silizium (ablesbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)	Flachfeld, amorphes Silizium (erfassbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)
Voxelgröße	0,3 mm oder 0,25	0,3 mm oder 0,25
Graustufen	12 Bit	14 Bit
Bilderfassung	Einzelrotation um 360° (max.)	Einzelrotation um 360° (max.)
Bilderfassungsdauer	20 oder 10 Sekunden	26,9 oder 8,9 Sekunden
Sichtfeld (Field of View)	16 cm x 13 cm (D x H)	16,50 cm x 13,50 cm (D x H)
Röntgenröhrenspannung	120 kV	120 kV
Stromstärke	3-8 mA	3-7 mA

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

3.1.3. Auswertungssoftware und Befundungsmonitor

Die DICOM-Datensätze wurden mit der Software von InVivo® (Version 5.2, Anatomage, San Jose, USA) weiter zu 3D-Graphiken verarbeitet. Diese Software ist in der Lage, das Hartgewebe dreidimensional darzustellen. Diese Darstellung kann verwendet werden, um diverse chirurgische oder kieferorthopädische Eingriffe zu planen und zu simulieren. Sie ermöglicht eine verbesserte präoperative Diagnostik vor allem bei chirurgischen Eingriffen im Kopf-Hals Bereich wie Zystenoperationen, in der Traumatologie, bei raumfordernden Prozessen, bei implantologischen und kieferorthopädischen Fragestellungen, bei der Kiefergelenksdiagnostik sowie bei endodontischen und parodontologischen Fragestellungen. Unter Verwendung diverser Werkzeuge, welche dieses Programm zur Verfügung stellt, ist der Benutzer in der Lage, die Bilder individuell zu verändern, indem er die Bilder beschriftet, verschiedene Vergrößerungen einstellt, oder die Bilder vermessen kann.

Außerdem gibt es die Möglichkeit, für die jeweilige individuelle Fragestellung, die Bilder in verschiedenen Ansichtsformaten darzustellen in dem der Benutzer verschiedene Querschnittansichten erzeugen kann. Die Querschnittwiedergabe kann in der sagittalen, coronalen und axialen Ebene erfolgen (Anatome 2010).

An einem Desktop PC mit dem Betriebssystem Windows 7 Professional wurden die Daten durch dentalradiologische Assistenten/innen des 3D- Röntgeninstituts MESANTIS® ausgewertet. Technische Daten des Befundungsmonitors sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tab. 4: Technische Daten des Befundungsmonitors.

Bezeichnung	EIZO 3 Megapixel RadiForce™ R31 Monitor
Produktionsfirma	Fa. Avnet Technology Solutions GmbH, Nettetal, Deutschland
DIN	6868-57 für Anwendungskategorie B
Bildpunkte	1536 x 2048
Kontrastverhältnis	400:1
Helligkeit/Leuchtdichte	400cd/m ²

Abkürzungen: cd/m² = Candela/Quadratmeter

3.1.4. Messmethodik

Die Datensätze wurden in das Softwareprogramm InVivo5® importiert. Anschließend erfolgte die Überprüfung der oben genannten Hypothesen, mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Voruntersuchung:

Die Höhe, die Breite und die Fläche des Unterkieferknochens bzw. der Zahnwurzel wurden in einer Unterkieferlücke ermittelt. Dies erfolgte in Regio 36 oder 46, sowie an Zahn 37 oder 47. Zuerst wurde der genaue Messbereich festgelegt. Dafür wurde im Programmpunkt „ArchSection“ mit dem Unterpunkt „Vertical Range and Orientation“ die Grenze festgelegt. Da für diese Studie nur der Bereich des Ober- und Unterkiefers von Interesse ist, konnten sämtliche Strukturen außerhalb dieses Bereichs vernachlässigt werden. Die folgende Abbildung (Abb. 7) verdeutlicht die Definition des Messbereichs.

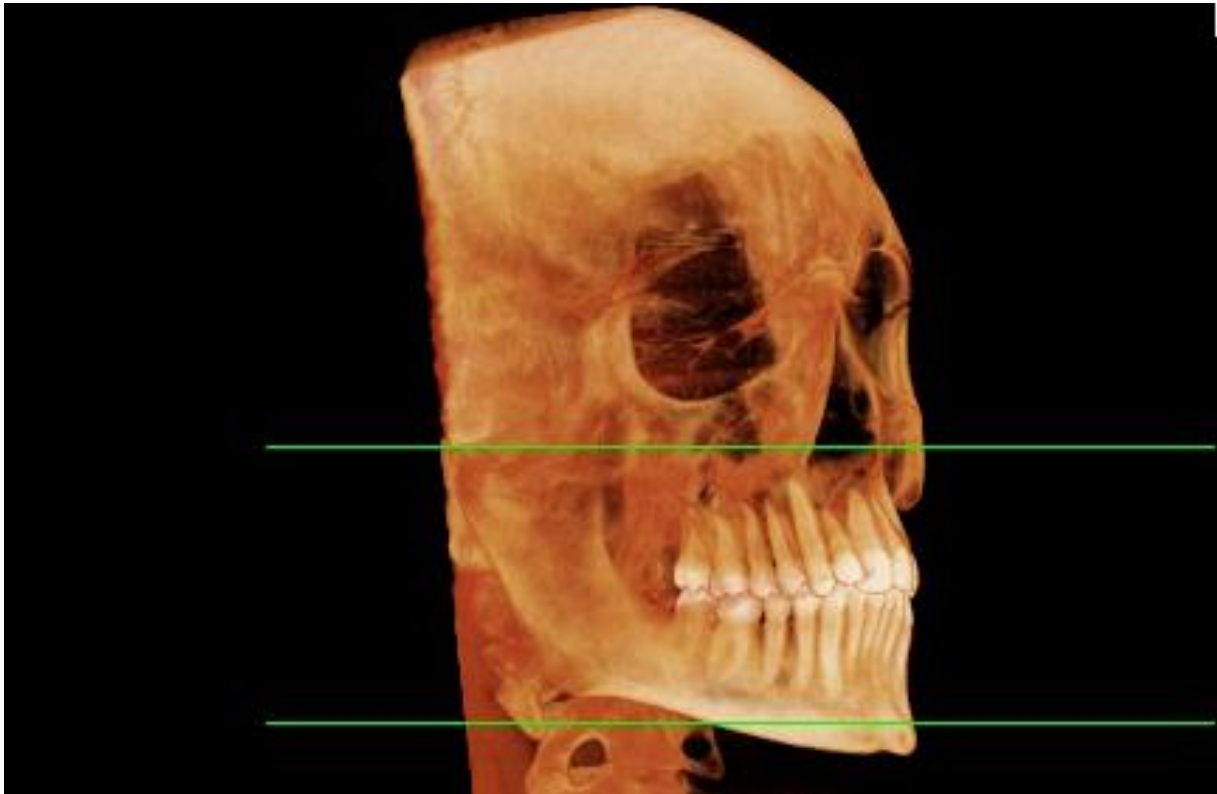


Abb. 4: Festlegung des Messbereichs in der „ArchSection“. Die obere, kraniale Linie und die untere, kaudale Linie grenzen den Bereich ein der für die vorliegende Studie als Grundlage diente.

Weiter musste der Schädel in drei verschiedene Raumebenen ausgerichtet werden. Dies war nötig, um reproduzierbare und verzerrungsarme Messungen durchzuführen. Dazu wurden im Programmpunkt „Sections“ Orientierungswerkzeuge verwendet. Diese Ausrichtung erfolgte immer nach den gleichen folgenden Kriterien:

Zuerst wurde der Unterkiefer in der Horizontalebene ausgerichtet. Dabei wurde der Unterkiefer jedes Mal so ausgerichtet, dass die distobukkale Fläche des 3ers durch den Mittelpunkt des 4ers, 5ers und 7ers zeigte, und sich somit die Zähne von 34 bzw. 44 auf 37 bzw. 47 in einer Ebene befanden. Von dieser horizontalen Ausrichtung ausgehend, erfolgte die Ausrichtung in der sagittalen Ebene. Hier wurde der Unterkiefer so ausgerichtet, dass sich die Inzisalkante des 3ers und die Höckerspitzen des 7ers auf der gleichen Ebene befanden. Zuletzt erfolgte die Ausrichtung in der Koronarebene.



Abb. 5: Ausrichtung des Unterkiefers in der Horizontalebene. Durch Rotation des Unterkiefers zeigt die Sagittalebene (grün) mittig durch die Lücke 45-47. Die Horizontalebene (blau) durchquert die Lücke in Regio 46.

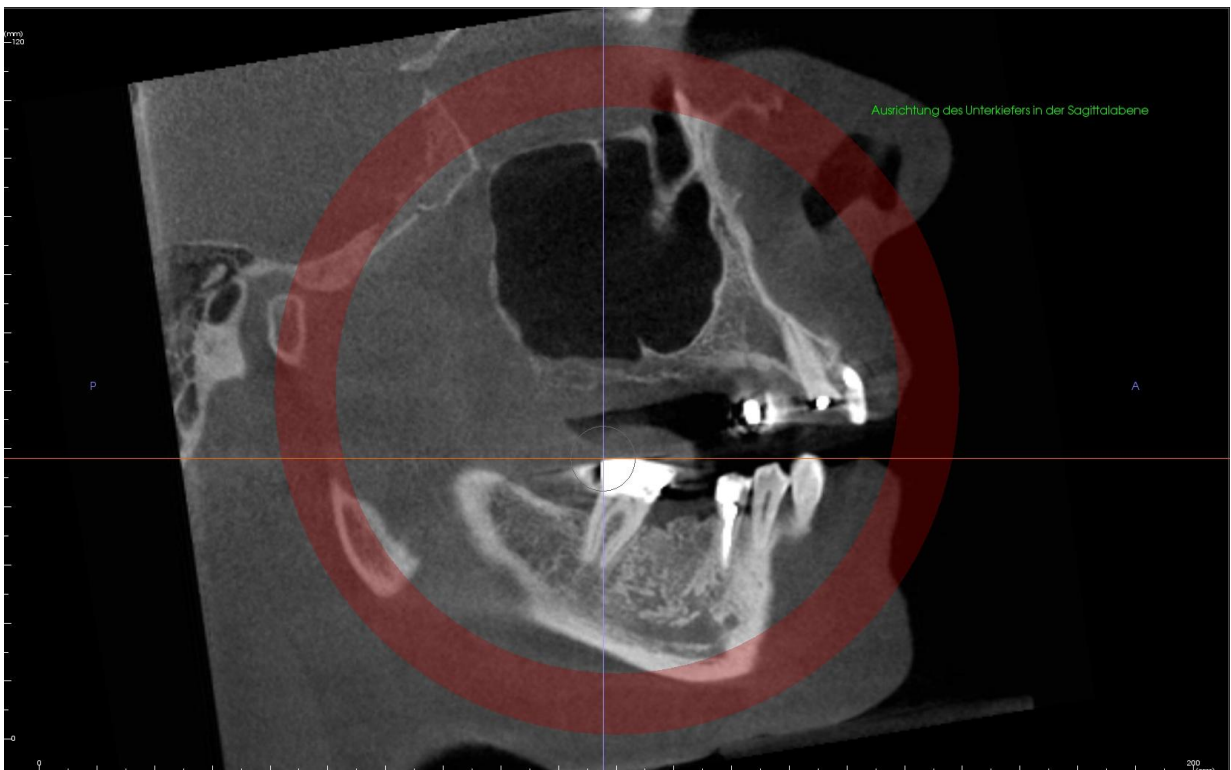


Abb. 6: Ausrichtung des Unterkiefers in der Sagittalebene. Zahnachse (blau) und Horizontalebene (rot) stehen senkrecht zu einander und kreuzen sich an der distobukkalen Höckerspitze des zweiten Molaren.

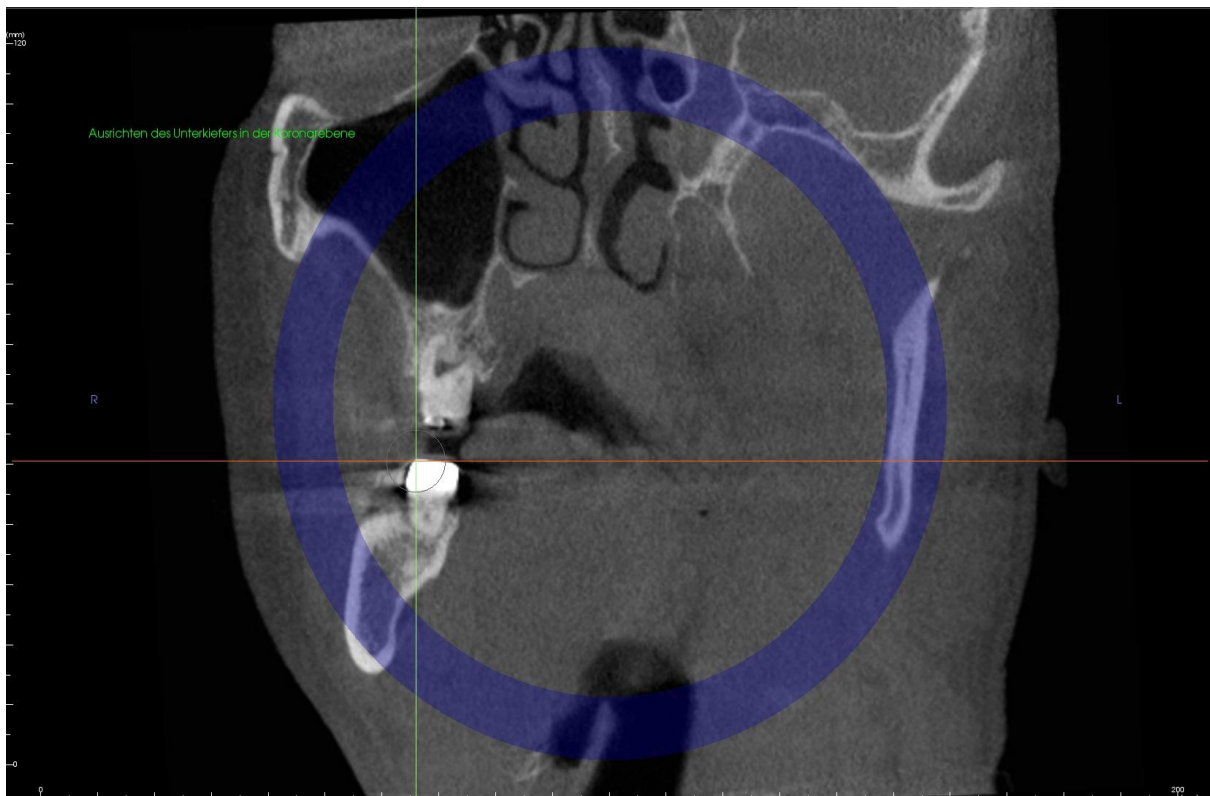


Abb. 7: Ausrichtung des Unterkiefers in der Transversalebene. Zahnachse (grün) und Horizontalebene (rot) stehen senkrecht zu einander und kreuzen sich auf der Okklusalfäche des zweiten Molaren.

3.1.5. Statistische Auswertung

Die oben genannten Haupthypothesen dienten bei den folgenden statistischen Methoden als Nullhypothese und wurden mit Hilfe nachfolgender statistischen Methoden untersucht.

Die Datensammlung erfolgte mit Hilfe des Microsoft Office Excel 2007 Programm. Die statistischen Berechnungen erfolgten mit dem Statistikprogramm SPSS Version 20.0. Dabei wurden von allen Messergebnissen jeweils der Mittelwert (arithmetisches Mittel), die Standardabweichung, Standardfehler, der Medianwert sowie der Minimum- und Maximumwert errechnet und dargestellt. Die Ergebnisse wurden graphisch mittels Blockdiagrammen (Box-Whisker-Plots) oder Streudiagrammen (Scatter-Plots) dargestellt.

Grundsätzlich dienen die statistischen Test dazu, die oben genannten Hypothesen zu bestätigen oder zu verwerfen. Ein wesentlicher Test ist der Signifikanztest, der für viele weitere Testverfahren Grundlage ist.

Signifikanztest

Signifikanz bedeutet im statistischen Sinne, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Unterschiede zwischen Messgrößen durch Zufall zustande kommen, unter einer bestimmten Schwelle liegt (Mengering 2011). In diesem Test geht es darum, die Irrtumswahrscheinlichkeit abzuschätzen. Dafür wurde das Signifikanzniveau α (Alpha) festgelegt.

Die Signifikanzniveaus sollten 5 % (signifikant) oder 1 % (hoch signifikant) betragen um verlässliche Ergebnisse zu erzielen. $\alpha = 0.05$ bedeutet, dass die maximal zulässige Wahrscheinlichkeit eine eigentlich richtige Nullhypothese (H^0) irrtümlich abzulehnen, 5 % beträgt. Umgekehrt bedeutet dies, es liegt eine Wahrscheinlichkeit von 95 % vor, dass die Nullhypothese als richtig bestätigt werden kann. In dieser Studie wurde α mit 5 % festgelegt. (Rasch et al. 2006)

Die in der hier vorliegenden Studie verwendeten Signifikanztests sind der T-Test, der Mann-Whitney-Test oder der U-Test. Um zu bestimmen welcher Signifikanztest angewendet wird, musste zuerst ein Test auf Normalverteilung erfolgen. Dafür wurde hier der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest verwendet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest:

Hier handelt es sich um einen nicht parametrischen (verteilungsfreien) Test zur Überprüfung auf die Normalverteilung (Lopes et al. 2007). Es wird überprüft, ob die Verteilung einer Stichprobenvariablen mit einer theoretischen Verteilung übereinstimmt oder nicht und kann auch für kleinere Stichproben angewendet werden (Eckstein 2006). Die Abweichungen der theoretischen Verteilung von der beobachteten Verteilung werden in den Feldern absolut, positiv und negativ dargestellt. Lag eine Normalverteilung vor wurde anschließend der T-Test oder der Mann-Whitney-Test durchgeführt.

Zweistichprobentest T-Test für unabhängige Stichproben

Er dient zur Überprüfung der Gleichheit der Mittelwerte zweier unabhängiger Stichproben. (Kuckartz et al. 2013). Dieser Test wird angewendet, wenn die ermittelten Werte normal verteilt sind (Herkner et al. 2011). Dazu wird der p-Wert ermittelt, der angibt, wie extrem das Ergebnis ist. Die festgesetzte Grenze, das Signifikanzniveau, liegt bei 5 %. Ein kleiner p-Wert bedeutet dabei, dass das Ergebnis mehr gegen die Nullhypothese spricht. Somit bedeutet $p < 0,05$: das Ergebnis ist statistisch signifikant und gegen die Nullhypothese. Im Gegensatz bedeutet $p > 0,05$: das Ergebnis ist nicht signifikant.

Zweistichproben T-Test für abhängige Stichproben

Bei diesem Test werden zwei paarweise verbundene Stichproben untersucht. Diese Stichproben können z.B. zwei Messungen (Messwiederholungen) sein, welche an der gleichen Untersuchungseinheit gewonnen wurden (Rasch et al. 2006). Es wird überprüft, ob sich die mittlere Differenz der Messwerte unterscheidet. Eine Normalverteilung der Differenzen wird vorausgesetzt.

Bland-Altman's Methodenvergleich

Dieser statistische Test vergleicht zwei Messmethoden miteinander. Er überprüft, ob eine Übereinstimmung zwischen den Messmethoden vorliegt oder nicht (Bland und Altman 2010). Das Bland-Altman Diagramm ist eine graphische Darstellungsmethode für den Vergleich zweier Messmethoden S^1 und S^2 . In diesem Diagramm werden die Mittelwerte der beiden Messmethoden dargestellt, sowie auch die Differenzen dieser Messmethoden. Dieses Diagramm bietet eine optische Beurteilung über die Schwankungsbreite der Übereinstimmung. Außerdem wird dargestellt, ob es zu einer Verschiebung der Messwerte gekommen ist sowie zu Abweichungen der Methoden (Bland und Altman 1986, Bland und Altman 1999).

Methodenfehler nach Dahlberg

Dieses statistische Verfahren beschreibt das Ausmaß der Schwankungsbreite zweier ermittelter Messreihen derselben Grundgesamtheit. Durch diese Methode können die Fehler, welche während eines Messvorgangs aufgetreten sind, quantitativ erfasst werden (Springate 2012). Der Methodenfehler wird mit folgender Formel berechnet:

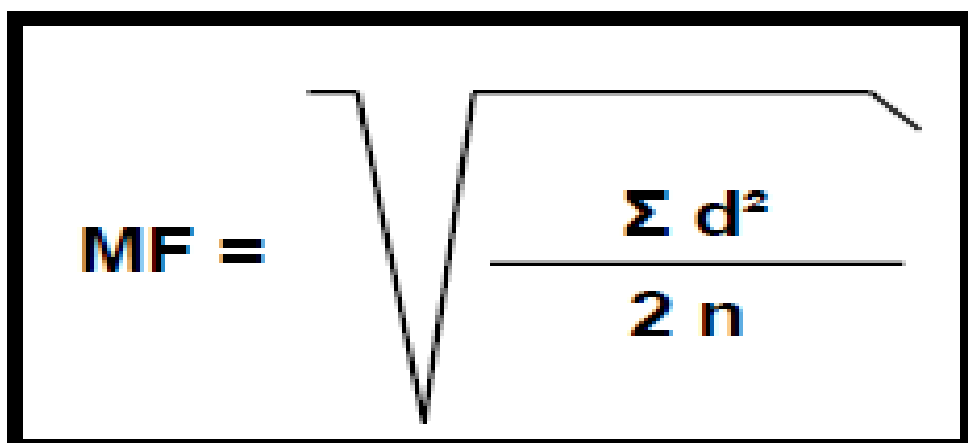

$$MF = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

Abb. 8: Formel für die Berechnung des Methodenfehlers nach Dahlberg: MF = Methodenfehler, $\sum d^2$ = Summe der Differenzen der beiden Messungen zum Quadrat, $2n$ = Anzahl der Messungen

Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston

Der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston stellt das Verhältnis zwischen dem Methodenfehler nach Dahlberg und der Gesamtvarianz dar. Er erlaubt eine Aussage über Wiederholbarkeit einer Variablen innerhalb einer Studie. Folgende Formel wird dazu verwendet:

$$R = 1 - d^2/S^2$$

Abkürzungen: R = Zuverlässigkeitskoeffizient, d = Methodenfehler nach Dahlberg, S = gesamte Varianz

Für zuverlässige Messungen soll der Koeffizient über 0,97 liegen (Mitgaard et al. 1974), jedoch ist ab 0,90 eine klinisch akzeptable Genauigkeit gegeben (Houston 1983).

Man-Whitney-U-Test:

Hier handelt es sich ebenfalls um einen nicht parametrischen Test, der zum Vergleich zweier unabhängiger Stichproben dient. Hier werden die Messwerte nicht direkt analysiert, sondern die Rangplätze, die ihnen zugeordnet werden. Für alle Beobachtungen beider Stichproben wird eine Rangfolge festgelegt und jedem Wert eine Rangzahl zugeordnet. Die Grundlage bilden dann sog. gerichteten Rangplätze, deren Summen zur statistischen Bewertung dienen (Janssen und Laatz 2009).

Rangkorrelation nach Spearman:

Dieses nicht parametrische Verfahren berechnet den Rangkorrelationskoeffizienten zwischen zwei Variablen. Dieser Koeffizient ist ein Maß für die Stärke eines monotonen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen (du Prel et al. 2010). Diese Variablen sind ordinalskaliert und es liegen unabhängige Beobachtungspaare vor. Es werden ebenfalls Rangplätze analysiert. Die Rangkorrelation zeigt an, inwieweit die zwei Rangreihen systematisch miteinander variieren. Es wird die Differenz zwischen den Rängen beider Variablen für jede Beobachtung berechnet. Anschließend wird der Korrelationskoeffizient berechnet. Mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten beschreibt man die Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen. Der Korrelationskoeffizient liegt zwischen -1 bis +1, woraus sich ein negativer bis positiver Zusammenhang ergeben kann. Liegt der Wert bei -1, besteht ein negativer Zusammenhang, liegt er bei +1 besteht ein positiver Zusammenhang. Bei einem Wert von 0 liegt kein Zusammenhang vor. Bei dieser Statistik wird, im Gegensatz zu Pearson, kein linearer Zusammenhang vorausgesetzt (Cleff 2011).

Korrelation nach Pearson:

Hier wird ein Korrelationskoeffizient berechnet, der die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen zwei quantitativen Größen angibt (du Prel, Röhrig et al. 2010). Die korrelierenden Größen hierfür sind normalverteilt. Zudem liegen unabhängige Beobachtungspaare vor. Wie oben beschrieben, liegt der Korrelationskoeffizient zwischen -1 und +1. Folgende Aussagen können daraufhin getroffen werden, unter der Voraussetzung, dass der ermittelte Korrelationskoeffizient signifikant ist (Cleff 2011). Bei einem Wert von 0,0 bis 0,2 liegt kein oder ein geringer linearer Zusammenhang vor. Bei Werten zwischen 0,2-0,5 liegt ein mäßiger linearer Zusammenhang vor. Liegen die Werte zwischen 0,5 bis 0,8 wird ein deutlicher linearer Zusammenhang angenommen. Werte zwischen 0,8 bis 1,0 ergeben einen hohen bis perfekten linearen Zusammenhang.

3.2. Spezielle Methodik

3.2.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter im DVT

Nachdem der Unterkiefer in die drei Raumebenen ausgerichtet wurde, erfolgte anschließend die spezielle Ausrichtung des Unterkiefers um die Messparameter Höhe, Breite und Fläche des Unterkieferknochens in den verschiedenen Ebenen darzustellen. Hierfür wurde eine obere und eine untere Bezugsebene festgelegt.

Die obere Bezugsebene stellte die Okklusionsebene dar. Die Okklusionsebene (Kauebene) ist definiert als die Verbindungslinie zwischen dem Inzisalpunkt, dem Berührungspunkt der Schneidekanten der beiden mittleren unteren Inzisivi und dem höchsten bukkalen Höcker der zweiten Unterkiefermolaren beiderseits (Lehmann, Hellwig et al. 2012).

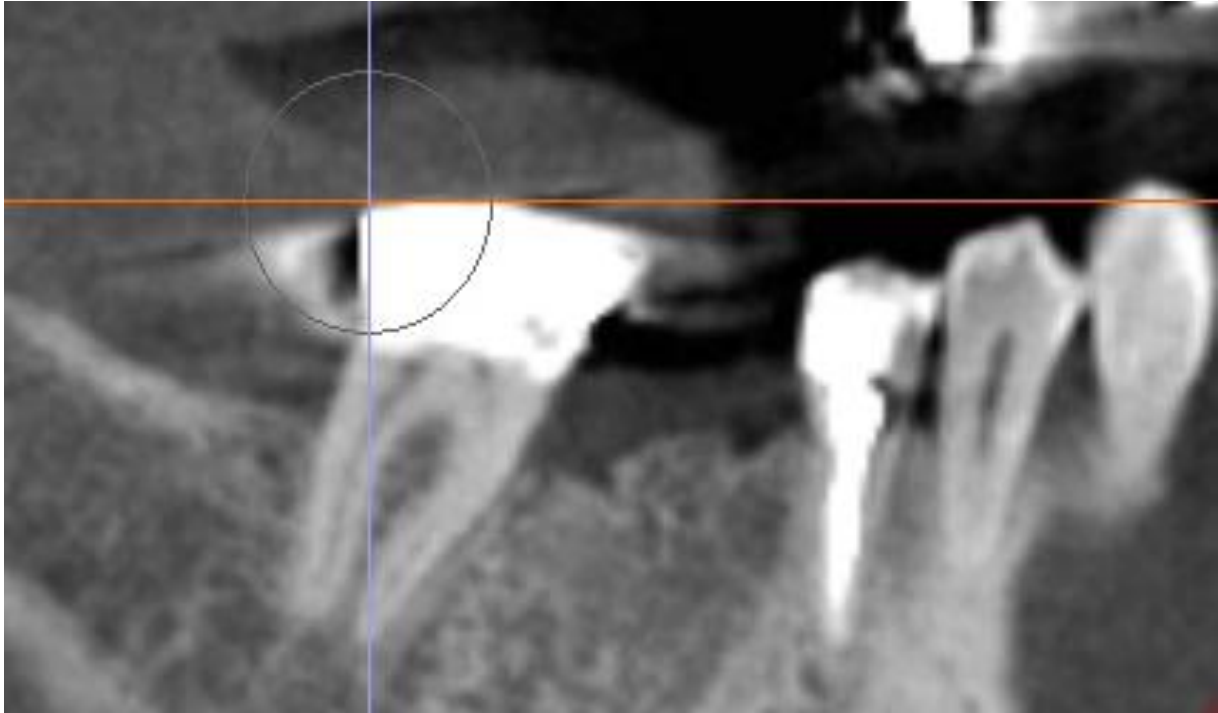


Abb. 9: Ansicht des Unterkiefers in der Sagittalebene. Dargestellt ist die Okklusionsebene (rot).

Von der Okklusionsebene - der oberen Bezugsebene – aus, wurde von Zahn 34 bzw. 44 ein definierter Abstand von 19 mm gewählt und eine neue Bezugsebene konstruiert, die untere Bezugsebene. Diese beiden Bezugsebenen stellten die Grundlage der weiteren Messungen dar.

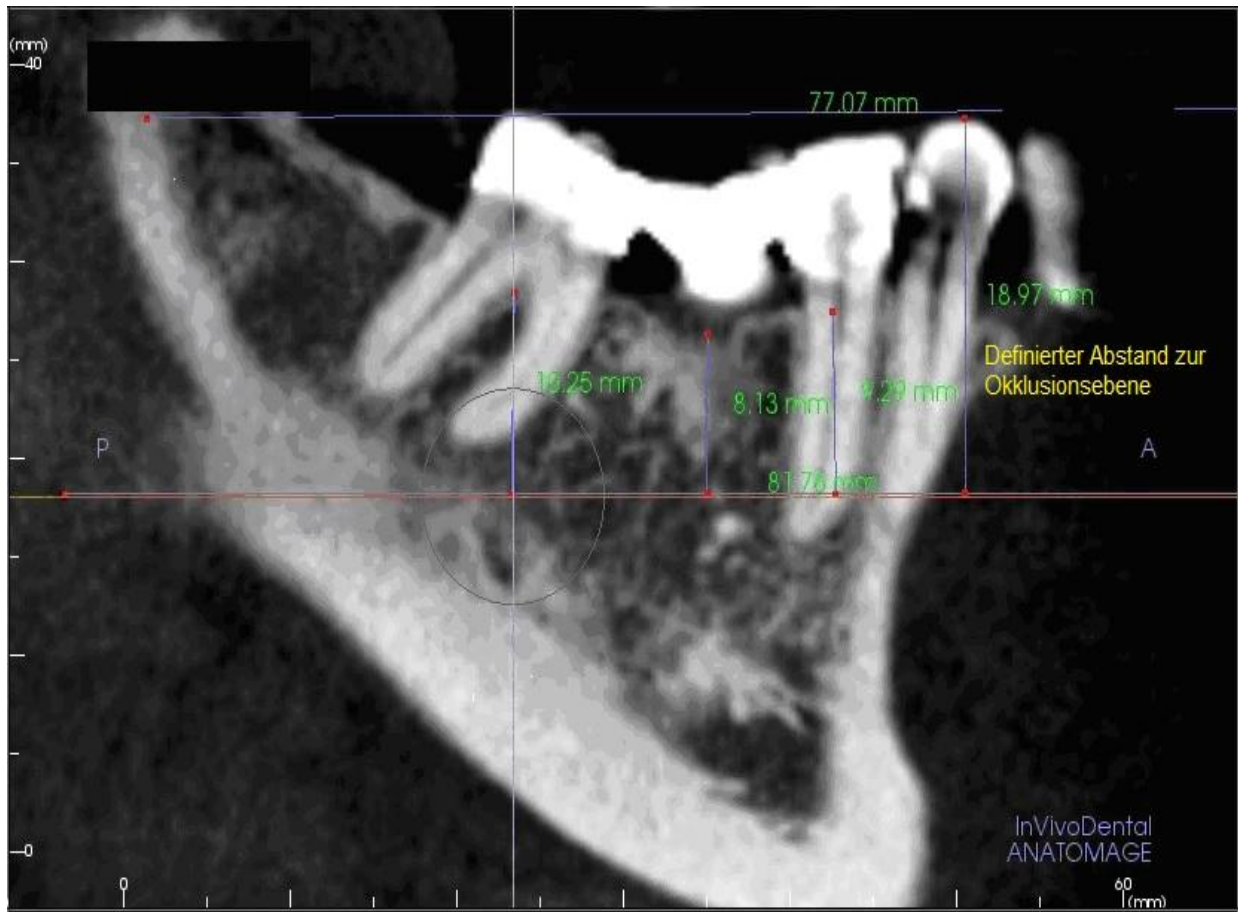


Abb. 10: Ansicht des Unterkiefers in der Sagittalebene. Die untere Bezugsebene (rot) wurde in einem definierten Abstand von 18,97 mm zur oberen Bezugsebene, Okklusionsebene, (blaue horizontale Linie) festgelegt.

Anschließend wurden die Messparameter Höhe, Breite und Fläche des Unterkieferknochens anhand der oberen und unteren Bezugsebene ermittelt.

Die Messung der Höhe erfolgte an den Wurzeln der folgenden Unterkieferzähne 35 bzw. 45 (Höhe 5) und 37 bzw. 47 (Höhe 7) und am Unterkieferknochen in der Lücke Regio 36 bzw. 46 (Höhe 6). Auf Höhe der Bifurkation der Wurzeln der 7er, auf Höhe der tiefsten Einsenkung in Regio 36/46 und auf Höhe des Alveolarfortsatzes der 5er Wurzel, wurde ein Lot auf die untere Bezugsebene gefällt und dieser Abstand gemessen. Die Streckenmessung erfolgt mit Hilfe des Softwarewerkzeugs „Lineal“. Die Knochenhöhe an Zahn 35 wurde für die folgenden statistischen Berechnungen dieser Studie nicht weiter berücksichtigt. Es ergaben sich insgesamt 8 Messparameter, mit denen die folgenden Statistischen Berechnungen durchgeführt wurden.

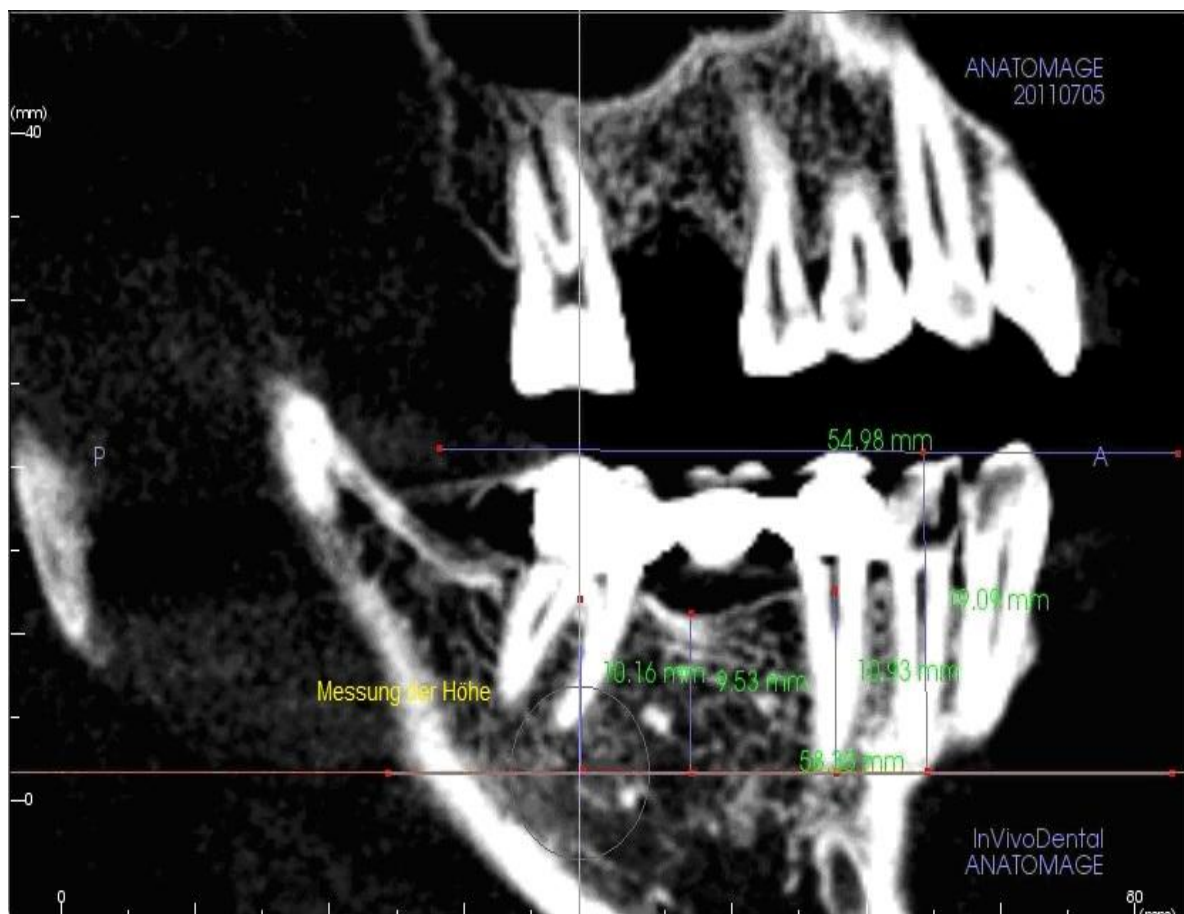


Abb. 11: Ansicht des Unterkiefers in der Sagittalebene. Die Messung der Knochenhöhe von Zahn 35 mit 10,93 mm, in Regio 36 mit 9,53 mm und der Bifurkation des Zahns 37 mit 10,16 mm.

Die Messung der Breite erfolgte an den Wurzeln der Unterkieferzähne 37 bzw. 47 und am Unterkieferknochen Regio 36 bzw. 46. Hierfür erfolgten 4 Messungen. Die Breite der mesialen Wurzel des Zahns 37 bzw. 47 wurde einmal auf Höhe des Alveolarfortsatzes (Alv) dieser Zähne gemessen (Breite 7er Alv). Ein weiteres Mal wurde die Breite des 7ers auf Höhe des Alveolarfortsatzes minus 2 mm in Regio 36/46 gemessen (Breite 7er Einsenkung). In der Zahnücke Regio 36 bzw. 46, wurde die Breite des Unterkieferknochens ermittelt. Hierfür wurde die Breite auf Höhe des Alveolarfortsatzes, die bei Zahn 37 bzw. 47 ermittelt wurde, auf Regio 36/46 übertragen (Breite 6er Alv). Die Breite auf Höhe des Alveolarfortsatzes, wurde hier graphisch nicht dargestellt. Anschließend wurde in einem definierten Abstand, von 2 mm, unterhalb dieser gewonnenen Breite (Breite 6er Alv), die Breite des Knochens in Regio 36/46 ein weiteres Mal bestimmt (Breite 6er Einsenkung).



Abb. 12: Ausrichtung des Unterkiefers in der Transversalebene. Darstellung der Messung der Breite der mesialen Wurzel von Zahn 37. Die obere blaue horizontale Linie stellt die Breite der 7er Wurzel mit 7,2 mm auf Höhe des Alveolarfortsatzes dar. Die untere blaue horizontale Linie stellt die Breite der 7er Wurzel mit 6,45 mm auf Höhe der tiefsten Einsenkung von Regio 36 dar.

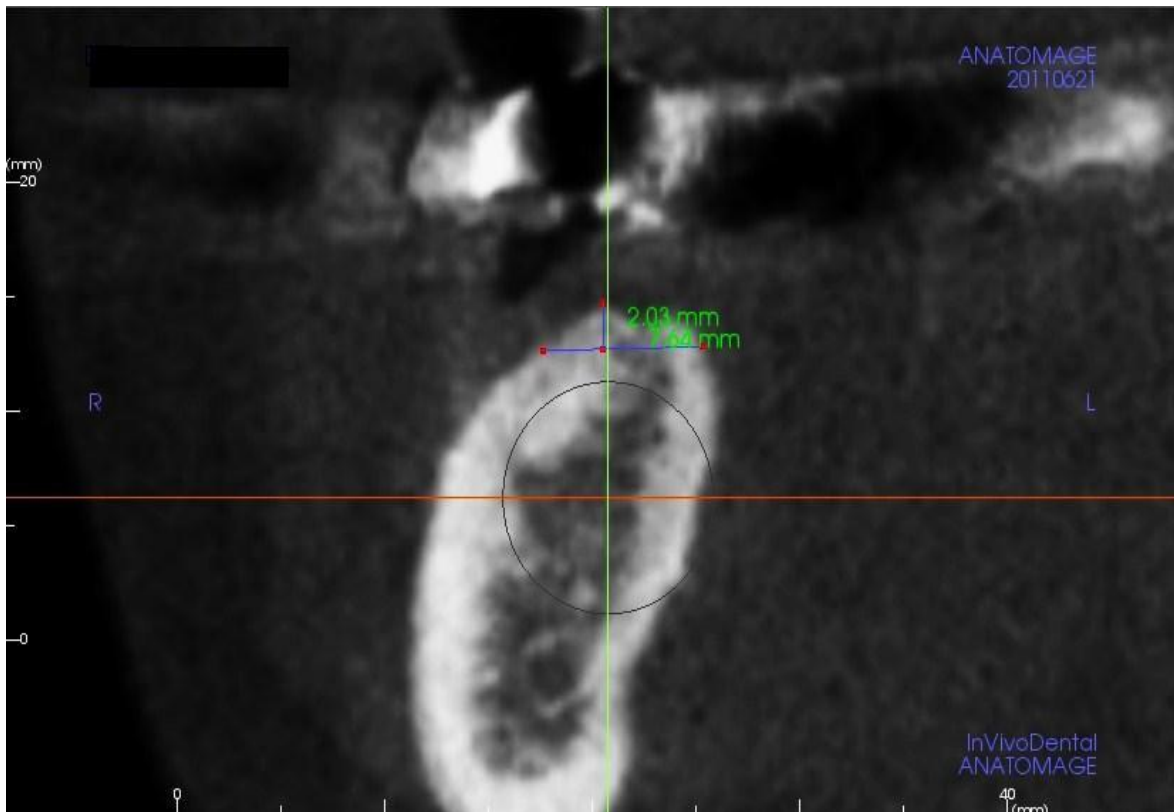


Abb. 13: Ausrichtung des Unterkiefers in der Transversalebene. Darstellung der Messung der Breite des Unterkieferknochens in Regio 46. Auf der Ebene des Alveolarfortsatzes von Zahn 47 wurde diese Ebene in Regio 46 übertragen und 2,03 mm von der Knochenbreite abgezogen. Dies ergab die Breite der Einsenkung von 7,67 mm.

Die Flächenmessung erfolgte mit Hilfe des Softwarewerkzeugs „Fläche“. Die Messung der Knochenquerschnittsfläche erfolgte an den Unterkieferzähnen 37 bzw. 47 und am Unterkieferknochen Regio 36 bzw. 46. Bei der Messung der Flächen wurde nicht die gesamte Fläche des Knochens berechnet. Die Messung erfolgte jeweils im oberen Drittel des Knochens, auf Höhe der unteren Bezugsebene, die anfangs festgelegt wurde. Diese Bezugsebene stellte die apikale Begrenzung der Messungen dar.

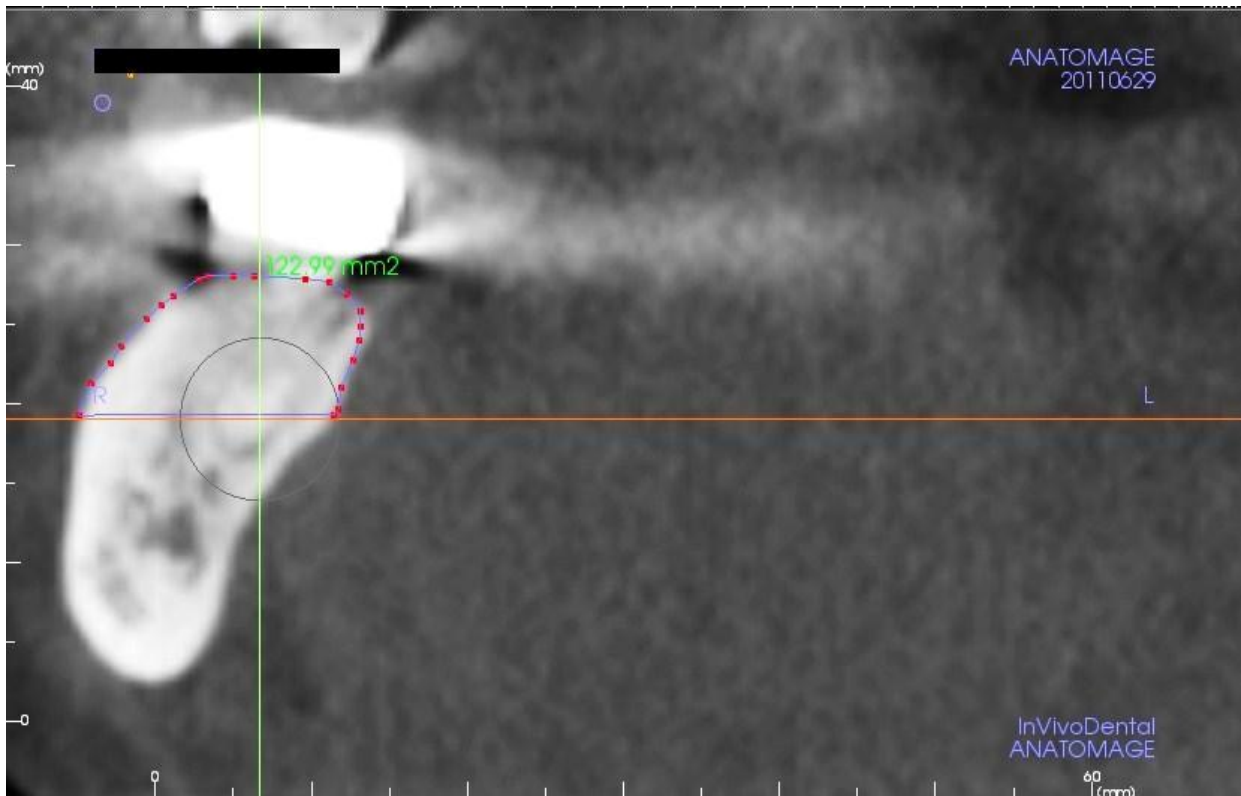


Abb. 14: Ausrichtung des Unterkiefers in der Transversalebene. Messung der Knochenquerschnittsfläche von Zahn 37 ergab 122,99 mm². Die rote Horizontale stellt die untere Bezugsebene dar, die als apikale Begrenzung der Messung diente.

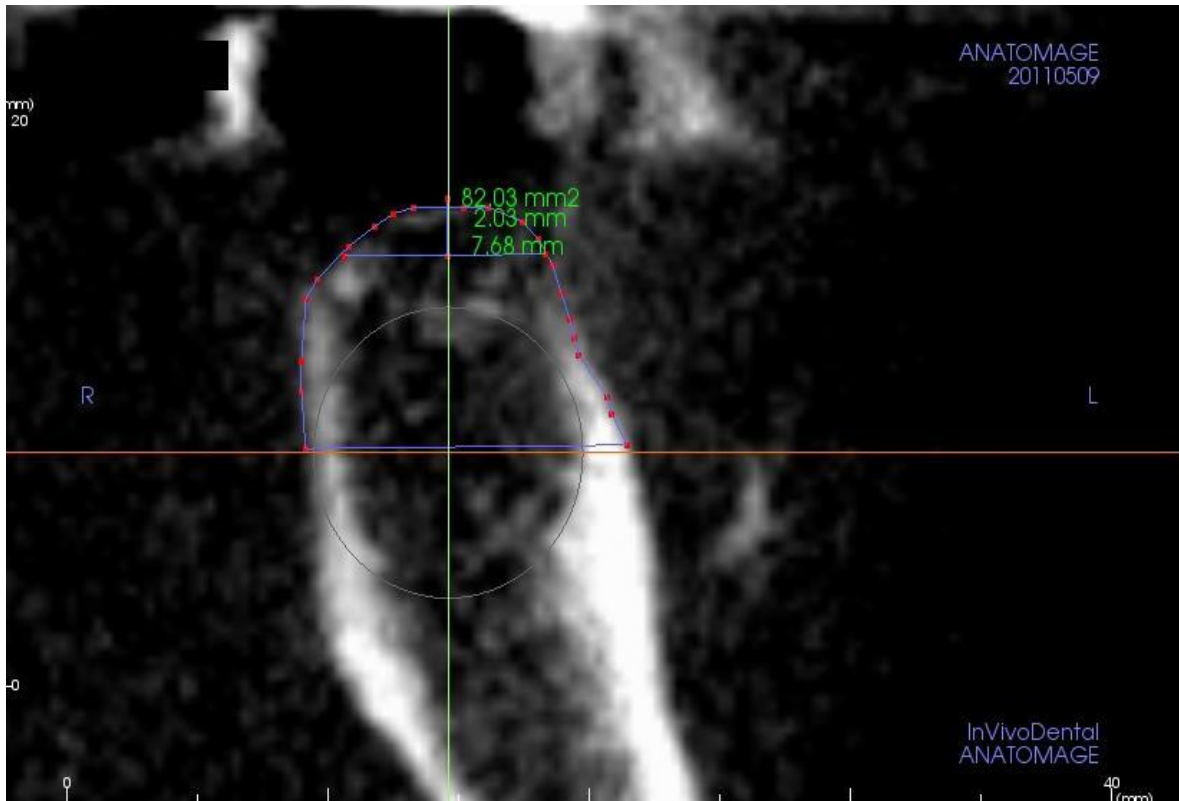


Abb. 15: Ausrichtung des Unterkiefers in der Transversalebene. Messung der Knochenquerschnittsfläche in Regio 36 ergab 7,68 mm². Die rote Horizontale stellt die untere Bezugsebene dar die als apikale Begrenzung der Messung dar.

Zur Überprüfung der Richtigkeit der Flächenmessung, erfolgt eine Kontrollmessung in der „Cross Section“. Dazu wurde zuerst der Messbereich in der Horizontalebene festgelegt. Mit Hilfe des Softwarewerkzeugs „justierbarer Bogen“ konnte der Bereich definiert werden. Die Schnittebene, Cross-Section, stellen die grünen Schichtebenen dar. Anschließend wurden 3 Schnittebenen (Cross-Sections) in separaten Fenstern dargestellt an denen die Flächenmessung des 7er erneut erfolgte. In Abbildung 15 ist eine der 3 Schnittebenen dargestellt.

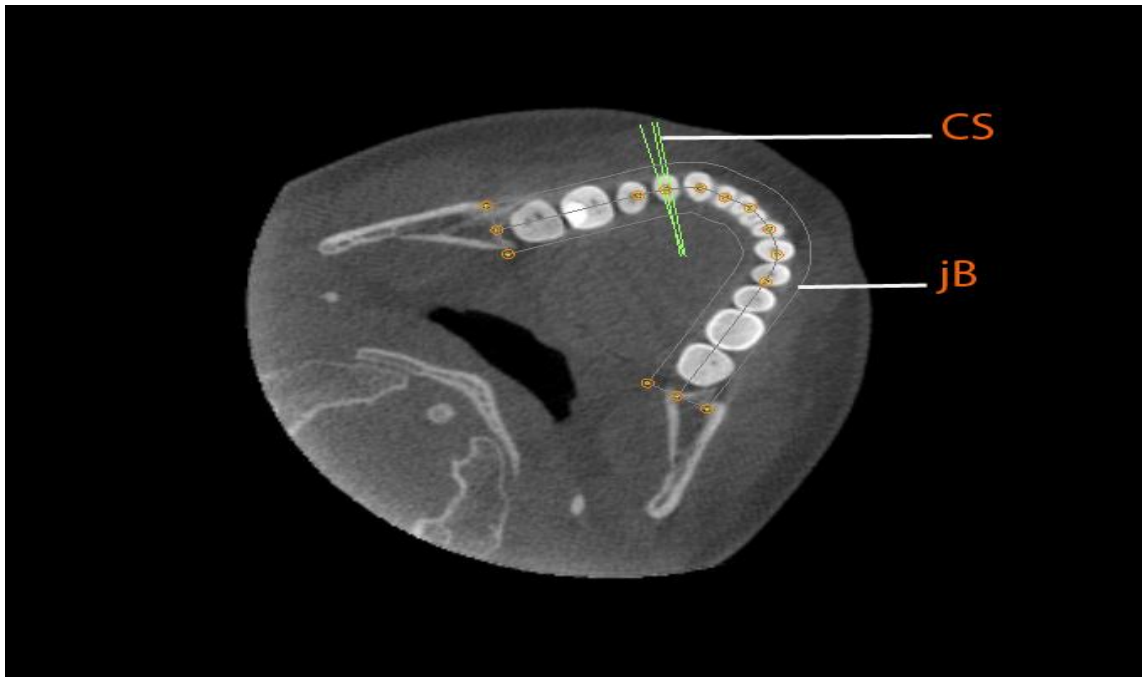


Abb. 16: Darstellung des Unterkiefers. Zuerst erfolgte die Festlegung des zu messenden Bereichs mit Hilfe des „justierbaren Bogen“ (jB). Die grünen Linien stellen die 3 Cross-Sections (CS) dar

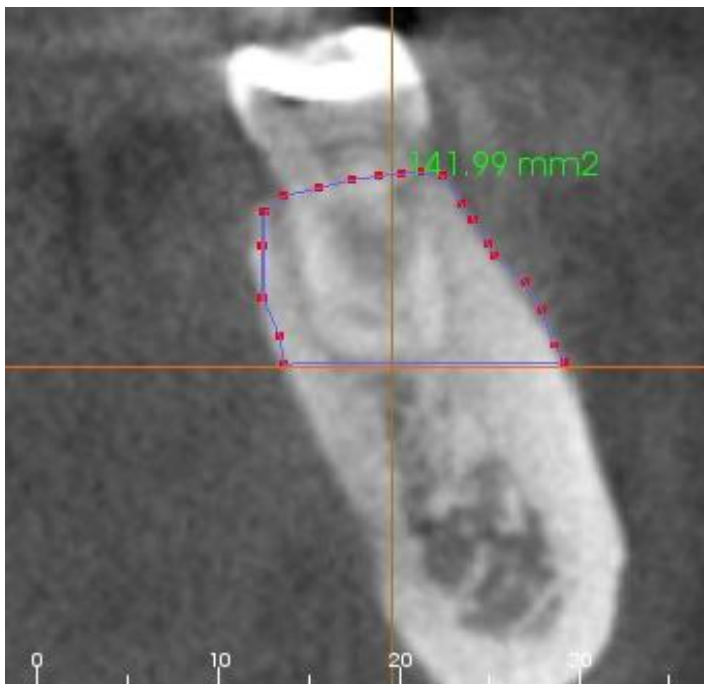


Abb. 17: Darstellung der Knochenquerschnittsfläche von Zahn 47 ergab 141,99 mm². Die rote horizontale Linie stellt die untere Bezugsebene dar, die als apikale Begrenzung der Messung diente.

Die Überprüfung der Hypothese „Die Höhe, Breite und Fläche des Knochenquerschnitts im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist im DVT intraindividuell hinreichend reproduzierbar zu bestimmen“, erforderte eine Voruntersuchung. Bei dieser Voruntersuchung wurden Stichproben aus der vorhandenen Grundgesamtheit gezogen. Aus dem Patientengut wurden willkürlich 20 Patienten ausgewählt und analysiert. Davon waren 10 Patienten Frauen und 10 Patienten Männer. Anschließend erfolgte an jedem Patient die Messung der Parameter analog dem in Kapitel 3.1.4 dargestellten Verfahren. Nach einem zeitlichen Abstand von 30 Tagen erfolgte eine Messwiederholung. Es erfolgte die statistische Berechnung des Methodenfehlers nach Dahlberg(Abb.8) und Houston. Diese Methodenfehler wurde für alle untersuchten Variablen (siehe Tab.5) mit der Dahlberg-Formel und anschließend mit der Houston-Formel (siehe Abb. 15:) berechnet. Zusätzlich erfolgte mit Hilfe des Bland-Altman-Methodenvergleichs die Überprüfung nach signifikanten Unterschieden zwischen den beiden Messwiederholungen. Dazu wurden mit SPSS Mittelwert, Standardabweichung und Standardfehler des Mittelwerts errechnet. Anschließend wurde der Korrelationskoeffizient mit entsprechendem p-Wert zwischen dem ersten und zweiten Messvorgang pro Parameter berechnet. Es erfolgte weiter der T-Test für abhängige Stichproben. Dafür wurde die Differenz zwischen dem ersten und zweiten Messvorgang verwendet. Mit Hilfe des Bland-Altman-Diagramms wurden die Ergebnisse graphisch dargestellt.

3.2.2. Vertikales Knochenangebot

Die Messmethodik der Knochenhöhe im Lückenbereich erfolgte analog dem in Kapitel 3.2.1 dargestellten Verfahren. Die Überprüfung der Hypothese „Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert“ erfolgte ebenfalls mit SPSS. Das Programm benötigte hierfür alle Messwerte des Parameters „Höhe“. Anschließend wurde zuerst der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Des Weiteren wurden der Medianwert, der Maximumwert und der Minimumwert berechnet und graphisch mittels Blockdiagramm dargestellt (Box-Whisker-Plot). Anschließend wurde der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest durchgeführt. Es wurde zuerst überprüft, ob eine Normalverteilung vorliegt. War diese Normalverteilung gegeben, wurde mit dem T-Test die Signifikanz der Parameter überprüft.

3.2.3. Transversales Knochenangebot im DVT

Die Messmethodik der Knochenbreite im Lückenbereich erfolgte analog dem in Kapitel 3.2.1 dargestellten Verfahren. Die Überprüfung der Hypothese „Das transversale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert“, erfolgte ebenfalls mit

SPSS. Das Programm benötigte hierfür alle Messwerte des Parameters „Breite“. Anschließend wurde wie in 3.2.2. beschrieben, der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet, sowie der Medianwert, der Maximumwert und der Minimumwert ermittelt und graphisch mittels Blockdiagramm dargestellt (Box-Whisker-Plot). Es erfolgte die Berechnung des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest und des T-Tests.

3.2.4. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Patienten

Die Messmethodik erfolgte analog wie in 3.2.1. beschriebenen Verfahren. Zur Überprüfung der Hypothese, „Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter des Patienten“, wurde das Alter der Patienten mit den einzelnen Messwerten der 8 Parameter verglichen. Zur statistischen Überprüfung wurde auch hier in SPSS die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung durchgeführt. Ebenfalls wurden der Medianwert, der Maximumwert und der Minimumwert berechnet. Die Altersverteilung der 100 Patienten wurde in einem Diagramm graphisch dargestellt. Anschließend erfolgte die Berechnung des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung sowie die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson. Die graphische Darstellung wurde mit Hilfe eines Streudiagramms (Scatterplots) verdeutlicht.

3.2.5. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Lücke

Die Messmethodik erfolgte analog dem in 3.2.1 beschriebenen Verfahren. Um die Hypothese „Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter der Lücke“ zu überprüfen, wurden die Patienten in einer schriftlicher Umfrage nach dem Alter der vorhandenen Lücke befragt. Die Antworten wurden anschließend ausgewertet, analysiert und mit den einzelnen Messwerten der 8 Parameter in Zusammenhang gebracht. Zur statistischen Überprüfung wurde ebenfalls in SPSS die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung ermittelt. Des Weiteren wurden der Medianwert, der Maximumwert und der Minimumwert berechnet und graphisch mittels Blockdiagramm dargestellt (Box-Whisker-Plot). Anschließend erfolgte die Überprüfung auf Normalverteilung mittels des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests. Mit Hilfe des Pearson-Verfahrens wurde die Hypothese weiter überprüft. Die graphische Darstellung wurde mit Hilfe eines Streudiagramms (Scatterplots) verdeutlicht.

3.2.6. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Geschlecht

Die Messmethodik erfolgte analog dem in 3.2.1 beschriebenen Verfahren. Um folgende Hypothese, „Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind unabhängig vom Geschlecht der Patienten“, zu überprüfen, wurden die Patienten geschlechtsspezi-

fisch sortiert. Anschließend wurden die einzelnen Messwerte der 8 Parameter mit dem Geschlecht verglichen. Die statistische Überprüfung erfolgte auch hier in SPSS. Dort wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Ebenfalls wurden der Medianwert, der Maximumwert und der Minimumwert ermittelt und graphisch mittels Blockdiagramm dargestellt (Box-Whisker-Plot). Nach der Durchführung des Tests auf Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest, erfolgte die weitere Berechnung mittels Mann-Whitney-Test.

3.2.7. Korrelation zwischen vertikalem und horizontalem Knochenangebot

Die Messmethodik erfolgte analog dem in 3.2.1 beschriebenen Verfahren. Die Überprüfung der Hypothese, „Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot“, erforderte den statistischen Vergleich von Höhe und Breite. Dafür wurden die Breite des Knochens Regio 36 mit der Knochenhöhe 36 verglichen. Für die weitere Berechnung wurden die einzelnen Messwerte der Parameter Höhe und Breite herangezogen. Zur statistischen Überprüfung wurde wieder in SPSS die Berechnung des Mittelwerts, Standardabweichung, Medianwert, sowie Maximum- und Minimumwert ermittelt. Es erfolgte die Berechnung zunächst mit den Daten die in Regio 36 ermittelt wurden. Hierzu wurde zunächst die Testung auf eine Normalverteilung mit Hilfe des Kolmogorov–Smirnov-Anpassungstests angewendet. Anschließend erfolgt die Korrelationsanalyse nach Pearson. Die graphische Darstellung wurde mit Hilfe eines Streudiagrammen (Scatterplots) verdeutlicht.

3.2.8. Korrelation zwischen Knochenhöhe und Querschnittsfläche

Die Messmethodik erfolgte analog dem in 3.2.1 beschriebenen Verfahren. Die Überprüfung der Hypothese, „Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem vertikalen Knochenangebot in der Lücke“, erforderte den Vergleich von Höhe und Fläche. Dafür wurde die Knochenhöhe des Zahns 36 mit der Fläche 36 verglichen. Für die weitere Berechnung wurden die Messwerte der Parameter Höhe und Fläche herangezogen. Zur statistischen Überprüfung wurde ebenfalls in SPSS die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung, Medianwert, sowie Maximum- und Minimumwert ermittelt. Es erfolgte zunächst eine Testung auf Normalverteilung mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest und anschließend die Korrelation nach Pearson. Die graphische Darstellung wurde mit Hilfe von Streudiagrammen (Scatterplots) verdeutlicht.

3.2.9. Korrelation zwischen Knochenbreite und Querschnittsfläche

Die Messmethodik erfolgte analog dem in 3.2.1 beschriebenen Verfahren. Die Überprüfung der Hypothese, „Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot in der Lücke“, erforderte den Vergleich von Breite und Fläche. Dafür wurden die Fläche des Knochens 36 mit der Breite 36 verglichen. Für die weitere Berechnung wurden die einzelnen Messwerte der Parameter Breite und Fläche herangezogen. Zur statistischen Überprüfung wurde auch hier in SPSS die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung durchgeführt. Ebenso wurden der Medianwert, der Maximumwert und der Minimumwert ermittelt. Im Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest wurde auf eine Normalverteilung getestet und anschließend die Korrelation nach Pearson. Die graphische Darstellung wurde mit Hilfe von Streudiagrammen (Scatterplots) verdeutlicht.

4. Ergebnisse

4.1. Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter im DVT

Alle Messparameter (siehe 3.2.1) konnten reproduzierbar erhoben werden. Der Methodenfehler nach Dahlberg (Tab. 5.) erstreckte sich für die Flächenberechnung von 6,20-8,84 mm² und für die Streckenberechnung von 0,04-0,45 mm. Der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston wurde mit Hilfe des Dahlbergmethodenfehlers berechnet und lag zwischen 0,96 bis 0,99. (siehe Tab. 5).

Tab. 5: Darstellung des Methodenfehlers nach Dahlberg und des Zuverlässigkeitskoeffizienten nach Houston für alle untersuchten Variablen. Die Fehlerangabe erfolgt in Millimeter.

Variable	Methodenfehler nach Dahlberg	Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston
Fläche6	4,38	0,99
Fläche7	6,25	0,99
Fläche7c	5,39	0,99
Breite6A	0,03	0,97
Breite6E	0,27	0,97
Breite7A	0,24	0,96
Breite7E	0,31	0,98
Höhe6	0,26	0,99
Höhe7	0,30	0,99

Abkürzungen: Fläche6 = Fläche des Knochens in Regio 36 bzw. 46; Fläche7 = Fläche des Knochens an Zahn 37 bzw. 47; Fläche7c = Fläche des Knochens an Zahn 37 bzw. 47 in der Cross Section; Breite6A = Breite des Knochens in Regio 36/47 auf Höhe des Alveolarfortsatzes; Breite6E = Breite des Knochens in Regio 36/46 auf Höhe der definierten Einsenkung; Breite7A = Breite der mesialen Wurzel auf Höhe des Alveolarfortsatzes; Breite7E = Breite des Knochens in Regio 36 bzw. 46 auf Höhe der definierten Einsenkung; Höhe6 = Knochenhöhe in Regio 36/46 ; Höhe7 = Knochenhöhe von Zahn 37/47.

Um eine ausreichende Messgenauigkeit zu gewährleisten zu können, sollte der Zuverlässigkeitskoeffizient zwischen 0,90 bis 0,97 liegen:

Den geringsten Zuverlässigkeitskoeffizient hatten alle Variablen, welche die Breite untersuchten (0,96-0,98). Es lag für alle Messparameter eine hohe bis sehr hohe intraindividuelle Reproduzierbarkeit im DVT vor.

Zusätzlich wurde für jeden Parameter (Höhe, Breite und Fläche) auch ein Bland-Altman-Methodenvergleich durchgeführt.

Messung der Knochenquerschnittsfläche im Bereich der unteren ersten Molaren

Die Knochenquerschnittsfläche in Regio 36/46 betrug bei der ersten Messung im Mittel 65,22 mm² (Fläche 1_6) und bei der zweiten Messung 65,53 mm² (Fläche 2_6). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,876$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 16). Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenquerschnittsfläche im Bereich der unteren ersten Molaren ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

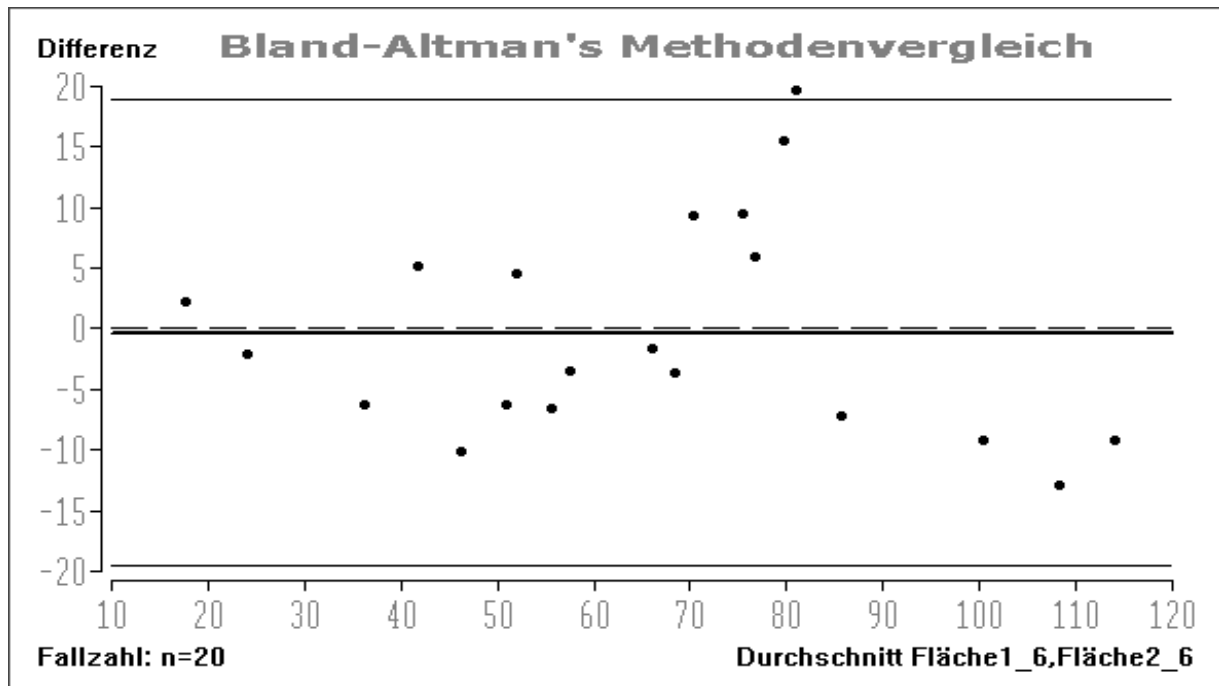


Abb. 18: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Knochenquerschnittsflächen im Bereich der unteren ersten Molaren. Die Messungen der Knochenquerschnittsfläche waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,876$).

Messung der Knochenquerschnittsfläche im Bereich der unteren zweiten Molaren

Die Knochenquerschnittsfläche von Zahn 37/47 betrug bei der ersten Messung im Mittel 133,77 mm² (Fläche 1_7) und bei der zweiten Messung 129,44 mm² (Fläche 2_7). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,124$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 17). Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenquerschnittsfläche im Bereich der unteren zweiten Molaren ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

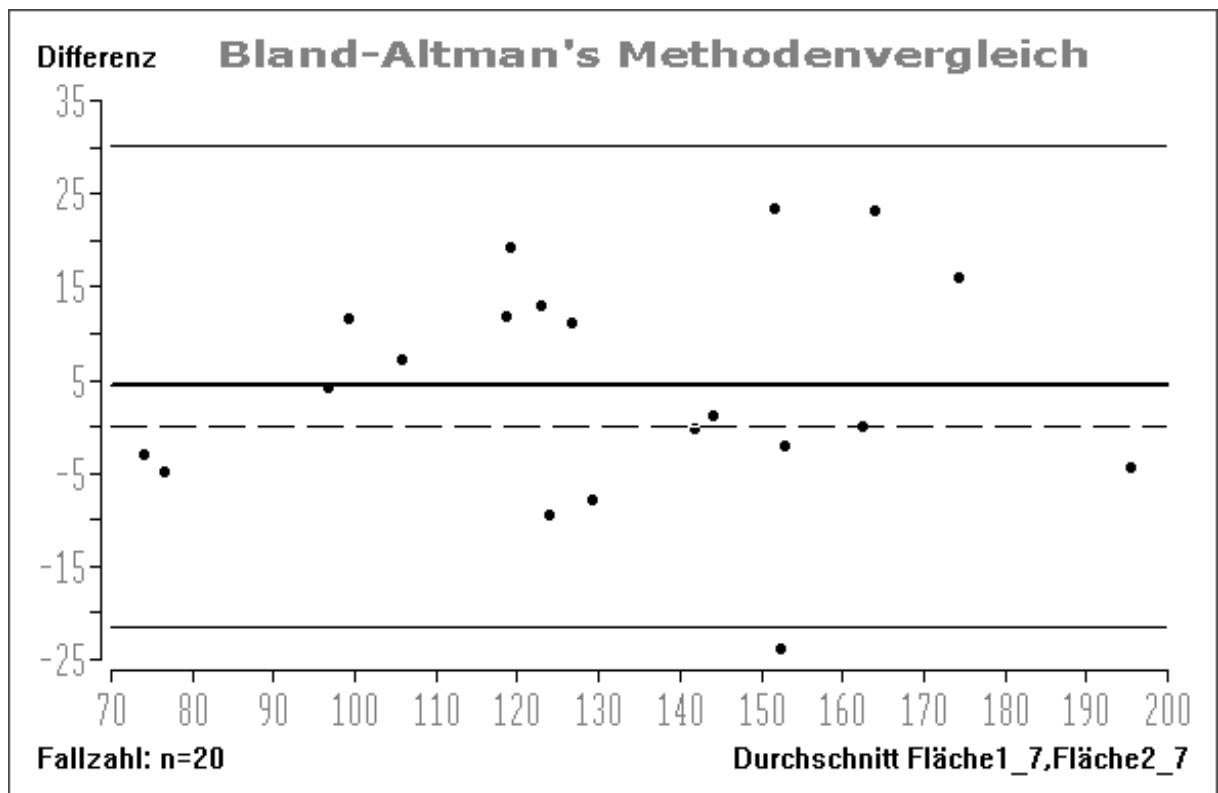


Abb. 19: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Knochenquerschnittsflächen im Bereich der unteren zweiten Molaren. Die Messungen der Knochenquerschnittsfläche waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 124$).

Messung der Knochenquerschnittsfläche „Cross“ im Bereich der unteren zweiten Molaren

Die Knochenquerschnittsfläche von Zahn 37/47 in der „Cross Section“ betrug bei der ersten Messung im Mittel 132,209 mm² (Fläche 1_7c) und bei der zweiten Messung 130,404 mm² (Fläche 2_7c). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,47$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 17). Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenquerschnittsfläche im Bereich der unteren zweiten Molaren ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

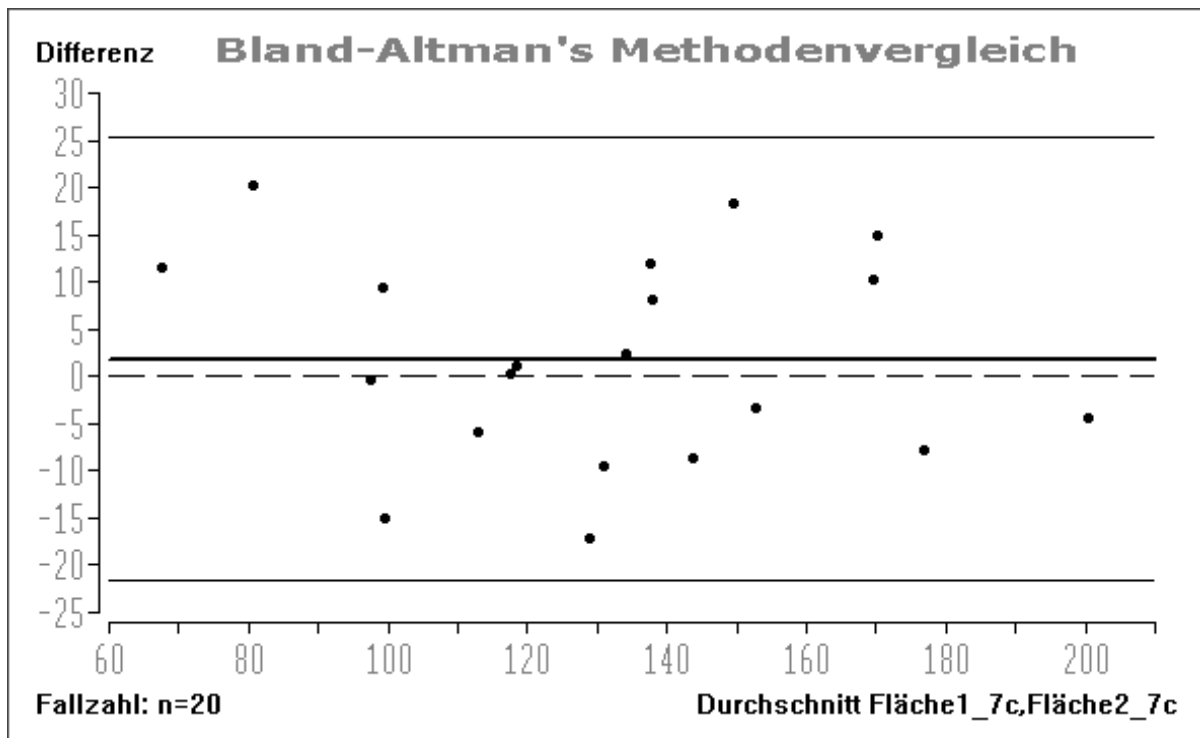


Abb. 20: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Knochenquerschnittsflächen in der „Cross Section“ im Bereich der unteren zweiten Molaren. Die Messungen der Knochenquerschnittsfläche waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,47$).

Messung der Knochenbreite im Bereich der unteren ersten Molaren auf Höhe des Alveolarfortsatzes

Die Knochenbreite in Regio 36/46 auf Höhe des Alveolarfortsatzes betrug bei der ersten Messung im Mittel 0,26 mm (Breite 1_6A) und bei der zweiten Messung 0,24 mm (Breite 2_6A). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,330$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 18). Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenbreite im Bereich der unteren ersten Molaren auf Höhe des Alveolarfortsatzes ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden. Da die Messung in diesem Bereich außer bei 4 Stichproben immer Null ergab, wurde diese Variable im weiteren Ergebnisteil nicht mehr weiter berücksichtigt, da diese keine Aussagekraft hatte. Da diese Breite auf Höhe des Alveolarfortsatzes bei fast allen Patienten (96 %) Null ergab, wurde diese Variable in der weiteren statistischen Auswertung nicht berücksichtigt.

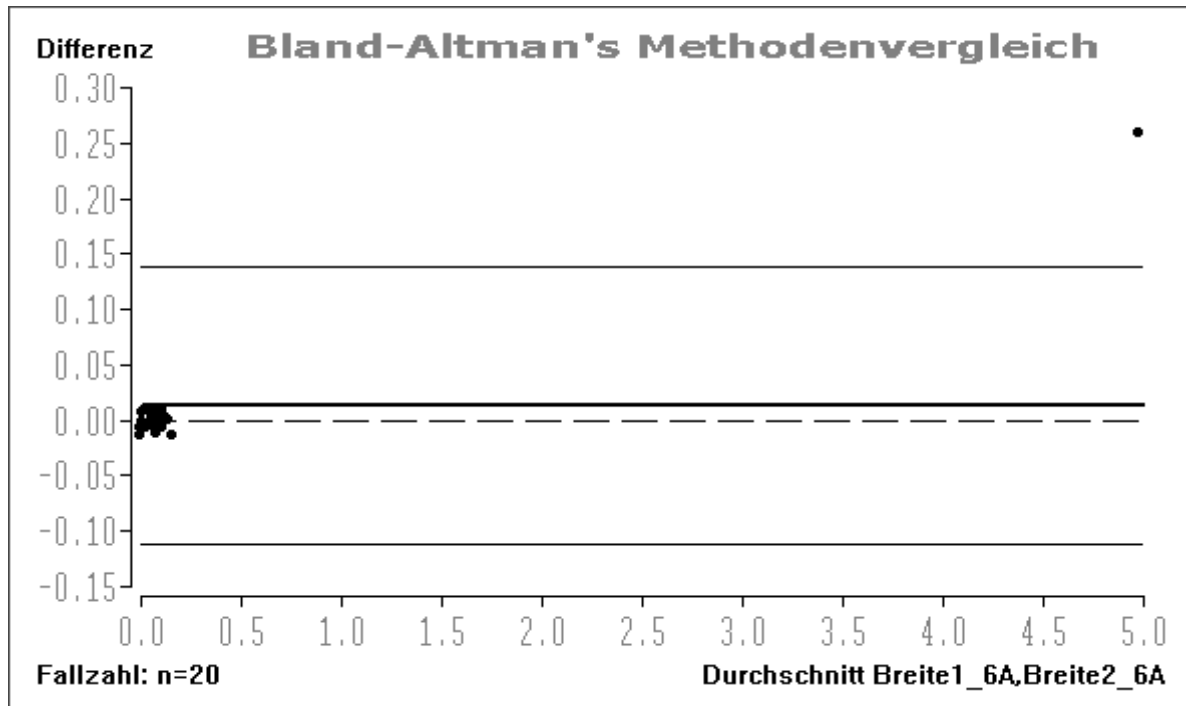


Abb. 21: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Knochenbreite im Bereich der unteren ersten Molaren auf Höhe des Alveolarfortsatzes. Die Messungen der Knochenbreite waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,330$).

Messung der Knochenbreite der unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung

Die Knochenbreite in Regio 36 bzw. 46 auf Höhe der definierten Einsenkung betrug bei der ersten Messung im Mittel 7,29 mm (Breite 1_6E) und bei der zweiten Messung 7,27 mm (Breite 2_6E). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,877$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 19).

Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenbreite im Bereich der unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

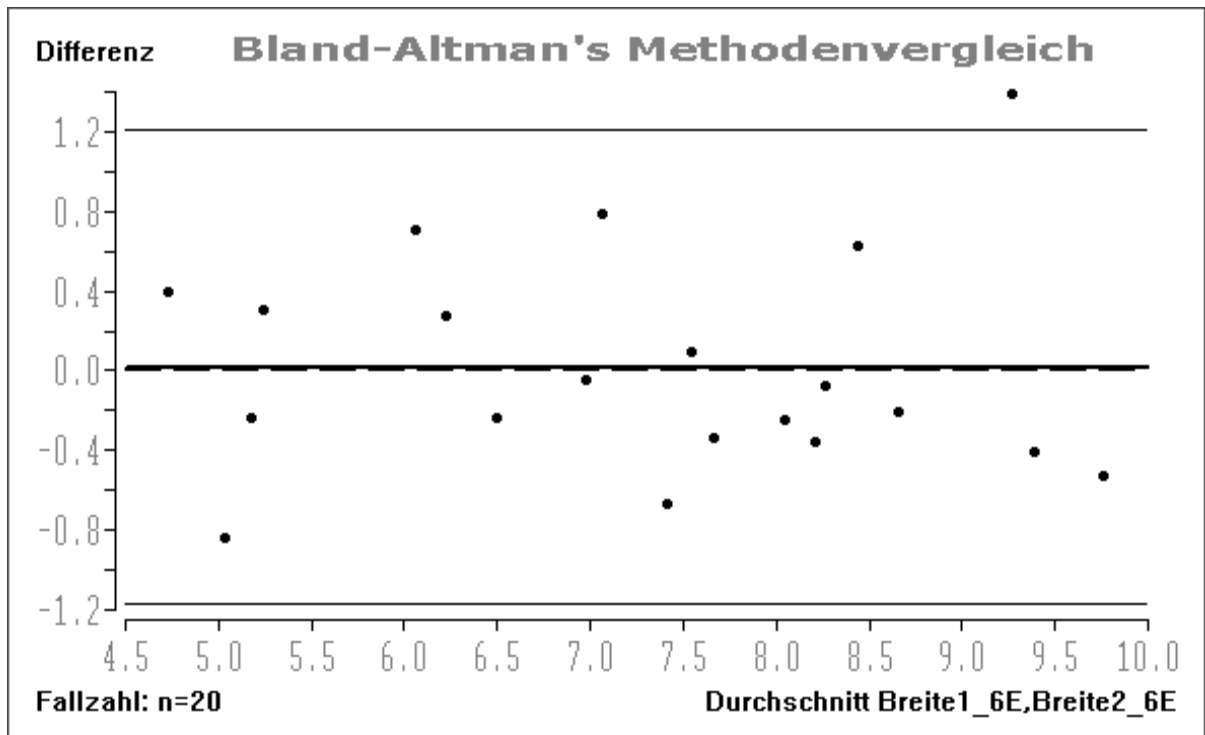


Abb. 22: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Knochenbreite im Bereich der unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung. Die Messungen der Knochenbreite waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,877$).

Messung der Wurzelbreite eines unteren zweiten Molaren auf Höhe des Alveolarfortsatzes

Die Wurzelbreite des Zahnes 37 bzw. 47 auf Höhe des Alveolarfortsatzes betrug bei der ersten Messung im Mittel 8,16 mm (Breite 1_7A) und bei der zweiten Messung 8,14 mm (Breite 2_7A). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,802$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 20).

Damit konnte die Hypothese, „Die Wurzelbreite im Bereich der unteren zweiten Molaren auf Höhe des Alveolarfortsatzes ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

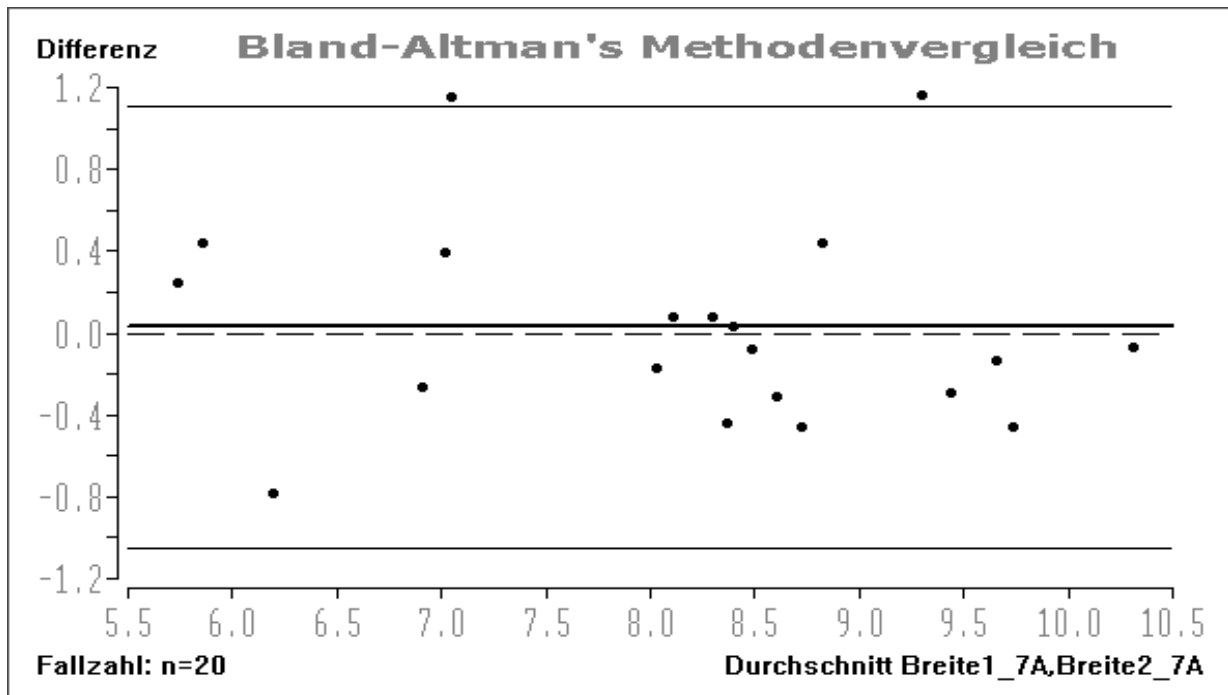


Abb. 23: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Wurzelbreite des unteren zweiten Molaren auf Höhe des Alveolarfortsatzes. Die Messungen der Knochenbreite waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,802$).

Messung der Wurzelbreite eines unteren zweiten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung

Die Wurzelbreite des Zahnes 37 bzw. 47 auf Höhe der tiefsten Einsenkung betrug bei der ersten Messung im Mittel 6,87 mm (Breite 1_7E) und bei der zweiten Messung 6,74 mm (Breite 2_7E). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,362$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 21). Damit konnte die Hypothese, „Die Wurzelbreite im Bereich der unteren zweiten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

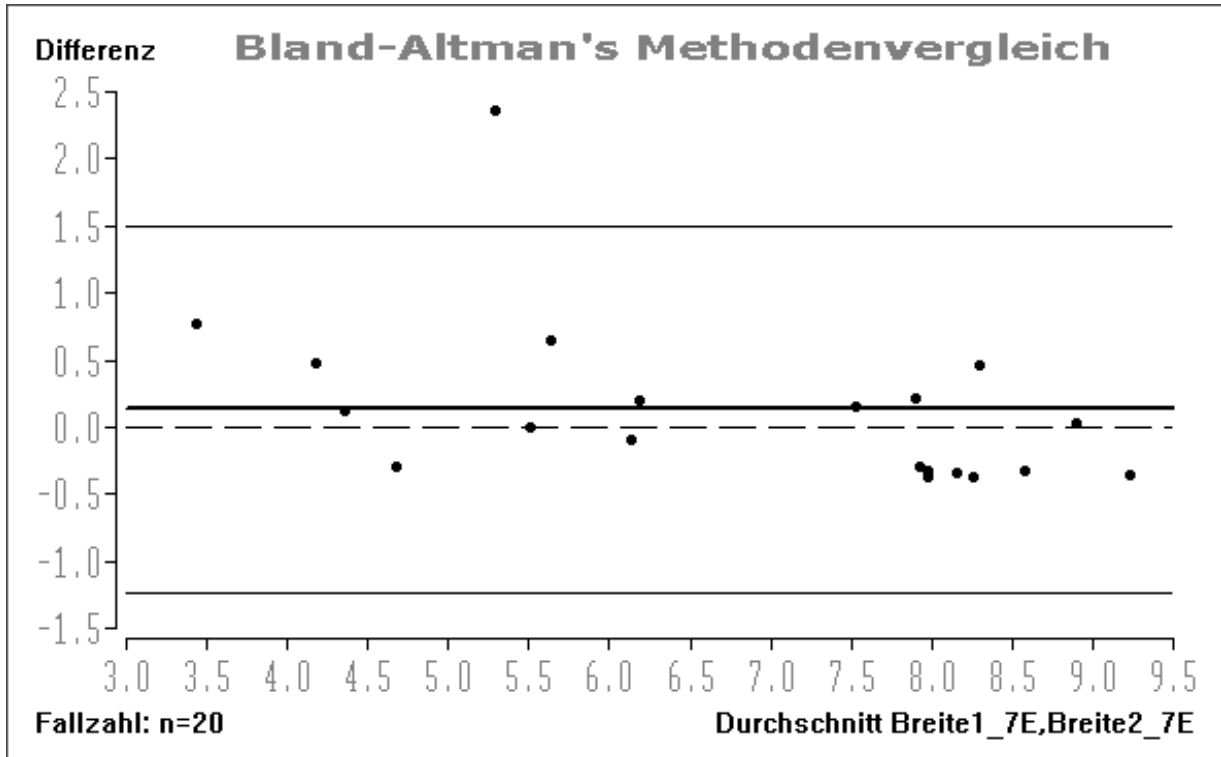


Abb. 24: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Wurzelbreite des unteren zweiten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung. Die Messungen der Knochenbreite waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,362$).

Messung der Knochenhöhe im Bereich des unteren ersten Molaren

Die Knochenhöhe in Regio 36 bzw. 46 betrug bei der ersten Messung im Mittel 7,72 mm (Höhe 1_6) und bei der zweiten Messung 7,64 mm (Höhe 2_6). Nach Durchführung des T-Tests, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,525$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 22). Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenhöhe im Bereich der unteren ersten Molaren ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

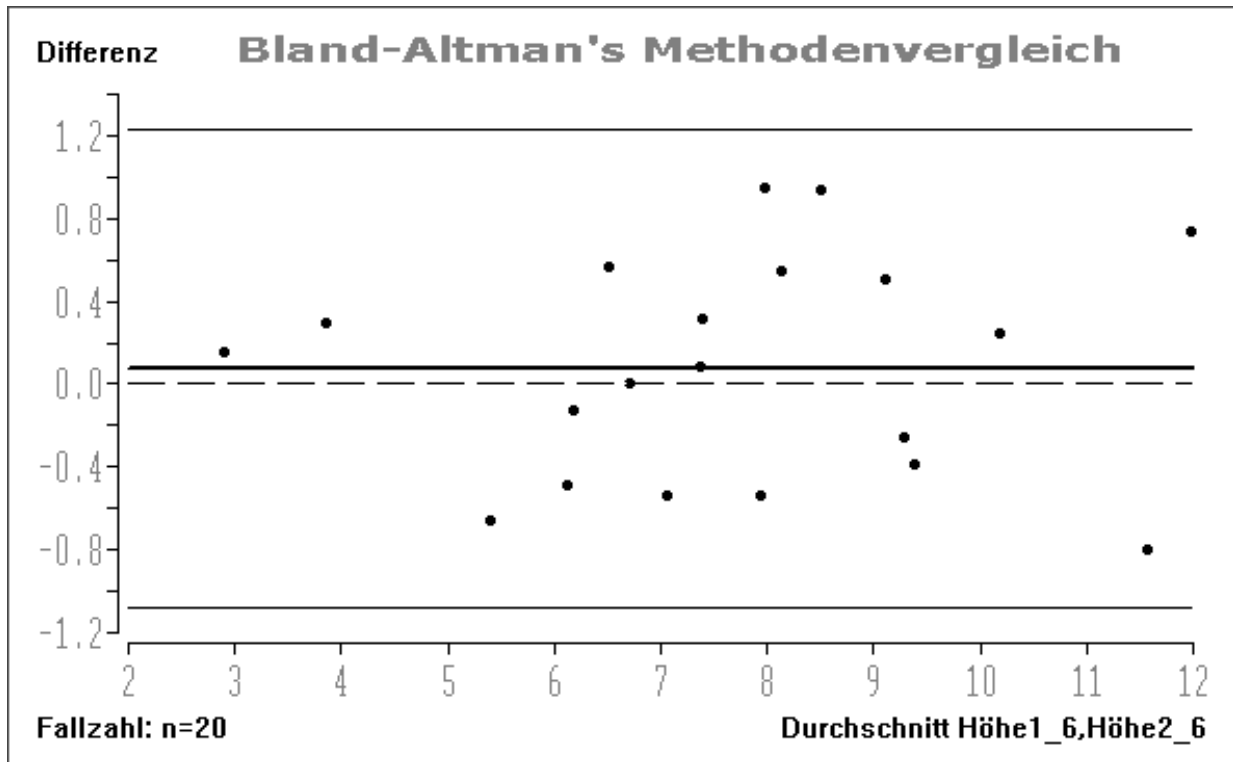


Abb. 25: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Knochenhöhe des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung. Die Messungen der Knochenbreite waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,525$).

Messung der Knochenhöhe im Bereich des unteren zweiten Molaren

Die Knochenhöhe von Zahn 37/47 betrug bei der ersten Messung im Mittel 9,09 mm (Höhe 1_7) und bei der zweiten Messung 8,99 mm (Höhe 2_7). Nach Durchführung des T-Test, resultierte zwischen der ersten und der zweiten Messung kein signifikanter Unterschied ($p = 0,480$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 22). Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenhöhe im Bereich der unteren zweiten Molaren ist im DVT hinreichenden intraindividuell reproduzierbar zu bestimmen“, bestätigt werden.

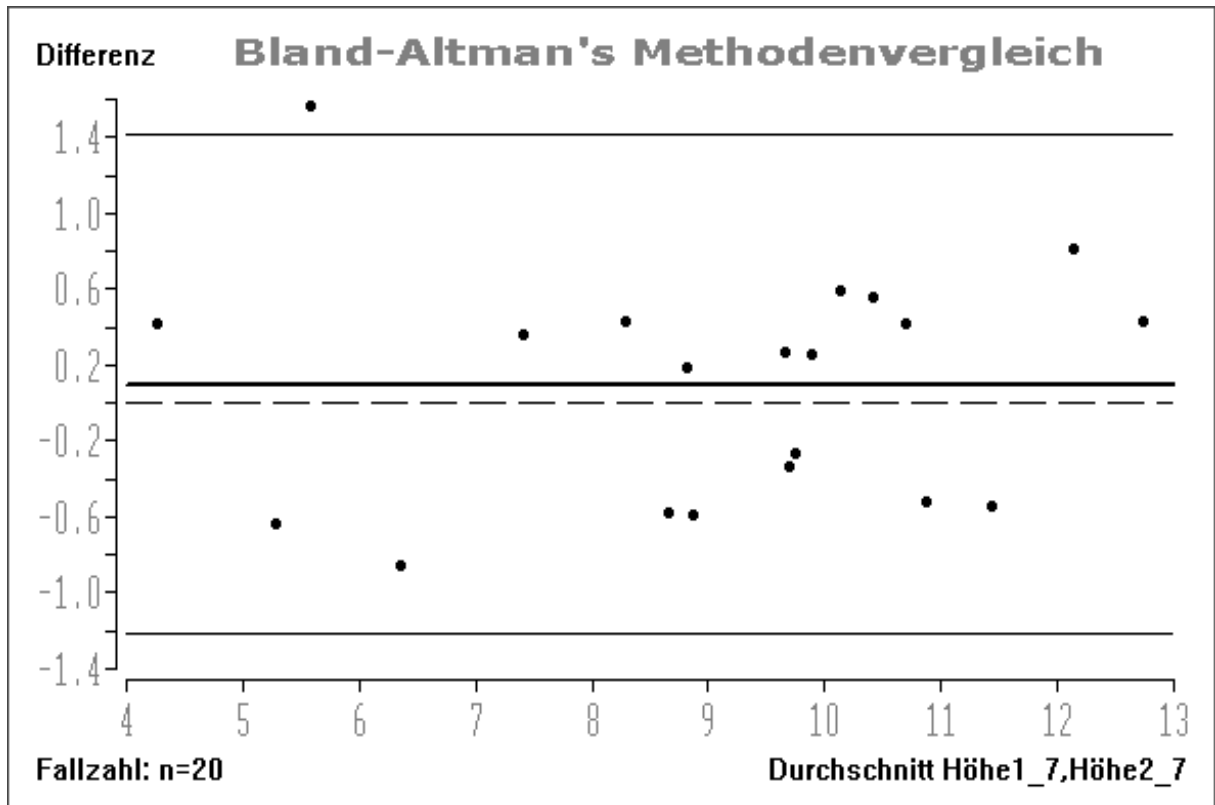


Abb. 26: Bland-Altman-Plot zur Darstellung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung der Knochenhöhe des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung. Die Messungen der Knochenbreite waren intraindividuell sehr reproduzierbar, weil die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung nicht signifikant waren ($p = 0,525$).

Zusammenfassend konnte die Hypothese "Die Fläche, Breite und Höhe des Knochenquerschnitts im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist im DVT intraindividuell hinreichend reproduzierbar zu bestimmen", statistisch bestätigt werden.

4.2. Vertikales Knochenangebot

In diesem Kapitel wurde das vertikale Knochenangebot in der Unterkieferlücke der ersten Molaren mit dem vertikalen Knochenangebot der zweiten Molaren verglichen. Das vertikale Knochenangebot im Bereich der ersten Molaren (=Lückenbereich) betrug bei den 100 untersuchten Patienten im Mittel 7,58 mm. Im Gegensatz dazu betrug das vertikale Knochenangebot im Bereich der zweiten Molaren durchschnittlich 8,68 mm. Nach Durchführung des T-Tests resultierte im Lückenbereich ein signifikant reduziertes vertikales Knochenangebot ($p < 0,001$). Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb.

24). Damit musste die Hypothese „Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert“ abgelehnt werden.

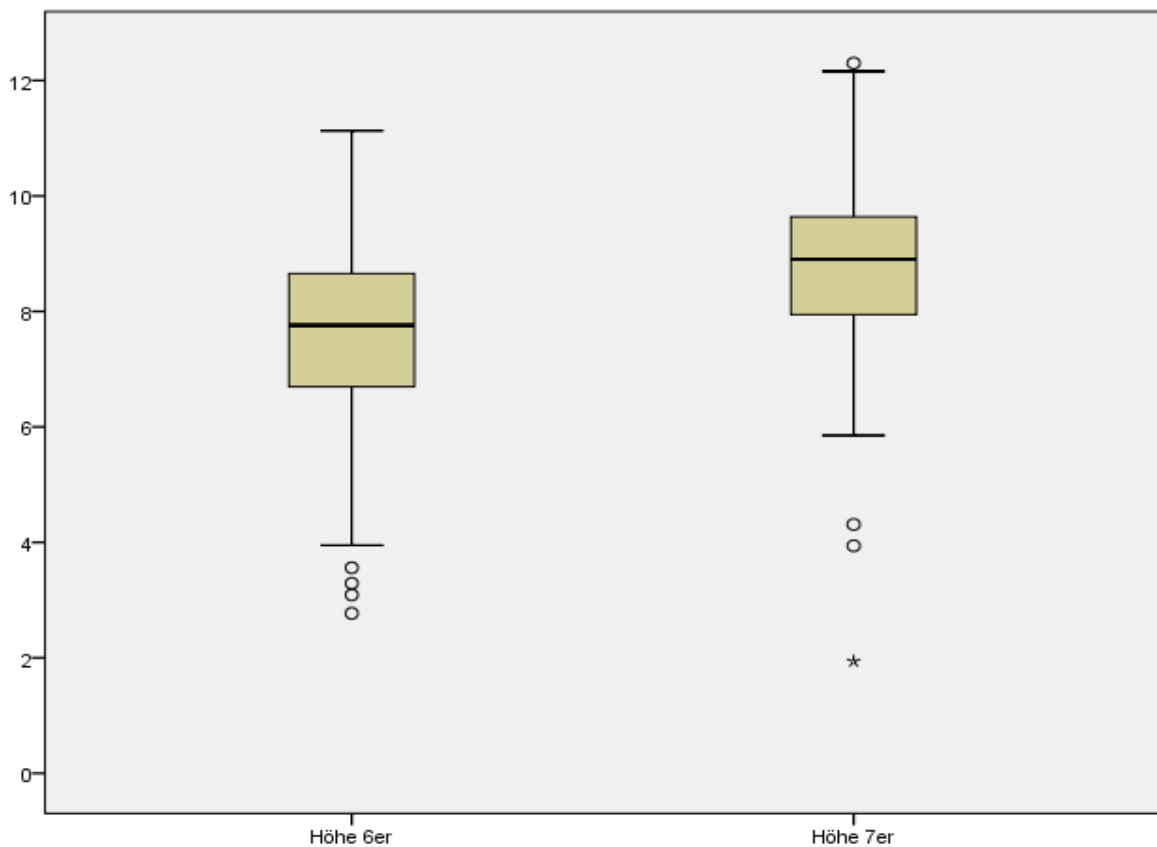


Abb. 27: Box-Whisker-Plot zur Darstellung der Knochenhöhen im Bereich der ersten und zweiten Molaren. Messungen, die außerhalb des Konfidenzintervalls lagen, wurden einzeln als Extremwerte dargestellt. Das vertikale Knochenangebot im Bereich der Lücken (= erste Molaren) war signifikant geringer ($p = 0,000$).

4.3. Transversales Knochenangebot

In diesem Kapitel wurde das transversale Knochenangebot in der Unterkieferlücke der ersten Molaren mit der Wurzelbreite der zweiten Molaren verglichen.

Das transversale Knochenangebot im Bereich der ersten Molaren (=Lückenbereich) auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite 6er Einsenkung) betrug im Mittel 6,99 mm. Die mesiale Wurzelbreite des zweiten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite 7er Einsenkung) betrug im Mittel 7,1 mm und auf Höhe des Alveolarfortsatzes (Breite 7er AlvFortsatz) 7,8 mm.

In nur 26 % der Fälle war das transversale Knochenangebot im Lückenbereich um mindestens 1 mm breiter als die mesiale Wurzel des 7ers.

In 68 % der Fälle betrug das transversale Knochenangebot im Lückenbereich 5,75 mm oder mehr.

Nach Durchführung des T-Tests, resultierte beim Vergleich der „Breite 7er Einsenkung“ mit der „Breite 6er Einsenkung“ kein signifikant reduziertes transversales Knochenangebot ($p = 0,285$). Dagegen resultierte beim Vergleich der „Breite 7er AlvFortsatz“ mit der „Breite 6er Einsenkung“ ein hoch signifikant reduziertes Knochenangebot ($p < 0,000$).

Die Mehrheit der Messungen lag innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (Abb. 25). Damit konnte die Hypothese, „Das transversale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert“, nur teilweise abgelehnt werden.

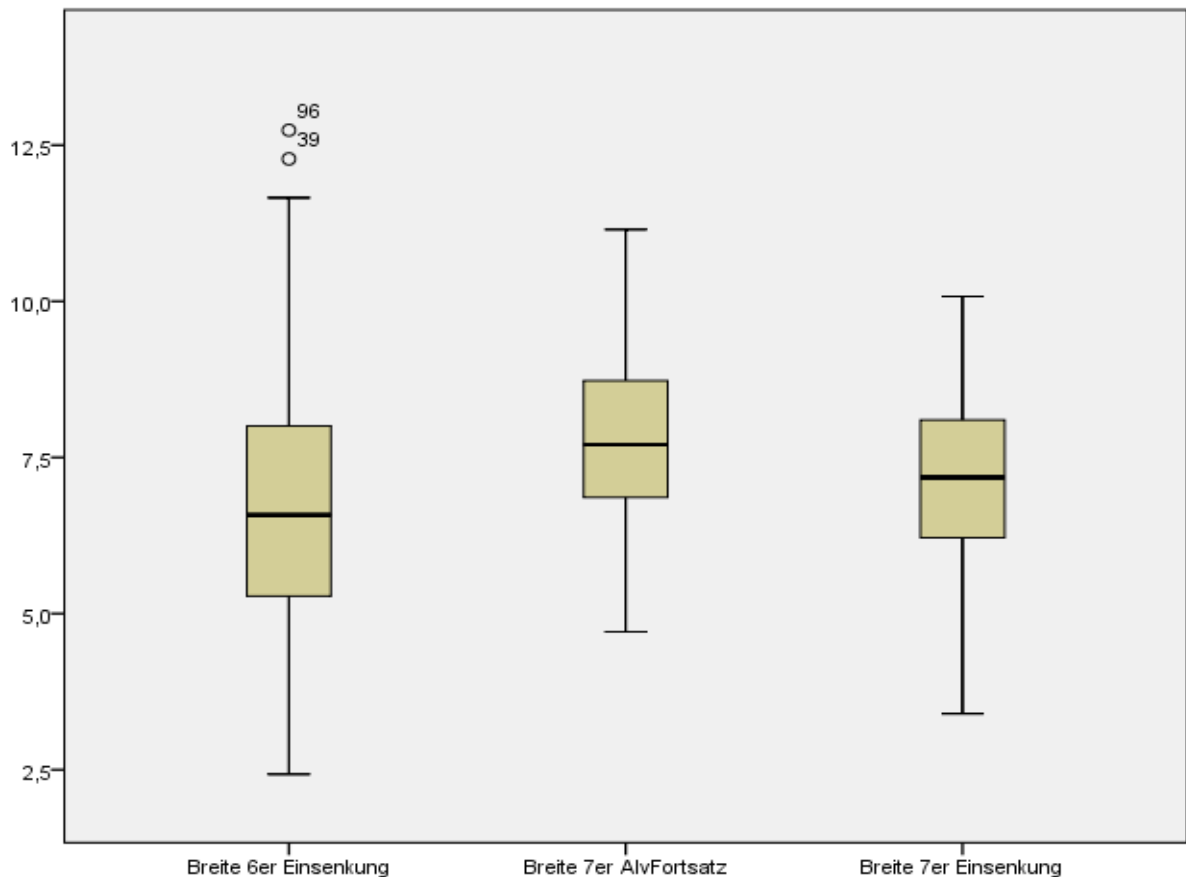


Abb. 28: Box-Whisker-Plot zur Darstellung der Knochenbreiten im Bereich der ersten und zweiten Molaren. Messungen, die außerhalb des Konfidenzintervalls lagen, wurden einzeln als Extremwerte dargestellt. Das transversale Angebot in der Lücke auf Höhe der definierten Einsenkung war beim Vergleich mit der mesialen Wurzelbreite auf Höhe der definierten Einsenkung nicht signifikant reduziert ($p = 0,285$). Dagegen lag ein hoch signifikant reduziertes transversales Knochenangebot beim Vergleich der Breite 6er Einsenkung mit der Breite 7er Alveolarfortsatz vor ($p < 0,000$).

4.4. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Patienten

In diesem Kapitel wurden die Parameter Höhe, Breite und Fläche im Unterkieferlückenbereich mit dem Alter der Patienten verglichen. Das Alter der 100 Patienten betrug im Mittel 54,3 Jahre. Nach Durchführung des Korrelationstest nach Pearson resultierte kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den Parametern und dem Alter der Patienten ($p > 0,05$). Die Parameter waren somit unabhängig vom Alter der Patienten. Daher musste die Hypothese, „Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter des Patienten“, abgelehnt werden.

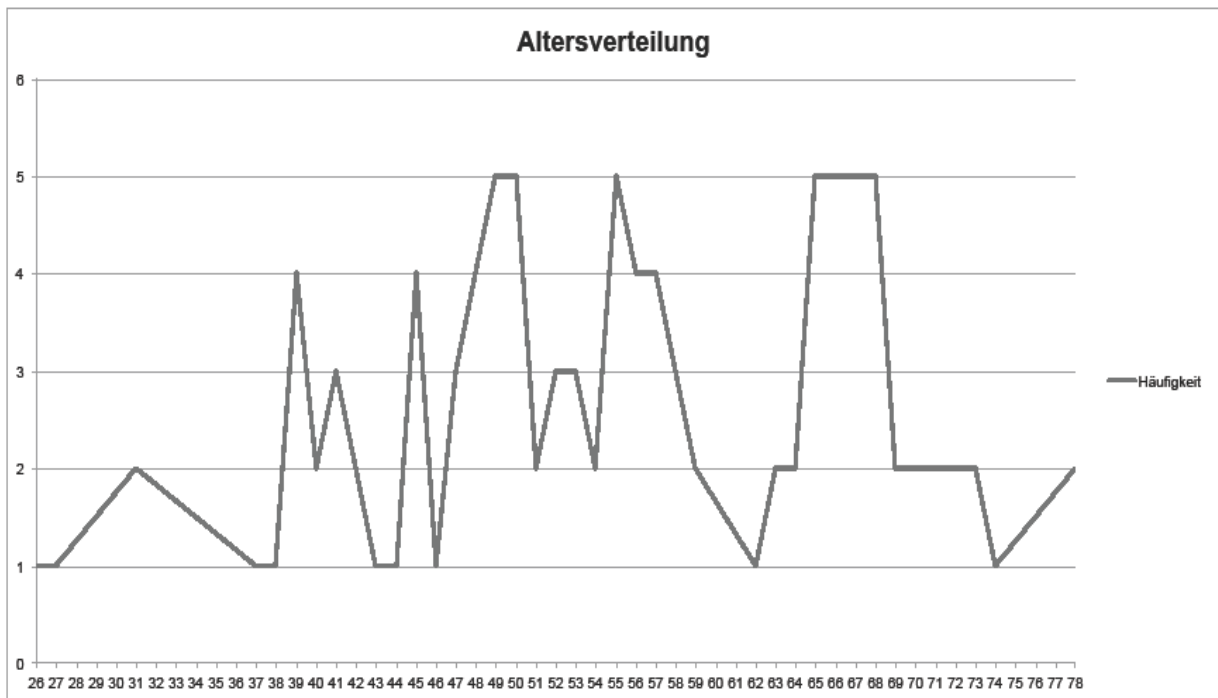


Abb.29: Diagramm zur Darstellung der Altersverteilung von 100 untersuchten Patienten mit Zahnlücken im Bereich der ersten Molaren. Das Alter rangierte von 26-78 Jahren. 83 % der Patienten mit Zahnlücken im Bereich der ersten Molaren waren älter als 45 Jahre.

Die Parameter Knochenquerschnittsfläche des unteren ersten Molaren (Fläche 6) und Knochenbreite des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite 6er Einsenkung) sind exemplarisch in den folgenden Abbildungen dargestellt:

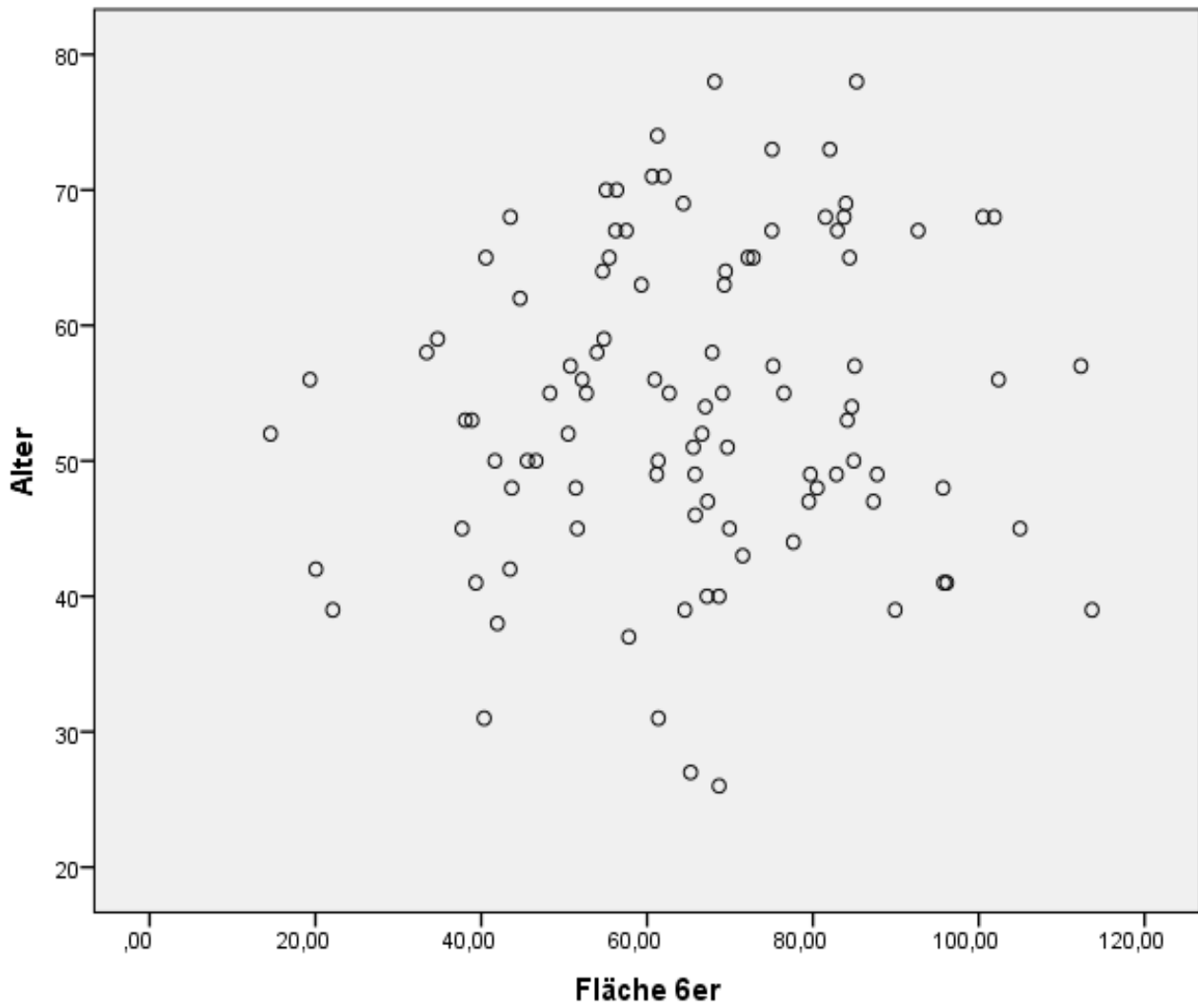


Abb. 30: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs der Knochenquerschnittsfläche des unteren ersten Molaren (Fläche 6) mit dem Alter der Patienten. Die Fläche war unabhängig vom Alter der Patienten, weil kein statistisch signifikanter Zusammenhang nachweisbar war ($p > 0,05$).

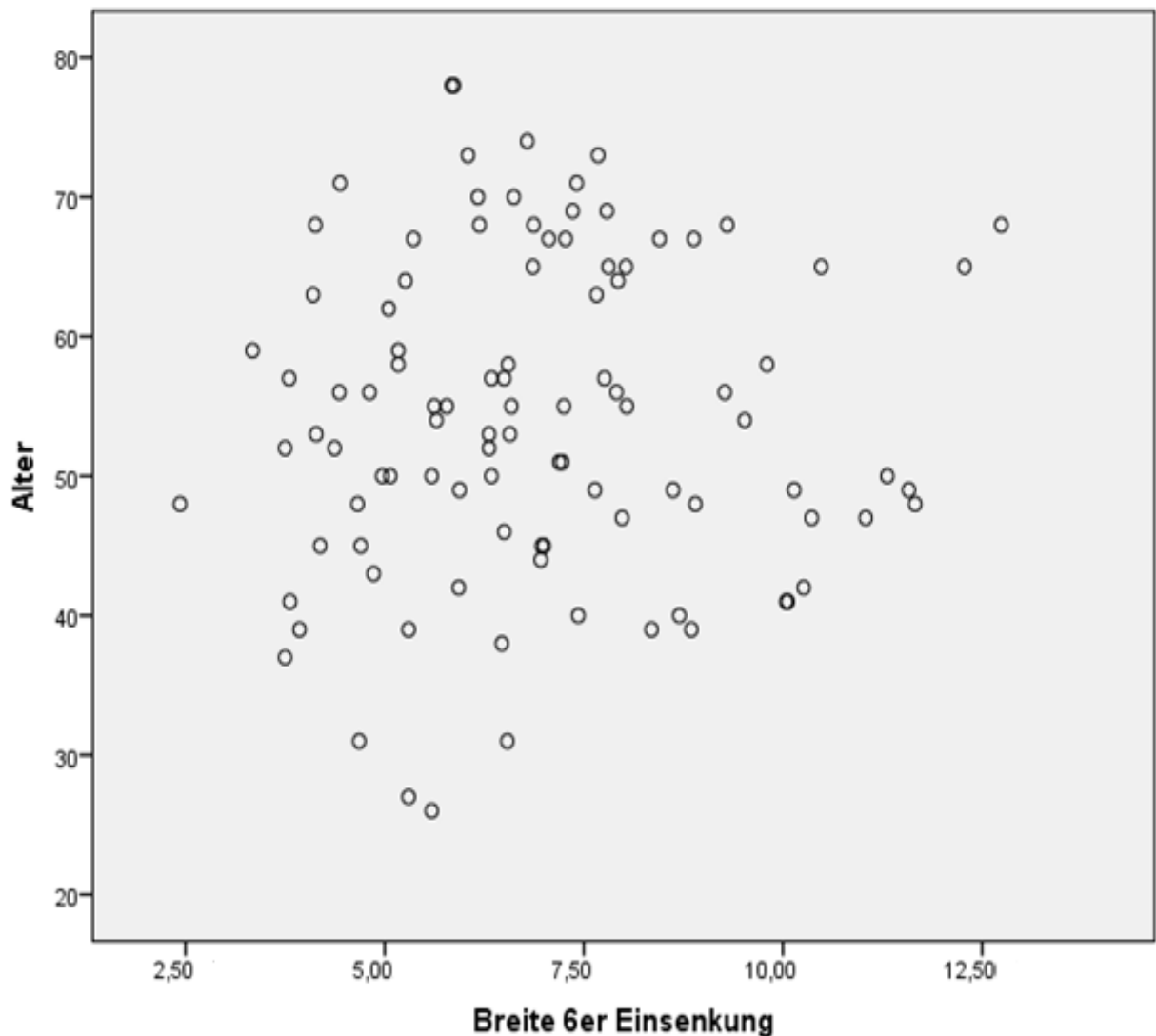


Abb. 31: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs der Knochenbreite des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite6E) mit dem Alter der Patienten. Die Breite war unabhängig vom Alter der Patienten, weil kein statistisch signifikanter Zusammenhang nachweisbar war ($p > 0,05$).

4.5. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Lücke

In diesem Kapitel wurden die Parameter Höhe, Breite und Fläche im Unterkieferlückenbereich mit dem Alter der Patientenunterkieferzahnlücke verglichen. Das Alter der vorhandenen Unterkieferzahnlücke konnte von 25 Patienten erhoben werden. Das Alter der Lücke rangierte von 0,5 bis 53 Jahre. Das Alter der Lücke betrug im Mittel 13,74 Jahre bei einer Standardabweichung von 13,13 Jahren. Nach Durchführung des Korrelationstest nach Pearson, resultierte kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den Parametern und dem Alter der Unterkieferlücke ($p > 0,05$). Eine Abhängigkeit lag somit nicht vor.

Damit konnte die Hypothese, „Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter des Lücke“, abgelehnt werden.

Die Parameter Knochenquerschnittsfläche des unteren ersten Molaren (Fläche 6) und Knochenbreite des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite 6er Einsenkung) sind exemplarisch in den folgenden Abbildungen dargestellt:

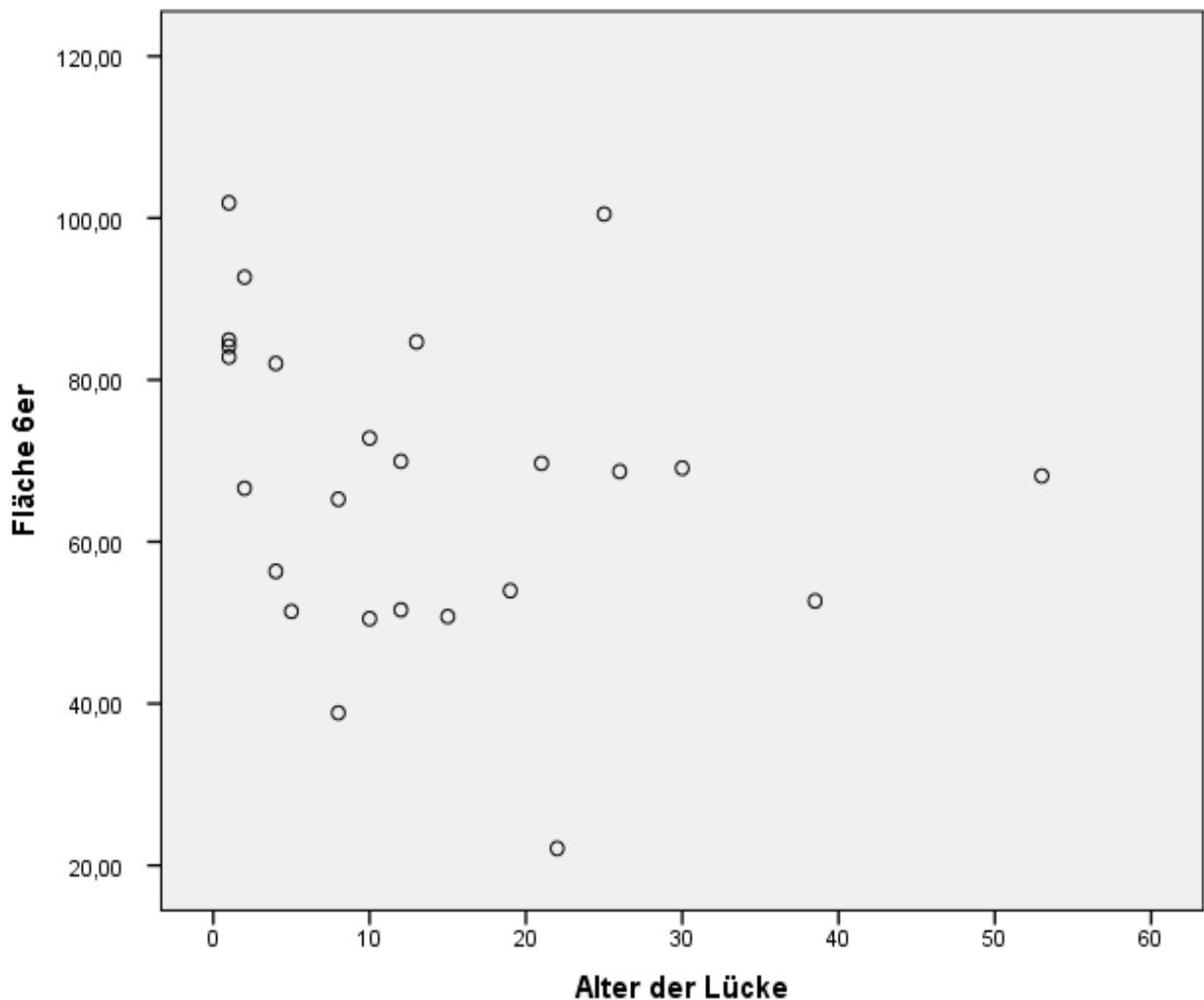


Abb. 32: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs der Knochenquerschnittsfläche des unteren ersten Molaren (Fläche 6) mit dem Alter der Unterkieferlücke. Die Fläche war unabhängig vom Alter der Unterkieferlücke, weil kein statistisch signifikanter Zusammenhang nachweisbar war ($p = 0,441$).

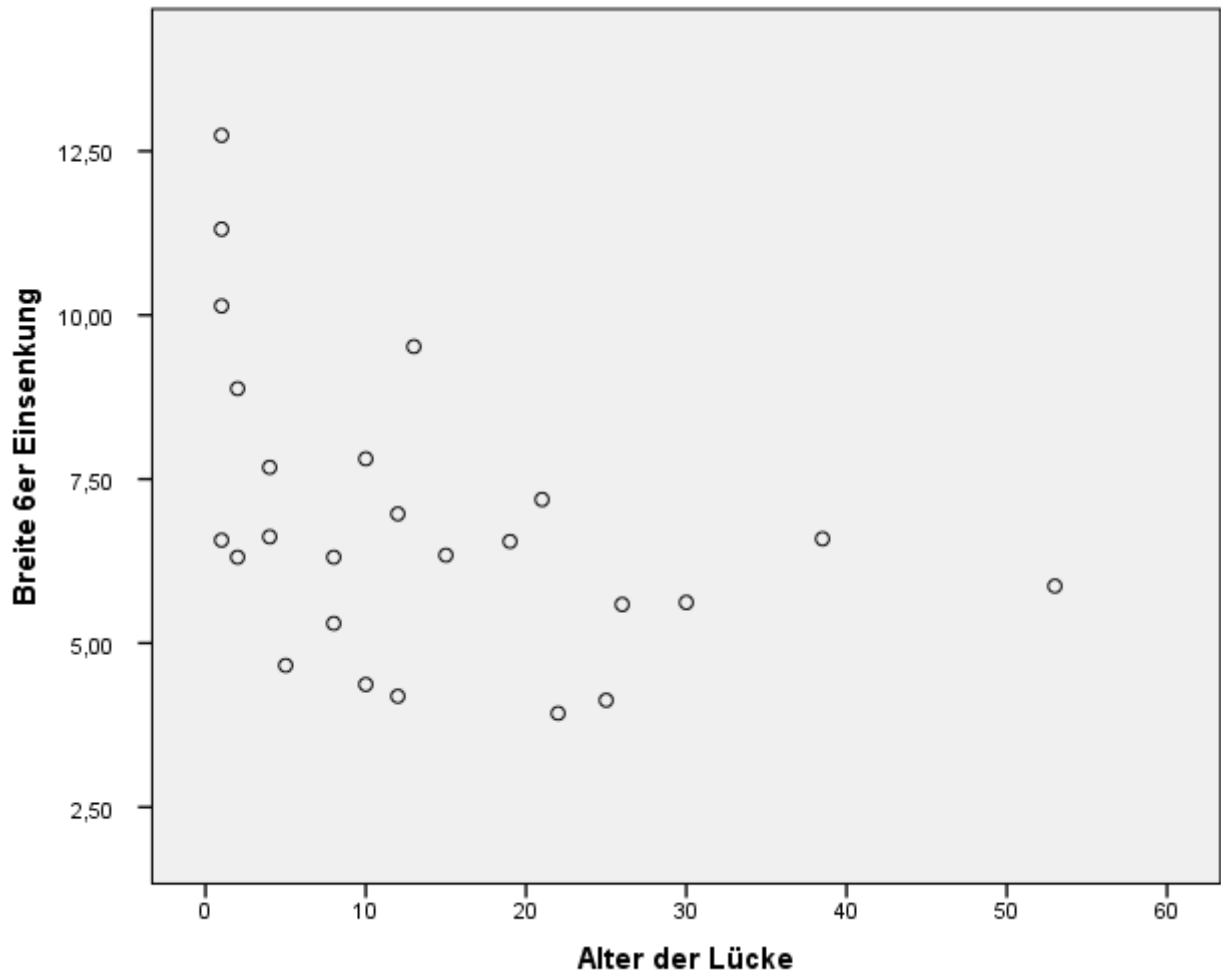


Abb. 33: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs der Knochenbreite des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite6E) mit dem Alter der Unterkieferlücke. Diese Breite war unabhängig vom Alter der Lücke, weil kein statistisch signifikanter Zusammenhang nachweisbar war ($p = 0,058$).

4.6. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Geschlecht

In diesem Kapitel wurden die Parameter Höhe, Breite und Fläche im Unterkieferlückenbereich mit dem Geschlecht der Patienten verglichen. Das gesamte Patientengut bestand aus 51 % Männern und 49 % Frauen.

Nach Durchführung des Mann-Whitney-U-Test, resultierte zwischen dem Geschlecht und den Parametern im Lückenbereich ein statistischer Unterschied ($p < 0,005$). Eine Abhängigkeit lag somit vor, jedoch mit einer Ausnahme: Die Fläche im Lückenbereich ergab keinen statistischen Unterschied ($p = 0,785$) und war unabhängig vom Geschlecht.

Damit konnte die Hypothese, „Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Geschlecht“, nur zum Teil bestätigt werden.

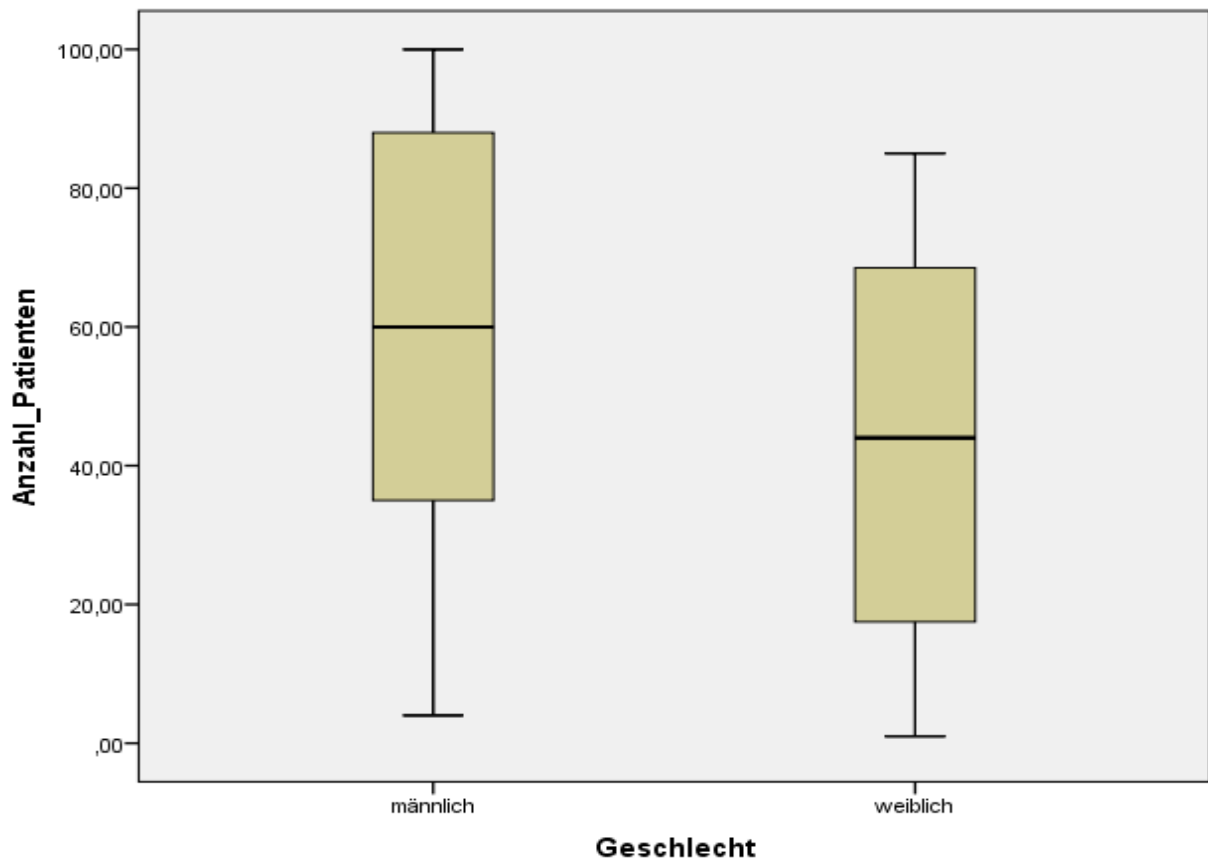


Abb. 34: Box-Whisker-Plot zur Darstellung der Geschlechterverteilung. Von 100 Patienten waren 51 männlichen und 49 weiblichen Geschlechts.

Die Parameter Knochenquerschnittsfläche des unteren ersten Molaren (Fläche6) und Knochenbreite des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite6E) sind exemplarisch in den folgenden Abbildungen dargestellt:

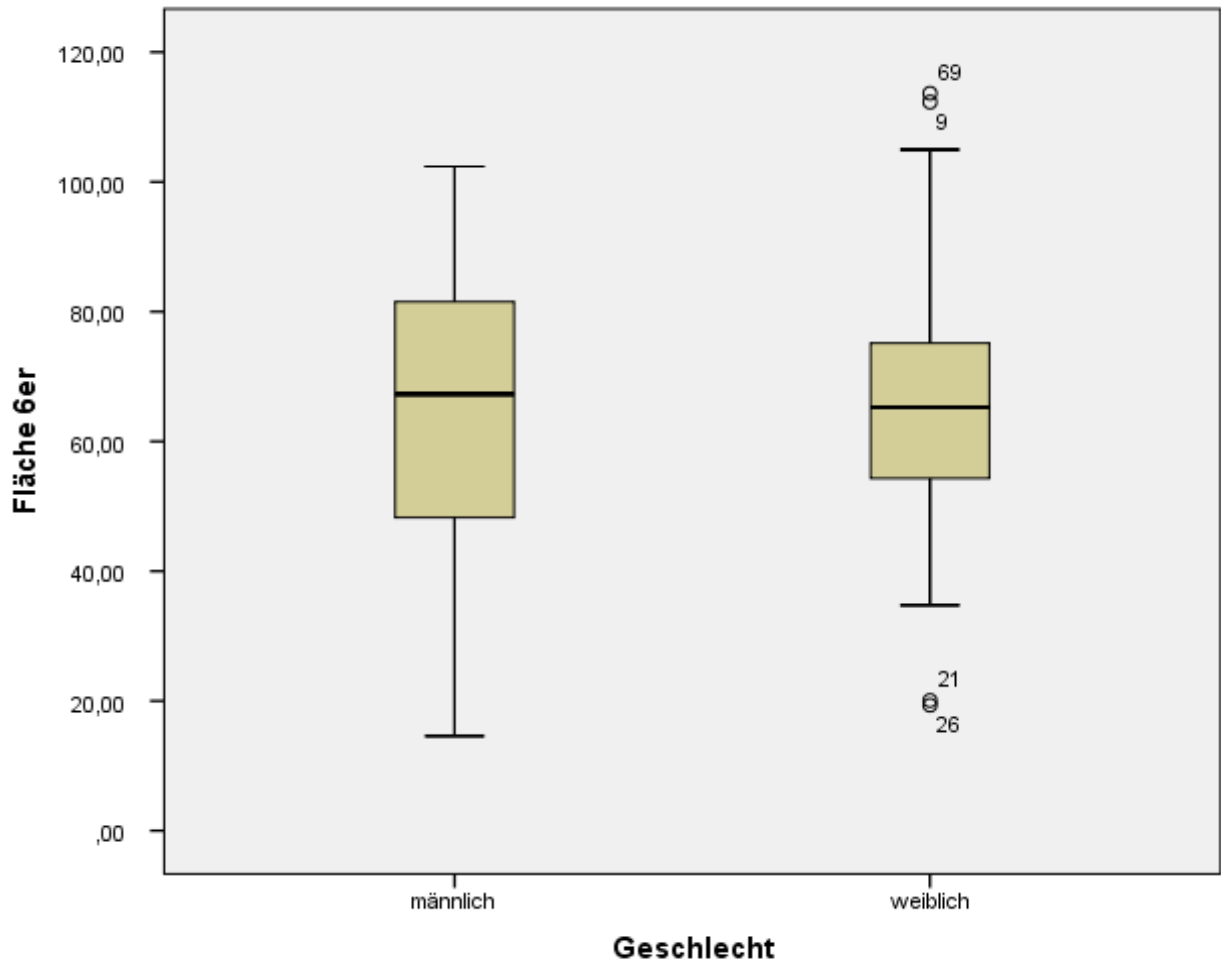


Abb. 35: Box-Whisker-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs der Knochenquerschnittsfläche des unteren ersten Molaren (Fläche6) mit dem Geschlecht der Patienten. Die Fläche war unabhängig vom Patientengeschlecht der Unterkieferlücke, weil kein statistisch signifikanter Unterschied nachweisbar war ($p = 0,785$).

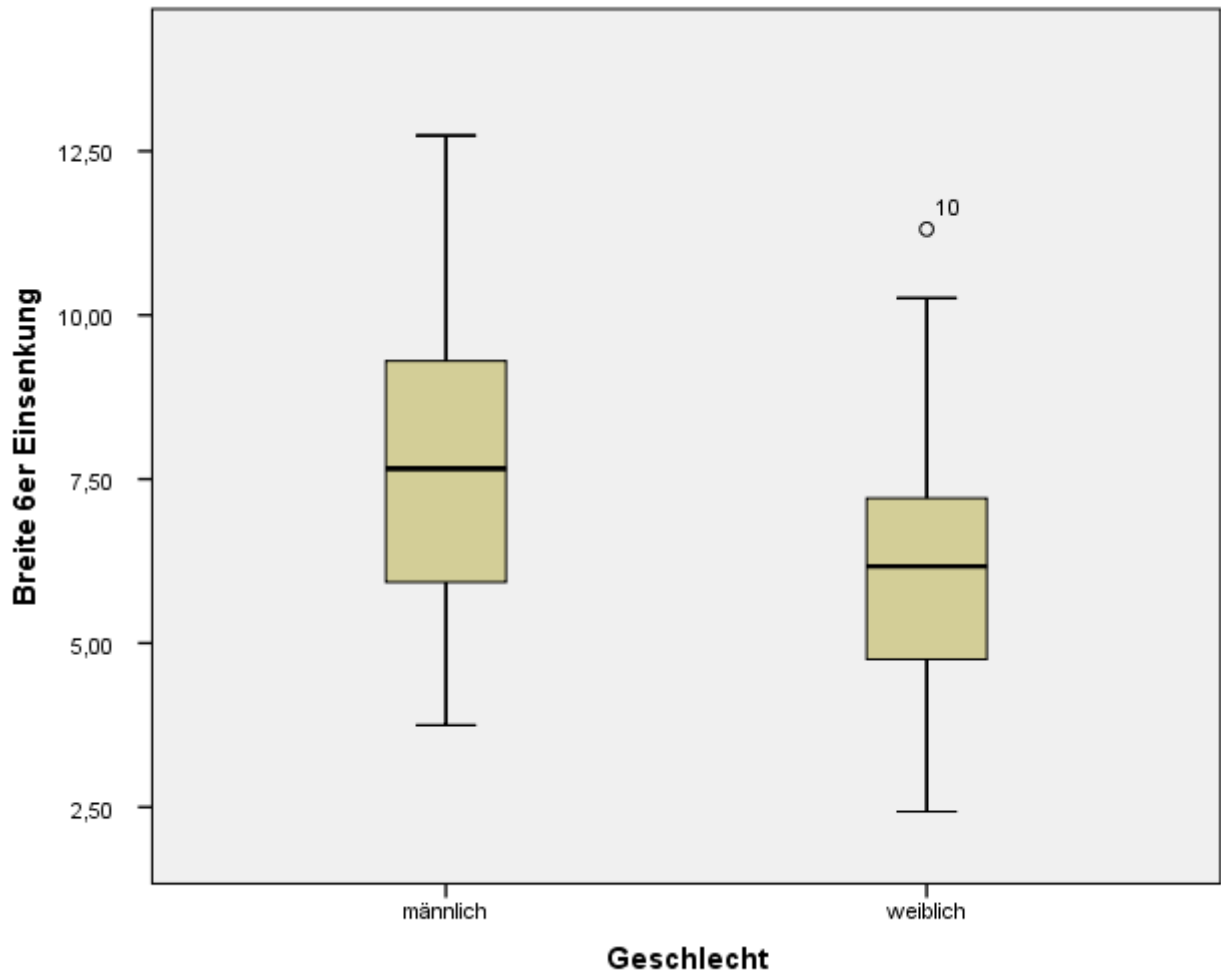


Abb. 36: Box-Whisker-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs der Knochenbreite des unteren ersten Molaren auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite6E) mit dem Geschlecht der Patienten. Diese Breite war abhängig vom Patientengeschlecht, weil ein statistisch signifikanter Unterschied nachweisbar war ($p = 0,001$).

4.7. Korrelation zwischen vertikalem und horizontalem Knochenangebot

In diesem Kapitel wurden die Parameter Knochenhöhe und Knochenbreite im Unterkieferlückenbereich auf einen Zusammenhang überprüft.

Nach Durchführung der Korrelationsanalyse nach Pearson resultierte zwischen der Breite des Knochens in der 6er Region auf Höhe der definierten Einsenkung und der Knochenhöhe in dieser Region kein statistisch signifikanter Zusammenhang ($p = 0,837$). Die beiden Variablen korrelierten weder positiv noch negativ miteinander. Damit konnte die Hypothese, "Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot", abgelehnt werden.

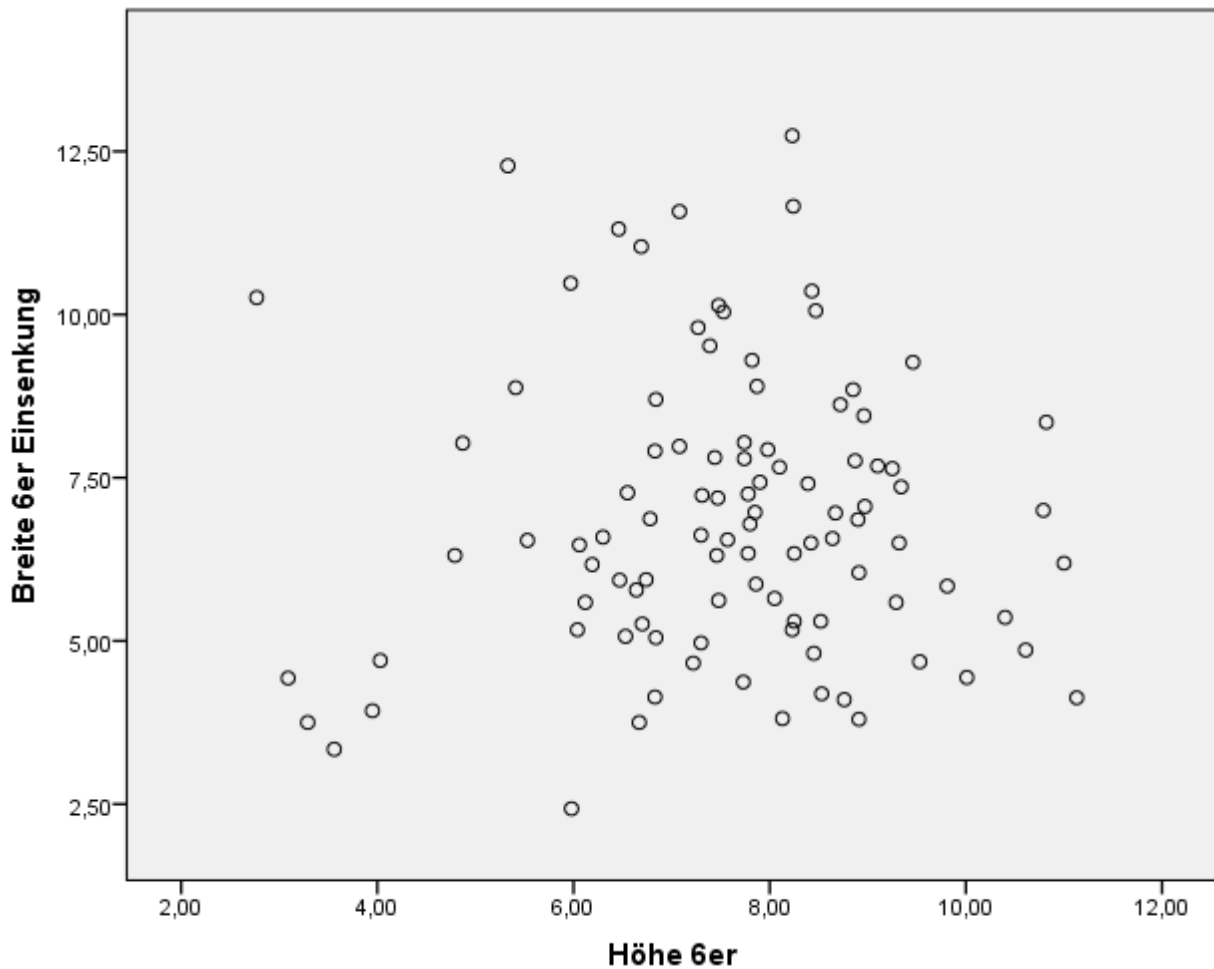


Abb. 37: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Breite des Knochens in der 6er Region auf Höhe der definierten Einsenkung und der Höhe des Knochens in dieser Region. Diese beiden Größen korrelierten weder positiv noch negativ miteinander, weil kein statistisch signifikanter Zusammenhang nachweisbar war ($p > 0,05$).

4.8. Korrelation zwischen Knochenhöhe und Querschnittsfläche

In diesem Kapitel werden die Parameter Höhe und Knochenquerschnittsfläche im Unterkieferlückenbereich auf einen statistischen Zusammenhang überprüft.

Nach Durchführung der Korrelationsanalyse nach Pearson, resultierte zwischen der Höhe des Knochens in der 6er Region mit der Knochenquerschnittsfläche in dieser Region ein statistisch hoch signifikanter Zusammenhang ($p < 0,001$). Der Korrelationskoeffizient betrug 0,694. Es lag ein linearer positiver Zusammenhang vor mit $R^2 = 0,481$ (siehe Abbildung 38).

Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem vertikalen Knochenangebot in der Lücke“, bestätigt werden.

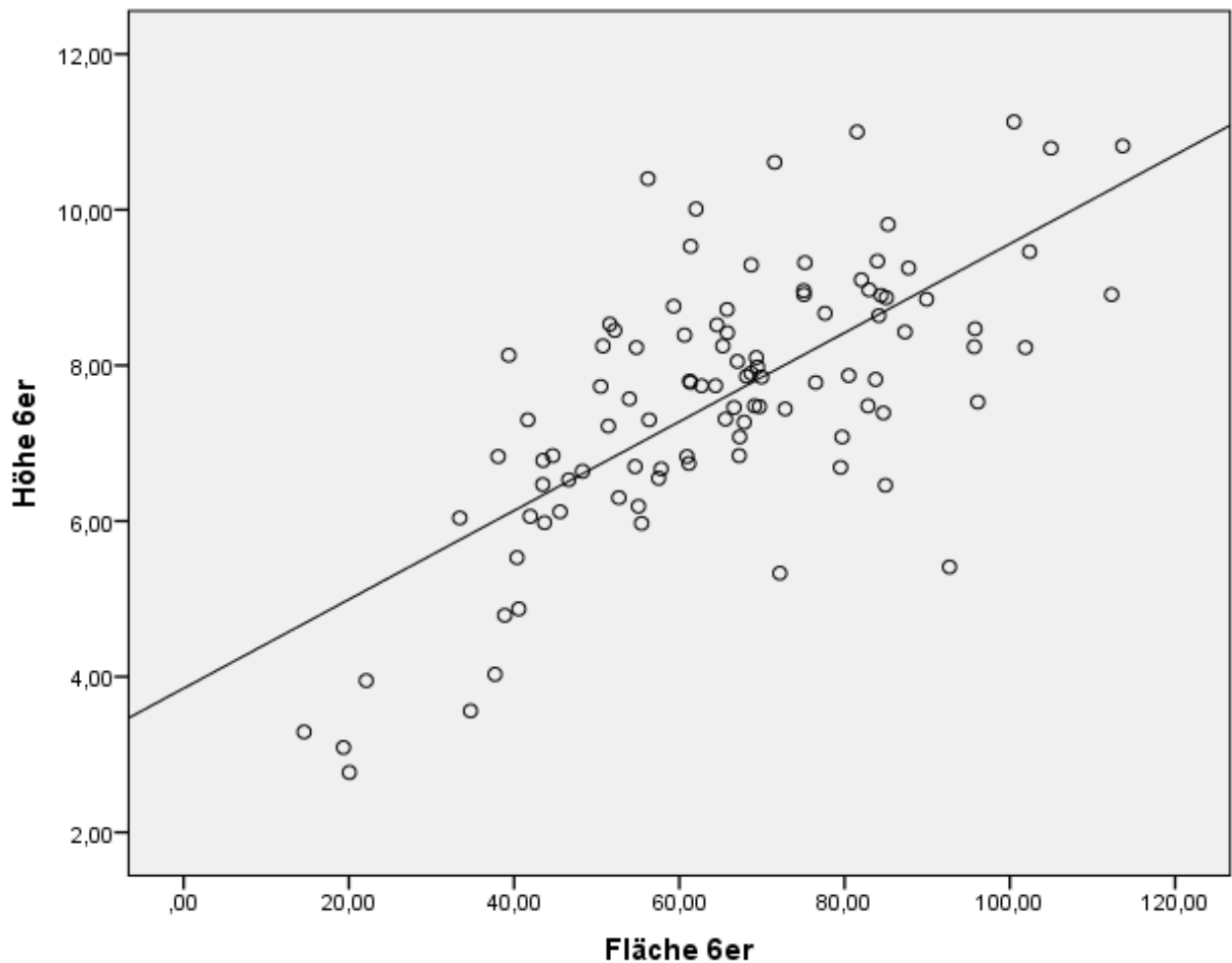


Abb. 38: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Knochenquerschnittsfläche der 6er Region und der Höhe des Knochens in dieser Region. Die beiden Größen korrelierten positiv miteinander. Die durchgezogene Linie stellt den positiven Zusammenhang dar ($R^2 = 0,481$). Es war ein statistisch signifikanter Zusammenhang nachweisbar ($p > 0,001$).

4.9. Korrelation zwischen Knochenbreite und Querschnittsfläche

In diesem Kapitel werden die Parameter Knochenbreite und Knochenquerschnittsfläche im Unterkieferlückenbereich auf einen statistischen Zusammenhang überprüft.

Nach Durchführung der Korrelationsanalyse nach Pearson zwischen der Breite des Knochens in der 6er Region auf Höhe der definierten Einsenkung mit der Knochenquerschnittsfläche in dieser Region, resultierte ein statistisch hoch signifikanter Zusammenhang ($p < 0,001$).

Der Korrelationskoeffizient betrug 0,511. Insgesamt ergab sich ein moderater positiver Zusammenhang ($R^2 = 0,262$). Damit konnte die Hypothese, „Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot in der Lücke“, bestätigt werden.

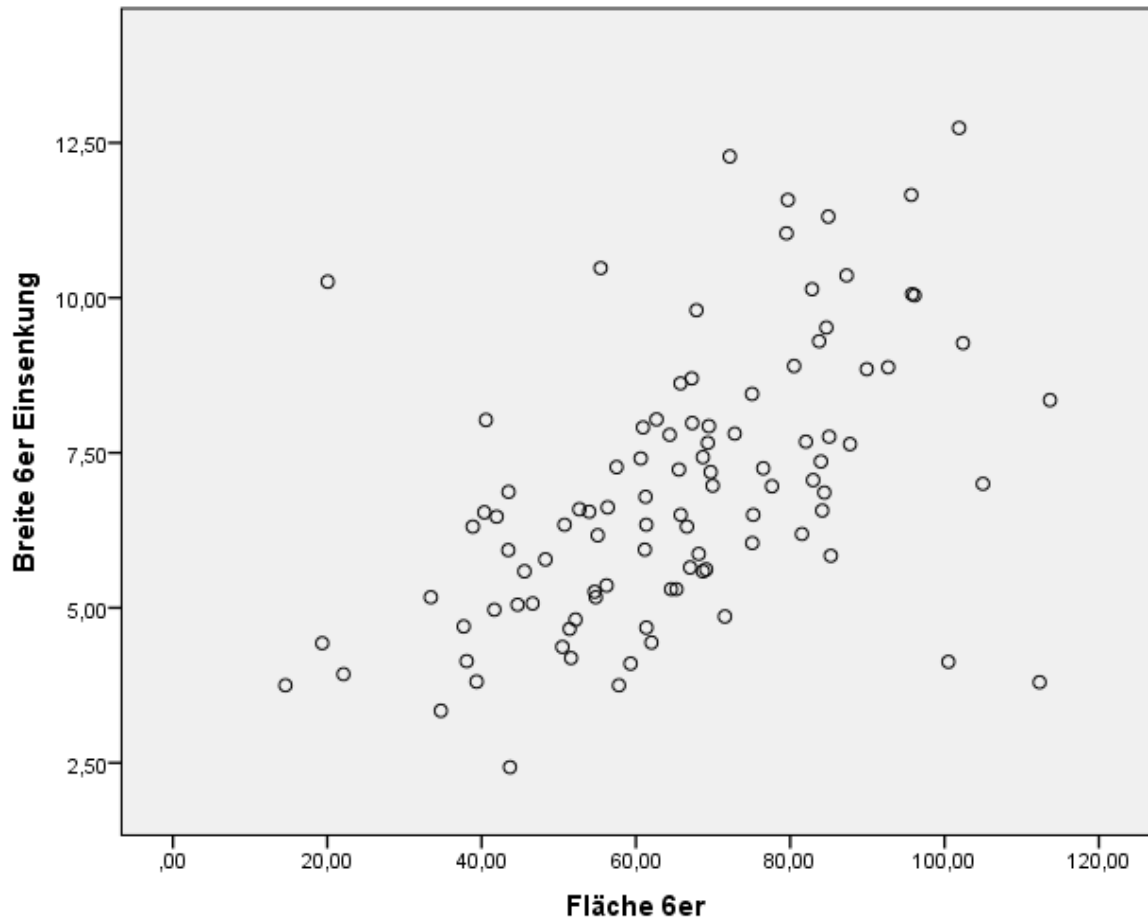


Abb. 39: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Knochenquerschnittsfläche in der 6er Region und der Breite des Knochens auf Höhe der definierten Einsenkung in dieser Region. Diese beiden Größen korrelierten positiv miteinander ($R^2 = 0,262$). Es war ein statistisch signifikanter Zusammenhang nachweisbar ($p < 0,0021$).

5. Diskussion

Seit mehr als 10 Jahren hat sich die digitale Volumentomographie in der Zahnmedizin etabliert. Vor allem in der Kieferorthopädie und in der zahnärztlichen Chirurgie ist die DVT ein viel genutztes Medium, um Befunde zu erheben, genaue Diagnosen zu stellen, einen geeigneten Behandlungsplan zu konzipieren um die entsprechende Therapie durchführen zu können.

Die verlagerungsfreie Darstellung verschiedener anatomischer Strukturen ist mit Hilfe des DVT in allen 3 Raumebenen möglich (Angelopoulos 2008). Die DVT ist außerdem die strahlenschonendere Method, im Gegensatz zur Computertomographie (Ludlow und Ivanovic 2008). Zudem liefert sie eine hervorragende Bildqualität (Rossini et al. 2012). Es ist durchaus denkbar, dass sich die DVT in der Zukunft als Standardaufnahme in der Zahnmedizin durchsetzt.

Das Ziel dieser Studie war es aufzuzeigen, wie häufig eine Implantatversorgung bzw. ein kieferorthopädischer Lückenschluss auf Grund des vorhandenen Knochenangebotes in einem klinischen Patientengut möglich ist. Außerdem sollte untersucht werden, ob eine Abhängigkeit des Knochenangebotes von dem Alter der Patienten, dem Alter der Lücke sowie dem Geschlecht vorliegt. Ein weiteres Ziel war es, zu beweisen, ob das transversale Knochenangebot einer Molarenlücke nicht vom vertikalen Knochenangebot in der Lücke abhängig ist. Ebenso sollte das transversale und vertikale Knochenangebot auf einen positiven Zusammenhang überprüft werden

Allein mit Hilfe von zweidimensionalen Röntgenverfahren, ist eine Aussage über die transversale Dimension nicht möglich. Bisher musste die vertikale Dimension als einziger Parameter dienen, um eine Aussage über das Knochenangebot in einer Lücke zu treffen. War genug vertikales Knochenangebot in einer Lücke vorhanden, ging man davon aus, diese Lücke mit entsprechenden therapeutischen Mitteln erfolgreich versorgen zu können. Letztendlich konnte man daraus nicht sicher ableiten, ob eine ausreichende Knochenquerschnittsfläche und somit auch ein ausreichendes transversales Knochenangebot vorhanden waren.

Röntgenaufnahmen mit zweidimensionalen Verfahren sind somit nicht ausreichend, um eine sichere Aussage über das quantitative Knochenangebot in einer Molarenlücke zu treffen. Detaillierte diagnostische Aussagen über das quantitative Knochenangebot einer Unterkiefermolarenlücke können nur nach Durchführung einer dreidimensionalen Röntgenaufnahme getroffen werden. Mit Hilfe der digitalen Volumentomografie lässt sich eine sichere diagnostische Aussage vornehmen. Es empfiehlt sich daher auf Basis der vorliegenden Ergebnisse dieser Studie die Analyse des Knochenangebots einer Unterkiefermolarenlücke mittels digitaler Volumentomographie durchzuführen.

5.1. Diskussion der Methoden

Die hier verwendeten DVT-Aufnahmen stammen aus dem Langzeitarchiv des 3D-Röntgennetzwerk MESANTIS®. In den meisten Fällen war die rechtfertigende Indikation die geplante Implantation. Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze stammten von verschiedenen MESANTIS® Instituten in Berlin, Hamburg, München, Heilbronn und Wiesbaden und wurden anonymisiert ausgewertet.

Die untersuchte Zahl an Patienten war als ausreichend einzustufen. In dieser Studie lag die Zahl der Patienten bei 100, in anderen Studien zwischen 34 und 119 (Mochizuki et al. 2014, Neupert 2013, Braut et al. 2012, Swasty et al. 2009).

Es wurden nur verwertbare Aufnahmen für die dargestellten Untersuchungen verwendet. Nichtverwertbare Aufnahmen können zum Beispiel entstehen durch Bewegung der Patienten, technische Fehler, falsche Einstellungsgrößen wie die Voxelgröße oder das FoV. Auch vorhandene metallische Füllungen, Brücken oder Kronen können zur Beeinträchtigung der Bildqualität führen und wurden von vornherein selektiert, wenn sie das untersuchte Gebiet betrafen.

Die Messanalyse erfolgte nur an verzerrungsfreien DVT-Aufnahmen. Um eine sorgfältige Vermessung zu gewährleisten wurde eine deutliche Darstellung der anatomischen Strukturen vorausgesetzt.

Um die Strahlenschutzrichtlinien einzuhalten, müssen sich die Maße des FoV nach den individuellen Gegebenheiten der Patienten richten. Dies bedeutet, dass je nach zu untersuchender Region, Patientenalter und Geschlecht, das FoV entsprechend festgelegt werden muss. Generell sollte das FoV 8,3 x 10,6 cm (Kinder 8,3 x 10,3 cm) betragen um die dentale Region vollständig zu erfassen (Krause 2010).

Die hier dargestellte Messmethodik musste fehlerfrei durchgeführt werden. Zur Selbstkalibrierung wurden daher zuerst DVTS nach dem Zufallsprinzip ausgesucht und daran Probemessungen unternommen. Erst nach einem Zeitraum von ca. 6 Wochen wurde die eigentliche Untersuchung und Messanalytik vorgenommen.

Bei der Auswertung der digitalen Röntgenbilder können sich Methodenfehler ergeben. Diese Methodenfehler können durch ein ungenaues Beurteilen der anatomischen Strukturen entstanden sein.

Es muss weitestgehend ausgeschlossen werden, dass durch den Anwender möglicherweise Verzerrungen entstehen. Trotz der Berücksichtigung aller Vorgaben sind solche Verzerrungen nicht auszuschließen.

5.2. Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Messparameter im DVT

Die Bearbeitung dieser Fragestellung bestätigte, dass es mit Hilfe geeigneter Messmethoden möglich ist, das quantitative Knochenangebot im Bereich der ersten unteren Molaren mit Hilfe der Digitalen Volumentomographie intraindividuell hinreichend reproduzierbar zu bestimmen.

Um die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Messungen zu überprüfen, wurde der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston mit Hilfe des Methodenfehlers nach Dahlberg berechnet. Der Methodenfehler nach Dahlberg sollte idealerweise unter 1 liegen (Dahlberg 1940). Der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston sollte für eine akzeptable Genauigkeit über 0,90 (90 %) liegen und für hohe zuverlässige Messungen über 0,97 (97 %) (Houston 1983, Mitgaard 1974). Dies war bei allen Variablen der Fall.

Dass die DVT eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit für Messungen der Knochenquantität im Kiefer bietet, wurde bereits in verschiedenen Studien beschrieben:

In der Studie von *Cassetta et al.* (2013) wurde sowohl die Knochendicke als auch die Knochendichte im Unterkiefer und Oberkiefer im Bereich der zweiten Molaren gemessen. Die Reproduzierbarkeit lag hier bei 97 % für die Dickenmessung und bei 98 % für die Dichtemessung. Jedoch erfolgte diese Untersuchung nicht im DVT, sondern im CT. *Ibrahim et al.* (2013) untersuchten die Genauigkeit der DVT zur Messung der Trabekelknochenmikrostruktur an Zahnimplantaten im Vergleich mit einem MikroCT (μ CT). Unter anderem wurde hier die Trabekelknochendicke (TbTh) mit der DVT und der μ CT untersucht. Die Studie ergab eine hohe Genauigkeit der DVT. Auch *Wood et al.* (2012) untersuchten die Knochenhöhe und Knochenbreite an oberen und unteren Molaren mit direkter Messung an Schweinepräparaten und mit Hilfe der DVT. Auch hier lag nur eine geringere Abweichung zwischen direkter Messung und DVT - Messung vor. Die Studie zeigte eine höhere Genauigkeit der Messungen im Unterkiefer als im Oberkiefer. Dies könne laut Wood an dem dickeren Knochen im Unterkiefer liegen. Durch die größere Transversale sei es für den Untersucher leichter, den kristallinen Kieferknochen zu finden. *Schattmann* (2011) untersuchte die Darstellung vestibulärer parodontaler Defekte in verschiedenen Auflösungen. Sie führte ebenfalls eine Fehlermessung durch. Diese ergab eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der angewandten Methoden.

Die Studie von *Timock et al.* (2011) untersuchte die Genauigkeit der DVT zur Messung von Knochenhöhe und -breite am bukkalen Alveolarknochen und die Übereinstimmung zwischen der DVT-Messung und der direkten Messung. Die Knochenhöhe und -breite wurde sowohl mit DVT-Messungen als auch mit direkter Messung an Schnittpräparaten erhoben. Die Studie ergab eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der DVT. Im Unterschied zur hier vorgelegten

Studie wurden die Messungen dreimal von zwei unterschiedlichen Personen durchgeführt. Im Vergleich zur direkten Messung und zur DVT-Messung, unterschieden sich die Höhenmessungen nicht signifikant voneinander. Zwischen der DVT-Messung und der direkten Messungen gab es Abweichung von 0,30 mm bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,98. Damit war die Übereinstimmung der Höhenmessung zwischen DVT und direkter Methode sehr hoch. Auch die Messwiederholung am DVT ergab eine hohe Korrelation (0,98). Somit war die Höhe im DVT besser reproduzierbar zu bestimmen als die Breite. Die hier vorgestellte Studie bestätigt diese Auswertung. Die Studie ergab ebenfalls eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der DVT-Breitenmessungen. Zwischen der DVT-Messung und der direkten Messung lag eine Abweichung von 0,13 mm vor, bei einem Korrelationskoeffizient von 0,86. Damit lag bei der Breitenmessung eine geringere Übereinstimmung zwischen DVT und direkter Methode vor. Die Messwiederholung in dieser Studie von *Timock et al. (2011)* am DVT ergab eine ausreichende Korrelation von 0,90/0,91. Damit war die Breite im DVT schlechter reproduzierbar zu bestimmen als die Höhe. Die hier vorgestellte Studie bestätigt auch diese Auswertung.

Bei Betrachtung der Messwiederholung fiel auf, dass die Knochenhöhe und Knochenbreite im Lückenbereich in der sagittalen Ansicht besser zu bestimmen war als die Knochenquerschnittsfläche in der transversalen Ansicht. Die Messungen wurden vom Untersucher manuell durchgeführt. Einzelne Punkte wurden entlang der Grenze der dargestellten Knochenquerschnittsfläche gesetzt. Hier konnte es durch die unterschiedliche Punksetzung zu Messungengenauigkeiten kommen. Zusätzliche Einflussfaktoren auf die Genauigkeit waren die Bildqualität und der Farbkontrast.

Mit Hilfe des zusätzlich erstellten Bland-Altman-Diagramms, konnte die Streuung der Differenzen der jeweiligen Messwertepaare und die Übereinstimmung der Messungen dargestellt und ermittelt werden. Dieser Bland-Altman-Methodenvergleich ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messwiederholungen aller Variablen. Es lag somit eine hohe Reproduzierbarkeit aller Variablen vor. Durch den Bland-Altman-Methodenvergleich wurde der Unterschied zwischen den beiden Messmethoden eindeutig erfasst.

5.2.2. Vertikales Knochenangebot im DVT

Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen, dass das vertikale Knochenangebot einer Lücke im Bereich der ersten unteren Molaren im Vergleich zum vertikalen Knochenangebot der vorhandenen zweiten Molaren reduziert ist.

Durch eine Zahnextraktion kommt es auf Grund physiologischer Regenerationsprozesse zwangsläufig zu einer Veränderung der Knochenmorphologie. In einer Studie von *Schropp et al.*

(2003) tritt im Verlauf des ersten Jahres nach erfolgter Extraktion der Großteil dieser Veränderungen ein. Im Unterkiefer kommt es dabei zu einer langsameren Regeneration als im Oberkiefer (Schropp et al. 2003). Vor allem für die weitere Behandlungsplanung mittels Implantaten spielt die Veränderungen der Extraktionsalveole und damit des vorhandenen Knochens in der Lücke eine bedeutende Rolle.

Die Studie von *Swasty et al.* (2009) untersuchte an 113 Patienten die Knochendicke, Knochenhöhe und Knochenbreite. Dabei zeigte sich eine Zunahme der Knochenhöhe von Posterior nach Anterior.

Braut et al. (2012) untersuchten ebenfalls die Knochenhöhe im DVT. An 56 Patienten erfolgten DVT-Aufnahmen und anschließend die Messungen zur Analyse des Knochens an Unterkieferprämolaren und Molaren. Dabei wurde neben transversalen Messungen auch der vertikale Abstand zwischen dem oberen Rand des Unterkieferkanals und dem koronalen alveolaren Knochen gemessen. Diese Knochenhöhe war für alle untersuchten Zähne konstant. Die Knochenhöhe an den ersten unteren Molaren betrug im Mittel mesial 14,82 mm und distal 14,79 mm. Die Höhe an den zweiten unteren Molaren betrug im Mittel mesial 13,52 mm und distal 13,49 mm. Damit war das vertikale Knochenangebot an den unteren 6ern leicht höher als an den 7ern. Das Ziel dieser Studie war es, die Knochenmorphologie und das Knochenvolumen mit Hilfe des DVT zu analysieren. *Braut et al.* (2012) propagierten eine genaue Analyse des quantitativen Knochenangebots vor einer Extraktion. Sie waren der Meinung, dass eine Knochenanalyse vor der Extraktion wertvolle Informationen über das Knochenangebot für den zukünftigen Implantationsort liefert und somit ein geeigneter Behandlungsansatz ausgewählt werden kann. Um eine gezielte Behandlungsplanung zur Lückenversorgung durchzuführen, ist jedoch das jeweilige aktuelle Knochenangebot von Bedeutung. Dieses Knochenangebot wurde von *Braut et al.* (2012) im DVT nicht untersucht.

Die hier vorgestellte Studie beschäftigte sich ausschließlich mit dem gegenwärtigen Knochenangebot in einer Unterkieferlücke. Daher konnte kein aussagekräftiger Vergleich mit den Daten der Studie von *Braut et al.* und der hier vorgestellten Studie gezogen werden.

Anzumerken ist, dass in der Studie von *Braut et al.* nicht die Höhe des Knochenverlusts in der Molarenlücke ermittelt wurde. Dies begründete er mit dem Vorhandensein mehrerer Studien zum vertikalen Knochenverlust anhand von OPG's (Peltola 1993, Rushton 2002, Teiser 2009).

5.2.3. Transversales Knochenangebot im DVT

Die vorliegende Studie bestätigte kein signifikant reduziertes transversales Knochenangebot in der Unterkieferlücke auf Höhe der definierten Einsenkung ($p = 0,285$), jedoch ein hoch signifikant reduziertes Knochenangebot auf Höhe des Alveolarfortsatzes ($p < 0,000$). Beim Vergleich zwischen mesialer Wurzelbreite des 7ers mit dem transversalen Knochenangebot in

der 6er Region war bei 26 % der Stichproben das Knochenangebot in der Lücke 1 mm größer als die Breite der mesialen Wurzel des 7ers. Daraus ist abzuleiten, dass nur 26 % der Patienten mit Molarenlücken im DVT ein ausreichendes transversales Knochenangebot für einen kieferorthopädischen Lückenschluss vorweisen konnten.

Das meist verwendete Implantat hat laut *Schiegnitz und Al-Nawas* (2013) einen Durchmesser zwischen 3,75-4,5 mm. Demnach müsste der Knochen in der Lückenregion mindestens 5,75 mm breit sein. In dieser Studie reichte bei insgesamt 68 % der Patienten das geforderte Knochenangebot im basalen Bereich für die Insertion eines Implantats mit 3,75 mm Durchmesser aus.

In verschiedenen Studien wurde das transversale Knochenangebot bereits untersucht. *Koch* (2014) studierte das Knochenangebot im Oberkiefer an Prämolaren und Molaren. Er analysierte den Alveolar- und Gaumenknochen in verschiedenen Entfernungen (13, 16, 19, 21 und 23 mm) von der palatinalen Kronenspitze aus. In seiner Studie befand sich das größere Knochenangebot an den ersten Prämolaren. *Cassetta et al.* (2013) bestimmte unter anderem die kortikale Knochendicke von zweiten Molaren in verschiedenen Abständen vom Alveolarfortsatz (2, 4, 6, und 8 mm) bukkal und oral. Die Studie ergab im posterioren Bereich höhere Werte als im anterioren Bereich. Diese Zunahme der Knochendicke bestätigte auch *Fransworth et al.* (2011). *Fayed et al.* (2010) untersuchten mit der DVT die interradikulären Räume und die kortikale Knochendicke. Die Untersuchung der kortikalen Knochendicke erfolgte im Ober- und Unterkiefer. Im Unterkiefer waren die höchsten kortikalen Dicken zwischen den ersten und zweiten Molaren zu verzeichnen. Auch *Katranji et al.* (2007) untersuchten im DVT die Alveolarknochen-Breite bukkal und lingual an Prämolaren und Molaren im Ober- und Unterkiefer und an unbezahnten Kiefern. Im Unterkiefer wurden jedoch nur die Frontzähne in die Messungen miteinbezogen. Die hiergenannten Autoren untersuchten jedoch nur das kortikale Knochenangebot und nicht die gesamte transversale Breite des Knochens. Außerdem erfolgten die Messungen nur an den vorhandenen Zähnen und nicht in Zahnlücken.

Braut et al. (2012) dagegen, untersuchte neben der kortikalen Knochendicke auch das transversale Knochenangebot an Prämolaren und Molaren. Die Alveolarknochenbreite wurde auf Ebene des am meisten koronal nachweisbaren bukkalen Knochens (BW1) und am oberen Rand des Unterkieferkanals (BW2) jeweils mesial und distal gemessen. Der Mittelwert für die BW1 an ersten unteren ersten Molaren lag für die mesiale Breite bei 10,44 mm und für die distale Breite bei 10,24 mm. Mittelwerte für die zweiten unteren Molaren lagen mesial bei 10,17 mm und distal bei 9,84 mm. Die Mittelwerte für die BW2 an unteren ersten Molaren lag für die mesiale Breite bei 9,96 mm und für die distale Breite bei 9,87 mm. Mittelwerte an unteren zweiten Molaren

lagen mesial bei 10,51 mm und distal bei 9,61 mm. Da die Messungen jeweils nur vor der Extraktion erfolgten, war es nicht möglich diese Daten mit denen der hier vorgestellten Arbeit zu vergleichen. Wie in 5.2.2. dargestellt, ist die Analyse des Knochens nach einer Extraktion maßgebend, um eine sichere Behandlungsplanung durchzuführen.

Swasty et al. (2009) untersuchte die Knochenbreite des Unterkiefers. Der Unterkiefer wurde dabei in verschiedene Drittel eingeteilt. Die Unterkieferbreite im oberen Drittel nahm vom posterioren Bereich der zweiten Molaren (14 mm) bis nach anterior ab. Die Unterkieferbreite im unteren Drittel blieb relativ konstant (10 mm) und nahm eher nach posterior leicht zu.

Ein Kriterium für die Auswahl der Datensätze war, dass diese für die metrischen Untersuchungen tauglich sein mussten. Die Voraussetzung für die vorliegende Untersuchung war, dass kein angulierter zweiter Molar in der Unterkieferlücke vorhanden sein sollte. Da bei vielen Patienten der Zahn 37/47 schon in die Molarenlücke anguliert war, konnte bei diesen Patienten keine Messung an der mesialen Wurzel erfolgen. Daher war es insgesamt schwierig, geeignete Patienten für diese Studie zu finden. Auch die durchgeführte Messmethodik kann unter folgenden aufgeführten Aspekten kritisch betrachtet werden. Der Breitenvergleich zwischen ersten und zweiten Molaren erfolgte in dieser Arbeit nicht immer auf der gleichen Höhe. Die Breite der mesialen Wurzel des 7ers auf Höhe des Alveolarfortsatzes war immer größer als die Breite des Knochens in der 6er Region auf Höhe der definierten Einsenkung. Dieser Vergleich zwischen der ersten und zweiten Molarenregion fand somit nicht auf der gleichen Ebene statt. Der Vergleich konnte somit kein ausschlaggebendes Argument sein, um eine hoch signifikante Aussage über das transversale Knochenangebot im Lückenbereich zu treffen. Die Messung der Knochenbreite in der Molarenlücke wurde einmal auf Höhe des Alveolarfortsatzes (Breite Alveolarfortsatz) und einmal auf Höhe der definierten Einsenkung (Breite Einsenkung) gemessen (siehe 3.2.1). Die Messung der Knochenbreite auf Höhe des Alveolarfortsatzes ergab bei fast allen Patienten Null. Nur in 4 % der Fälle war überhaupt eine Breite messbar. Daher lag hier eine sehr hohe Reproduzierbarkeit vor. Diese Variable war jedoch für die weitere Hypothesenüberprüfung nicht relevant. Der Vergleich zwischen der Knochenbreite und im Lückenbereich auf Höhe der Einsenkung und der mesialen Wurzel des 7ers auf Höhe der definierten Einsenkung ergab, dass im Lückenbereich kein signifikant reduziertes Knochenangebot vorlag. Das Knochenangebot im Lückenbereich auf der hier gemessenen tiefsten Ebene änderte sich somit nur gering.

Um aussagekräftigere Ergebnisse für diese Variable zu erhalten, hätte die „Breite Alveolarfortsatz“ in mehreren definierten Abständen gemessen werden können, ähnlich der Studie von *Cassetta et al.* (2013). Wobei in der hier vorliegenden Studie die gesamte

Knochenbreite in die Messung mit einbezogen wurde. Daher wäre eher an eine Messung analog der vorgestellten Methodik von *Braut et al.* (2012) zu denken.

In dieser Studie wurde das transversale Knochenangebot nicht auf krestaler, sondern nur auf basaler Ebene gemessen. Es wurde somit auf einer Ebene gemessen, die für die klinische Implantation nicht von großem Interesse ist. Eine Implantation wäre unter der Prämisse, dass die häufigste inserierte Durchmessergröße von 3,75 mm inseriert würde, bei 68 % der Patienten möglich. Dies geht jedoch nur, wenn für den krestalen Bereich zuerst ein Knochenaufbau mit entsprechendem Ersatzmaterial stattfinden würde. Entscheidend wäre es für zukünftige Studien noch zusätzlich das krestale Knochenangebot zu untersuchen.

Dass bei einem kieferorthopädischen Lückenschluss der Knochen automatisch mitwächst, wurde bisher noch nicht wissenschaftlich quantitativ belegt. Ein mesialer Lückenschluss wäre unter dieser Voraussetzung in 26 % der Fälle möglich.

5.2.4. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Patienten

Es konnte gezeigt werden, dass das Knochenangebot in der Molarenlücke unabhängig vom Patientenalter ist. Das Alter der Patienten rangierte in dieser Studie von 26 bis 78 Jahren.

Allein das Zustandekommen einer Zahnlücke durch Zahnverlust korreliert mit dem Patientenalter. Eine Studie von *Horn et al.* (2007) stellte den Zusammenhang zwischen dem Zahnverlust und einem höheren Lebensalter dar. Außerdem lag eine Korrelation des Zahnverlusts mit seltenen Zahnarztbesuchen, mit einer geringeren Lebensqualität in Bezug auf die Mundgesundheit sowie einer urbanen Wohnregion vor. Das Alter als Risikofaktor für Zahnverlust hoben *Rödiger* (2000) und *Weihrauch* (2002) hervor.

Eine Studie von *Panzer et al.* (2011) untersuchten die Ursachen für Zahnverlust. Die Daten hierzu wurden im Jahr 2007 bundesweit erhoben. In dieser Studie wurden bei insgesamt 12517 Extraktionen am häufigsten in der Altersgruppe von 45-70 Jahren extrahiert. Die höchste Extraktionsrate (10 %) lag bei Patienten die älter als 66 Jahre waren. Die ersten Molaren im Unterkiefer wurden in 20,6 % der Fälle auf Grund einer Parodontitis entfernt und in 48,2 % auf Grund von Karies.

Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie sind divergent zu anderen Studien, da diese eine Abhängigkeit des Knochenangebots zum Patientenalter ergaben.

Koch (2014) untersuchte wie in der hier vorliegenden Studie das Knochenangebot in Abhängigkeit vom Patientenalter. Er teilte die Patienten in eine jüngere (12-15 Jahre) und eine ältere (16-30 Jahre) Altersgruppe ein. Dabei lag das größere Knochenangebot (Median 4,12 mm) bei jüngeren Patienten vor. In der Studie von *Cassetta et al.* (2013) wurde die Knochendicke bei jugendlichen Patienten (12-18 Jahre) und erwachsenen Patienten (19-50 Jahre) untersucht. Hier-

bei war die kortikale Knochendicke bei jüngeren Patienten statistisch signifikant geringer ($p < 0,05$) als bei erwachsenen Patienten.

Sathapana et al (2013) untersuchten die alveoläre kortikale Knochendicke in Abhängigkeit vom Alter der Patienten im Unter- und Oberkiefer an Eckzähnen, Prämolaren und Molaren. Die Untersuchungen in dieser Studie erfolgte *post mortem* an 82 Patienten im Alter von 11- 50 Jahren. Im Unterkiefer wurde eine statistisch signifikante Korrelation zwischen dem Alter und dem kortikalen Knochen der labialen Seite des Unterkieferschneidezahnbereichs gefunden ($p = 0,017$). Eine statistisch signifikante negative Korrelation wurde zwischen dem Alter und der kortikalen Knochendicke in der Unterkiefer Eckzahnregion ($p = 0,033$) gefunden.

Farnsworth et al. (2011) untersuchte Alter, Geschlecht, und die regionalen Unterschiede der kortikalen Knochendicke an Insertionsorten von Minischraubenimplantaten. An insgesamt 52 Patienten erfolgten die DVT-Aufnahmen. Die Patienten wurden ebenfalls in verschiedene Altersgruppen eingeteilt. Es ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Altersgruppen von jugendlichen und erwachsenen Patienten ($p < 0,05$). Die Erwachsenen hatten insgesamt mehr kortikalen Knochen als die jugendlichen Patienten. *Fayed et al.* (2010) untersuchten mit der DVT die kortikale Knochendicke und den Einfluss des Alters auf die untersuchten anatomischen Messungen von 100 Patienten. Das Alter rangierte von 13-27 Jahren. Die Knochendicke der älteren Patienten war signifikant größer als die von jüngeren Patienten. *Swasty et al.* (2009) untersuchte ebenfalls den Einfluss des Patientenalters auf das Knochenangebot. An 119 Probanden, welche in Altersgruppen eingeteilt wurden, erfolgten DVT-Aufnahmen. Im Unterkiefer erfolgte die Untersuchung der Knochenhöhe und Knochenbreite, welche mit den Altersgruppen verglichen wurde. Dabei zeigte sich bei den Probanden, die 10 bis 19 Jahre alt waren, ein dünnerer kortikaler Knochen und eine verringerte Unterkieferhöhe im Vergleich zu allen anderen Altersgruppen. Bis zu einem Alter von 40 bis 49 Jahre, erreichte der Unterkiefer die größte Dicke und nahm nach diesem Zeitraum wieder in an Dicke ab. Jedoch ergab sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Knochenbreite und den Altersgruppen. Dies bestätigt das Ergebnis der hier vorliegenden Studie. Doch erfolgte die Untersuchung von *Swasty et al.* (2009) nur an bezahnten Kiefern und nicht in einer Unterkieferlücke.

Bei der Auswertung der Bilder für diese Studie fiel auf, dass DVTs von älteren Patienten oft deutlich mehr Verzerrungen aufwiesen als die der jüngeren Patienten. Ein Kriterium für die Auswertung der Röntgenaufnahmen könnte somit der Einfluss des Patientenalters auf die Bildqualität sein. In einer Studie von *Ritter et al.* (2009) wird dies bestätigt. Ein weiteres Kriterium könnte in der fehlenden Einteilung in Altersgruppen liegen. In der hier vorgelegten Studie war es jedoch nicht möglich, in verschiedene Altersgruppen einzuteilen. Nur 19 % der untersuchten

Patienten waren unter 45 Jahre alt. Insgesamt rangierte das Alter von 26-78 Jahren. Dies entspricht wiederum den Ergebnissen der Studie von *Panzer et al.* (2002), in der die häufigsten Extraktionen bei der Altersgruppe der 45-70-jährigen erfolgte.

5.2.5. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Alter der Lücke

In der hier vorgelegten Studie konnte keine Abhängigkeit des Knochenangebots vom Alter der Zahnlücke ermittelt werden.

In der Literatur findet die Betrachtung des Knochenangebots von Unterkiefermolaren im Zusammenhang mit dem Alter der Lücke bis jetzt nur wenig Beachtung. Vielmehr wird im Allgemeinen über das Ausmaß der Knochenresorption nach Zahnverlust berichtet.

Unmittelbar nach einer Extraktion findet Knochenabbau statt. Die ersten Anzeichen einer Kieferkammverschmälerung und -abflachung sind bereits nach 5 Wochen *post extractionem* zu beobachten (Schwarz et al. 2006). War die Molarenlücke erst ein paar Wochen oder Monate alt, lag das Knochenangebot meist schon sehr stark reduziert vor. In einer Studie von *Schropp et al.* (2003) war innerhalb der ersten 3 Monate ein Maximum des Hartgewebsverlustes und somit der Kieferkammatrophy zu verzeichnen. Vor allem veränderte sich die vertikale und horizontale Dimension sehr stark. Danach verlangsamte sich die Resorption. Verschiedene Studien an menschlichen Kieferknochen konnten in der Zeit von 4-12 Monaten nach der Extraktion einen horizontalen Verlust des Kieferkamms von 3,1 bis 5,9 mm ermitteln. Sie konnte somit eine horizontale Atrophie um ca. 50 % der initialen Breite des Alveolarkamms nachweisen. (Lekovic et al. 1997; Lekovic et al. 1998; Camargo et al. 2000; Iasella et al. 2003; Schropp, Wenzel et al. 2003, Pakravan 2010). Der vertikale Verlust des Kieferkamms betrug zwischen 0,7 und 1,5 mm (Camargo, et al 2000; Iasella et al. 2003; Schropp, et al. 2003).

Bei der Umfrage der Patienten bezüglich des Lückenalters erhielten wir nur 25 Antworten. Das Alter der Zahnlücke rangierte in dieser Studie von 0,5 bis 53 Jahren. Die meisten Patienten konnten zudem keine genaue Aussage über das Alter der vorhandenen Lücke machen. Viele Angaben waren ungenau und flossen nicht in die Auswertung mit ein. Die Ursache lag meistens am verminderten Erinnerungsvermögen der befragten Patienten. Außerdem bestand keine Möglichkeit, die Patientendaten von den jeweiligen Vorbehandlern zu eruieren.

Insgesamt zeigen diverse Studien, welchen Einfluss das Alter der vorhandenen Zahnlücke auf den Knochen hat. Eine genaue Kenntnis des Zahnlückenalters ist somit mit entscheidend für die weitere Therapie.

5.2.6. Knochenangebot in Abhängigkeit vom Geschlecht

In der hier vorgelegten Studie unterschied sich das Knochenangebot zwischen männlichen und weiblichen Patienten nicht signifikant. Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich war in dieser Studie unabhängig vom Geschlecht, jedoch war die Breite und Höhe abhängig vom Geschlecht.

Die Ursache für eine Zahnlücke ist ein vorzeitiger Verlust des Zahnes. In diesem Fall des ersten Molaren im Unterkiefer. Studien zeigen, dass die unterschiedlichen Ursachen für den Verlust der Molaren unabhängig vom Geschlecht sind. Die Studie von *Panzer et al.* (2011) ergab, dass für Männer und Frauen im Alter von 18-70 Jahren eher eine Parodontitis (32,5 % bis 33,2 %) als eine Karies (28,8 % bis 31,4 %) Ursache für den Zahnverlust war. Die Studie ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Extraktionsursachen Karies und Parodontitis in Abhängigkeit vom Geschlecht der Patienten. *Farnsworth et al.* (2011) untersuchte Alter, Geschlecht und die regionalen Unterschiede in der kortikalen Knochendicke an Insertionsorten von Minischraubenimplantaten. Er ermittelte in seiner Auswertung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern.

Dass Unterschiede in kortikalen Knochendicken von Frauen und Männern vorliegen, konnte die Studie von *Koch* (2014) nicht bestätigen. In seiner Studie lag der Median der weiblichen Patienten bei 3,4 mm und der Median bei männlichen Patienten bei 3,5 mm. Es lag kein statistischer Unterschied zwischen den Geschlechtern vor ($p = 0,9$). Dagegen konnten andere Studien signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern darlegen, wie die Studie von *Cassetta et al.* (2013) zeigt. Hier war die kortikale Knochendicke der Männer auf allen 4 gemessenen Ebenen größer als die der Frauen ($p < 0,05$). *Sathapana et al.* (2013) untersuchten ebenfalls die kortikale Knochendicke im Ober- und Unterkiefer an Eckzähnen, Prämolaren und Molaren in Abhängigkeit vom Geschlecht. Er untersuchte insgesamt 82 Patienten im Alter von 11 bis 50 Jahren und konnte an der bukkalen kortikalen Knochenwand der Oberkiefermolaren einen signifikanten Zusammenhang ermitteln ($p = 0,022$). Die Korrelationsanalyse der Geschlechter auf die alveoläre kortikale Knochendicke im Unterkiefer mit dem Alter ergab bei den Frauen eine größere alveoläre Veränderung als bei Männern. Die alveoläre Kortikalisdicke lingual in der retromolaren Region war bei Frauen größer als bei Männern. *Braut et al.* (2012) untersuchten ebenfalls im DVT die alveoläre Knochenhöhe und -breite. Dabei war die Knochenhöhe bei männlichen Patienten statistisch signifikant höher als bei Frauen ($p = ,0064$). *Fayed et al.* (2010) untersuchten mit der DVT die interradikulären Räume und die kortikale Knochendicke sowie den Einfluss des Geschlechts auf die untersuchten anatomischen Messungen. Die Knochendicke der Männer war in dieser Studie signifikant größer als die von Frauen. *Watanabe et al.* (2010) untersuchte

im CT unter anderem die Höhe und Breite des Unterkiefers. Die Unterkieferhöhe der männlichen Probanden war signifikant höher als die der weiblichen Probanden. Die Unterkieferbreite der männlichen Probanden war leicht, aber nicht signifikant größer als bei weiblichen Probanden. Die hier genannten Studien zeigten, dass bei Frauen ein größerer Knochenabbau vorliegt als bei Männern.

Die Mehrheit der Studien bestätigt somit eine Abhängigkeit des Knochenangebots vom Geschlecht der Patienten. Die hier vorgelegte Studie konnte dagegen weder eine eindeutige Abhängigkeit, noch eine Unabhängigkeit des Knochenangebots vom Geschlecht aufzeigen. Dies könnte möglicherweise an der vom Untersucher manuell durchgeführten Messung liegen. Dabei wurden die einzelnen Punkte entlang der Grenze der dargestellten Knochenquerschnittsfläche gesetzt. Hier könnte es durch die unterschiedliche Punksetzung zu Messungenauigkeiten gekommen sein, was möglicherweise die darauffolgenden statistischen Auswertungen verfälschen könnte.

5.2.7. Korrelation zwischen vertikalem und horizontalem Knochenangebot

Die hier vorgelegte Studie an 100 DVT-Datensätzen konnte beweisen, dass keine positive Korrelation zwischen dem vertikalen und transversalen Knochenangebot vorlag. Somit lässt sich aus einem bekannten vertikalen Knochenangebot nicht zwangsläufig das transversale Knochenangebot bestimmen und umgekehrt. Eine zweidimensionale Messung reicht demnach für präzisere Kenntnisse nicht aus. Mit Hilfe der DVT als strahlendschonendes dreidimensionales Röntgenverfahren ist eine sichere diagnostische Aussage über das transversale Knochenangebot möglich. Erst durch die Bestimmung dieser dritten Dimension ist das tatsächliche Knochenangebot bestimmbar.

Eine Lückenversorgung im Unterkiefermolarenbereich kann unterschiedlich therapiert werden:

- rein chirurgisch durch Re- oder Transplantation eines Zahnes.
- kombiniert chirurgisch-prothetisch durch Setzen eines Implantates zur Versorgung mit einer Krone.
- rein prothetisch, wenn man herausnehmbaren Zahnersatz außer Acht lässt, durch Brückenversorgung.
- kieferorthopädisch durch Mesialisierung des distal stehenden Zahnes.

Sowohl bei der Implantation als auch bei einer Mesialisierung ist eine besonders differenzierte Diagnostik des Knochenangebots der zu versorgenden Lücke zwingend erforderlich. Dies ist vor allem mit radiologischen Untersuchungen, sowohl zwei- als auch dreidimensional, möglich. Vor allem für implantologische Fragestellungen ist das horizontale Knochenangebot von besonderer Bedeutung (Watanabe et al. 2010, Braut et al. 2012, Song et al. 2014). Es entscheidet

über weitergehende chirurgische Vorgehensweisen wie resektive Maßnahmen oder Auflagerungs- und Expansionsplastiken. Mit der Orthopantomographie (OPTG) ist lediglich eine zweidimensionale Darstellung des Knochens möglich. Ein OPTG bietet daher nur eine Aussage über das sagittale und vertikale Knochenangebot. Im Gegensatz dazu, wird mit dreidimensionalen Verfahren auch die transversale Ebene erfasst. Die CT und DVT bietet eine optimale Darstellung des Knochenangebots in allen 3 Raumebenen. Doch stellt die DVT als strahlenschonenderes Verfahren die Methode der ersten Wahl dar (Bumann 2014).

In verschiedenen Studien wurde an DVT-Bildern bereits das Knochenangebot an Zähnen, in Zahnlücken oder an zahnlosen Kiefern untersucht. Bisher gibt es noch keine Studie welche, den Zusammenhang zwischen der vertikalen und horizontalen Dimension in einer Unterkiefermolarenlücke untersucht hat.

5.2.8. Korrelation zwischen Knochenhöhe und Querschnittsfläche

Zwischen dem vertikalen Knochenangebot und der Knochenquerschnittsfläche konnte in dieser Studie eine positive Korrelation ermittelt werden.

Die erfolgreiche Versorgung von Zahnlücken mit Implantaten setzt den Erhalt der knöchernen Struktur im geplanten Insertionsgebiet voraus.

Um die Größe der Knochenquerschnittsfläche in einer Zahnlücke weitestgehend zu erhalten, müssen nach einer Exzision Resorptionsvorgänge gering gehalten werden. Dies gelingt z.B. durch die Methode der Socket-/Ridge Preservation (Karnstedt 2011). Dabei wird die Exzisionsalveole mit allogenen (Kübler et al. 1993) oder xenogenem (Araujo et al. 2008) Knochenersatzmaterial aufgefüllt. Zusätzlich kann die Alveole beispielsweise mit einem freien Schleimhauttransplantat verschlossen werden

Andere Autoren untersuchten bereits das Knochenvolumen mit Hilfe DVT. *Shiratori et al.* (2012) untersuchte das Knochenvolumen, um Implantate an Gipsmodellen und DVT-Aufnahmen im Oberkiefer. Ziel dieser Studie war es, die Richtigkeit der Kegelstrahl-Computertomographie (DVT) zur Messung des Knochenvolumens um Zahnimplantate zu evaluieren. Die Ergebnisse zeigten, dass kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den DVT-Messungen und den Messungen an den Gipsmodellen um die Implantate vorlag. Das Knochenvolumen von Exzisionsalveolen untersuchte *Agbaje et al.* (2007). Er verglich dabei direkte Messungen an menschlichen Schädelpräparaten mit DVT-Messungen. Dabei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Messmethoden ($p > 0,1$). Die hier vorgelegte Studie unter-

suchte in einem definierten Bereich die Knochenquerschnittsfläche in ausgeheilten Zahnlücken. Daher ist ein direkter Vergleich mit diesen Studien nicht möglich.

Die Erklärung für die positive Korrelation in der hier vorgelegten Studie liegt in der Abhängigkeit des Knochenquerschnitts von der Knochenhöhe. Die Ergebnisse dieser Studie belegen, dass die Knochenquerschnittsfläche umso größer ist, je mehr vertikaler Knochen vorhanden ist.

Die präzise Auskunft der DVT über die knöchernen Verhältnisse einer Zahnlücke bietet entscheidende Vorteile in der gezielten Behandlungsplanung und -durchführung. So kann im Vorfeld das quantitative Knochenangebot genau analysiert werden. Dadurch erspart sich der Behandler zusätzlichen Aufwand sowie Zeit. In der Implantatdiagnostik hat das Knochenvolumen einen entscheidenden Einfluss auf die anschließende Therapie. Ist zum Beispiel genug transversaler Knochen vorhanden aber nicht genug vertikaler Knochen, können gegebenenfalls kürzere Implantate mit größerem Durchmesser verwendet werden. Für eine kieferorthopädische Behandlungsplanung (Mesialisierung) ist somit besser einzustufen, ob und mit welchen Hilfselementen und Kräftesystemen ein Kieferorthopädischer Lückenschluss erfolgen kann.

5.2.9. Korrelation zwischen Knochenbreite und Querschnittsfläche

Diese Studie konnte einen positiven Zusammenhang zwischen dem transversalen Knochenangebot und der Knochenquerschnittsfläche aufzeigen.

Als Ergebnis konnte damit gezeigt werden, dass die Knochenquerschnittsfläche in einer Unterkiefermolarenlücke umso größer ist, je mehr transversaler Knochen vorhanden ist.

Wie in 5.2.3 erläutert, untersuchten diverse Autoren das transversale Knochenangebot. Die kortikalen Knochendicken untersuchten *Cassetta et al. (2013)*, *Fransworth et al. (2011)*, *Fayed et al. (2010)* und *Katranji et al. (2007)*. Allerdings betrachtete keiner der genannten Autoren die gesamte transversale Breite. Die Untersuchungen erfolgten ausschließlich an vorhandenen Zähnen und nicht in einer Zahnlücke. Ebenso wurde die kortikale Knochendicke nicht mit dem Querschnitt verglichen.

Braut et al. (2012) dagegen untersuchte unter anderem auch das transversale Knochenangebot an Prämolaren und Molaren. Seine Messungen erfolgten jedoch nur jeweils vor einer Extraktion und nicht in der anschließend vorhandenen Zahnlücke.

In 5.2.8 wurde beschrieben, dass es mehrere Studien gibt, welche das Knochenvolumen mit Hilfe der DVT untersuchten. Allerdings gibt es bisher keine Studie, die Knochenquerschnittsfläche und Knochenbreite miteinander vergleicht.

Der hier ermittelte positive Zusammenhang zwischen Knochenhöhe und Knochenquerschnittsfläche verdeutlicht die Wichtigkeit um die Kenntnis des transversalen Knochenangebots mit Hilfe der DVT. Besonders in Fällen mit geringem Knochenangebot wird in der Implantologie ein Knochenaufbau gefordert (Farmand 1991). Zudem gilt es zu untersuchen, ob bei der Implantation sensible anatomische Strukturen in Mitleidenschaft gezogen werden könnten. Hierfür ist eine weit reichende Diagnostik mit Hilfe der dentalen Radiologie notwendig. Die digitale Volumetomographie ist in der Lage, diese geforderten Befunde zu erbringen.

5.3. Schlussfolgerung

Abschließend werden die in der Fragestellung gestellten Hypothesen nochmals aufgegriffen und anhand der ermittelten Ergebnisse beantwortet.

1. Die Höhe, Breite und Fläche des Knochenquerschnitts im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist im DVT intraindividuell hinreichend reproduzierbar zu bestimmen.

Die Hypothese kann bestätigt werden. Es lagen Zuverlässigkeitskoeffizienten zwischen 0,96 bis 0,99 vor. Außerdem konnte zwischen den Messwiederholungen kein signifikanter Unterschied ermittelt werden.

2. Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert.

Die Hypothese kann nicht bestätigt werden. Das vertikale Knochenangebot von 100 Patienten im Bereich der ersten Molaren (= Lückenbereich) betrug im Mittel 7,58 mm. Im Gegensatz dazu, betrug das vertikale Knochenangebot im Bereich der zweiten Molaren im Mittel 8,68 mm. Das vertikale Knochenangebot in der Unterkieferlücke der ersten Molaren war signifikant geringer als das Knochenangebot im Bereich der zweiten Molaren.

3. Das transversale Knochenangebot im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren ist nicht signifikant reduziert.

Die Hypothese kann nur zum Teil bestätigt werden. Das transversale Knochenangebot in der Unterkiefermolarenlücke war auf Höhe der definierten Einsenkung nicht signifikant reduziert ($p = 0,285$). Jedoch lag im Lückenbereich ein hoch signifikant reduziertes Knochenangebot auf Höhe des Alveolarfortsatzes vor ($p < 0,000$). Bei 74 % der Patienten war das Knochenangebot im Lückenbereich geringer als die geforderte Breitendifferenz von 1 mm zwischen

transversalem Knochen und Breite der mesialen Wurzel. Bei 68 % der Patienten reichte das geforderte Knochenangebot im basalen Bereich für die Insertion eines Implantats aus.

4. Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter des Patienten.

Die Hypothese kann nicht bestätigt werden. Die anatomischen Parameter der insgesamt 100 Patienten waren vom Alter unabhängig ($p > 0,05$).

5. Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind abhängig vom Alter der Lücke.

Die Hypothese kann nicht bestätigt werden. Die anatomischen Parameter von 100 Patienten waren vom Alter der Lücke unabhängig ($p > 0,05$).

6. Die anatomischen Parameter im Lückenbereich erster Unterkiefermolaren sind unabhängig vom Geschlecht der Patienten.

Die Hypothese kann nur teilweise bestätigt werden. Die Fläche im Lückenbereich ergab keinen statistischen Unterschied ($p = 0,785$) und war unabhängig vom Geschlecht, wohingegen die übrigen Parameter vom Geschlecht abhängig waren.

7. Das vertikale Knochenangebot im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot.

Die Hypothese kann nicht bestätigt werden. Die beiden Variablen korrelierten weder positiv noch negativ miteinander.

8. Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem vertikalen Knochenangebot in der Lücke.

Die Hypothese kann bestätigt werden. Es lag eine positive Korrelation von 0,694 vor.

9. Die Knochenquerschnittsfläche im Lückenbereich korreliert immer positiv mit dem transversalen Knochenangebot in der Lücke.

Die Hypothese kann bestätigt werden. Es lag eine positive Korrelation von 0,511 vor.

6. Literaturverzeichnis

Agbaje, J. O., Jacobs, R., Maes, F., Michiels, K., & Van Steenberghe, D. (2007). Volumetric analysis of extraction sockets using cone beam computed tomography: a pilot study on ex vivo jaw bone. *Journal of clinical periodontology*, 34(11), 985-990.

Agrawal, J. M., Agrawal, M. S., Nanjannawar, L. G., & Parushetti, A. D. (2013). CBCT in orthodontics: the wave of future. *The journal of contemporary dental practice*, 14(1), 153.

Anatomage, I. (2010). Invivo 5 Manual. 4-82.

Angelopoulos, C., Thomas, S., Hechler, S., Parissis, N., & Hlavacek, M. (2008). Comparison between digital panoramic radiography and cone-beam computed tomography for the identification of the mandibular canal as part of presurgical dental implant assessment. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 66(10), 2130-2135.

Araujo, M., Linder, E., Wennström, J., & Lindhe, J. (2008). The influence of Bio-Oss Collagen on healing of an extraction socket: an experimental study in the dog. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 28(2).

Bartelt, A., Bartelt, B. and Paulus, G. (2014) Interdisziplinäre Zusammenarbeit von Kieferorthopädie und Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. *Journal für Ästhetische Chirurgie*, 7(1): 16-20.

Bland, J. M., & Altman, D. G. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical methods in medical research*, 8(2), 135-160.

Bland, J. and Altman, D. (2010) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *International Journal of Nursing Studies*, 47 (8): 931-936.

Bland, J. M., & Altman, D. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The lancet*, 327(8476), 307-310.

Bauer, W., Wehrbein, H., Schulte-Lünzum, H., & Diedrich, P. (1991). Keimtransplantation oder Lückenschluß—eine vergleichende Studie bei Verlust der ersten Molaren. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 52(2), 84-92.

Berkovitz, B. K. B; Holland, G. R; Moxham, B. J u. a. (2009): *Oral anatomy, embryology and histology*. Edinburgh: Mosby, 169.

Bosshardt, D. D., Schroeder, H. E. (1992). Initial formation of cellular intrinsic fiber cementum in developing human teeth. *Cell and Tissue Research*, 267 (2), 321– 335.

Bosshardt, D. D., Schroeder, H.E.(1991). Establishment of acellular extrinsic fiber cementum on human teeth. *Cell and Tissue Research* , 263(2), 325–336.

- Bosshardt, D. D., Selvig, K. A. (1997). Dental cementum: the dynamic tissue covering of the root. *Periodontology* 2000, 13(1), 41–75.
- Botticelli, S., Verna, C., Cattaneo, P. M., Heidmann, J., & Melsen, B. (2011). Two-versus three-dimensional imaging in subjects with unerupted maxillary canines. *The European Journal of Orthodontics*, 33(4), 344-349.
- Bourauel, C., Keilig, L., Rahimi, A., Reimann, S., Ziegler, A., & Jäger, A. (2007). Computer-aided analysis of the biomechanics of tooth movements. *International journal of computerized dentistry*, 10(1), 25-40.
- Braut, V., Bornstein, M. M., Lauber, R., & Buser, D. (2012). Bone dimensions in the posterior mandible: A retrospective radiographic study using cone beam computed tomography. Part 1—Analysis of dentate sites. *International Journal of Periodontics and Restorative Dentistry*, 32(2), 175.
- Bruhn, C. (1926). Die Brückenarbeit. In *Zahnärztliche Prothetik* (pp. 544-775). Springer Berlin Heidelberg.
- Buchmann, R. (2011). Patientengerechte Parodontologie. 1st ed. Stuttgart: Thieme, 8-13.
- Bumann A, persönliche Mitteilung, Berlin 2014.
- Burstone, C.J., Pryputniewicz, R.J. (1980): „Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces“. In: *American Journal of Orthodontics*. 77 (4), S.396-409
- Camargo, P., Lekovic, V., Weinlaender, M., Klokkevold, P., Kenney, E., Dimitrijevic, B., Nedic, M., Jancovic, S. and Orsini, M. (2000). Influence of bioactive glass on changes in alveolar process dimensions after exodontia. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 90(5):.581-586.
- Carinci, F. (2012). Survival and success rate of one-piece implant inserted in molar sites. *Dental research journal*, 9(Suppl 2), S155.
- Cassetta, M., Sofan, A., Altieri, F. and Barbato, E. (2013). Evaluation of alveolar cortical bone thickness and density for orthodontic mini-implant placement. *Journal of clinical and experimental dentistry*, 5(5):.245.
- Chang, C. H., Lei, Y. N., Ho, Y. H., Sung, Y. H., & Lin, T. S. (2014). Predicting the holistic force-displacement relation of the periodontal ligament: in-vitro experiments and finite element analysis. *Biomedical engineering online*, 13(1), 107.
- Chau, A. (2012). Comparison between the use of magnetic resonance imaging and conebeam computed tomography for mandibular nerve identification. *Clinical oral implants research*, 23(2):253-256.

- Chien, P., Parks, E., Eraso, F., Hartsfield, J., Roberts, W. and Ofner, S. (2009). Comparison of reliability in anatomical landmark identification using two-dimensional digital cephalometrics and three-dimensional cone beam computed tomography in vivo. *Dentomaxillofacial Radiology*, 38, 262-273.
- Christell, H., Birch, S. and Hedesiu, M. et al. Horner, K., Ivanauskaitė, D., Nackaerts, O. & Lindh, C. (2012), Variation in costs of cone beam CT examinations among healthcare systems, *Dentomaxillofacial Radiology* ;41:571-577.
- Cleff, T. (2011). *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, PASW (SPSS) und STATA*. 1st ed. Wiesbaden: Gabler.
- Cohnen M, Kemper J, Mobes O, Pawelzik J, Modder U. (2002) Radiation dose in dental radiology.; *Eur Radiol*. 12, 634-637.
- Coppenrath, E., Draenert, F., Lechel, U., Veit, R., Meindl, T., Reiser, M., & Mueller-Lisse, U. (2008). [Cross-sectional imaging in dentomaxillofacial diagnostics: dose comparison of dental MSCT and NewTom 9000 DVT]. *RoFo: Fortschritte auf dem Gebiete der Rontgenstrahlen und der Nuklearmedizin*, 180(5), 396-401.
- Creugers, N. H., Käyser, A. F., & Hof, M. A. (1994). A meta - analysis of durability data on conventional fixed bridges. *Community dentistry and oral epidemiology*, 22(6), 448-452.
- Dalchow, C., Weber, A. and Yanagihara, N. Bien, S., & Werner, J. A. (2006) Digital volume tomography: radiologic examinations of the temporal bone. *American Journal of Roentgenology*, 186 (2): 416-423.
- Diedrich, P. (2000) *Kieferorthopädie II*. 4th ed. München: Urban & Fischer. 241-259.
- Diedrich, P. (2005). *Kieferorthopädie: Spezifische kieferorthopädische Fragestellungen und interdisziplinäre Aufgaben/mit Beitr. von P. Diedrich..* (Vol. 3). Elsevier, Urban&FischerVerlag.
- Du Prel, J., Röhrig, B. and Hommel, G. & Blettner, M (2010) Auswahl statistischer Testverfahren. *Dtsch Arztebl*, 107 (19): 343-348.
- Duterloo, H. S. (1980). Knochenstruktur und Zahnbewegung. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 41(3), 177-185.
- Eckstein, P. (2006) *Angewandte Statistik mit SPSS*. 5th ed. Wiesbaden: Gabler, 91-95.
- Ehrenfeld, M. und Schwenzer, N., (2009) *Zahnärztliche Chirurgie*. 4. Auflage, Stuttgart: Thieme 240.
- Ehrenfeld, M. und Schwenzer, N., (2000). *Zahnärztliche Chirurgie*. 3. Auflage,. Stuttgart: Thieme.

- Engström, C., Granström, G., & Thilander, B. (1988). Effect of orthodontic force on periodontal tissue metabolism a histologic and biochemical study in normal and hypocalcemic young rats. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 93(6), 486-495.
- Farmand, M. (1991). Bewährte Methoden der präprothetischen Chirurgie. In *Fibrinklebung in der Mund-, Zahn-und Kieferheilkunde*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 88-98.
- Farronato, G. (2012) Direct 3D Cephalometric Analysis Performed on CBCT. *Journal of Information Technology & Software Engineering*
- Fawzy El - Sayed, K. M., Paris, S., Becker, S. T., Neuschl, M., Buhr, W., Sälzer, S., ... & Dörfer, C. E. (2012). Periodontal regeneration employing gingival margin - derived stem/progenitor cells: an animal study. *Journal of clinical periodontology*, 39(9), 861-870.
- Filippi, A., Lang, B. and Pohl, Y. (2004) Zahntransplantation. *Zahnärztl Mitt*, 9: 68-82.
- Flores-Mir, C., Burgess, C. and Champney, M. M., Jensen, R. J., Pitcher, M. R., & Major, P. W. (2006). Correlation of skeletal maturation stages determined by cervical vertebrae and hand-wrist evaluations. *The Angle Orthodontist*, 76 (1): 1-5.
- Fortini,A., Cacciafesta, V., Sfondrini, MF. et al. (2004). Clinical applications and efficiency of miniscrews for extra-dental anchorage. *Orthodontics*;1:87-98.
- Fuhrmann, A. (2013). *Zahnärztliche Radiologie*. 1st ed. Stuttgart: Thieme 72-175.
- French, D., Larjava, H., & Ofec, R. (2014). Retrospective cohort study of 4591 Straumann implants in private practice setting, with up to 10 year follow up. Part 1: multivariate survival analysis. *Clinical oral implants research*.
- Gavala, S., Donta, C. and Tsiklakis, K. Boziari, A., Kamenopoulou, V., & Stamatakis, H. C.e (2009) Radiation dose reduction in direct digital panoramic radiography. *European journal of radiology*, 71 (1): 42-48.
- Gijbels, F., Jacobs, R., Bogaerts, R., Debaveye, D., Verlinden, S., & Sanderink, G. C. H. (2005). Dosimetry of digital panoramic imaging. Part I: patient exposure. *Dento-Maxillo-Facial Radiology*, 34, 145-149.
- Gomes-Filho IS, Sarmiento VA, de Castro MS, Da Costa, N. P., Da Cruz, S. S., Trindade, S. C., & de Santana Passos, J. (2007). Radiographic features of periodontal bone defects: evaluation of digitized images, *Dentomaxillofac Radiology*, 36:256-62.
- Gonzales, C., Hotokezaka, H. and Yoshimatsu, M. M., Yozgatian, J. H., Darendeliler, M. A., & Yoshida, N. (2008) Force magnitude and duration effects on amount of tooth movement and root resorption in the rat molar. *The Angle orthodontist*, 78 (3): 502-509.

Gribel, B. F., Gribel, M. N., Frazão, D. C., McNamara Jr, J. A., & Manzi, F. R. (2011). Accuracy and reliability of craniometric measurements on lateral cephalometry and 3D measurements on CBCT scans. *The Angle orthodontist*, 81(1), 26-35.

Gutwald, R., Gellrich, N. C., & Schmelzeisen, R. (2010). *Einführung in die zahnärztliche Chirurgie und Implantologie*. 2nd ed. Deutscher Zahnärzte-Verlag, Köln.

Grünheid, T., Kolbeck Schieck, J. and Pliska, B. Ahmad, M., & Larson, B. E (2012) Dosimetry of a cone-beam computed tomography machine compared with a digital x-ray machine in orthodontic imaging. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 141 (4): 436-443.

Haney, E., Gansky, S. and Lee, J. Johnson, E., Maki, K., Miller, A. J., & Huang, J. C. (2010) Comparative analysis of traditional radiographs and cone-beam computed tomography volumetric images in the diagnosis and treatment planning of maxillary impacted canines. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 137 (5): 590-597.

Hartmann, S.(2010) Vergleichende Analysen zwischen dreidimensionaler und konventioneller Kephalmetrie bei Dysgnathiepatienten: digitale Volumtomographie versus laterales Fernröntgenseitenbild. Medizinische Dissertation. Würzburg.

Harzer, W. (2011) *Kieferorthopädie*. 1st ed. Stuttgart: Thieme, 160-180.

Helgert, S.(2008) Wurzelresorptionen an seitlichen Schneidezähnen bedingt durch palatinale Eckzahnverlagerung. Medizinische Dissertation, München.

Herkner, H., Müllner, M. and Herkner, H. & Müllner, M. (2011) Welcher statistische Test ist der richtige?. *Erfolgreich wissenschaftlich arbeiten in der Klinik: Grundlagen, Interpretation und Umsetzung: Evidence Based Medicine*, 79-85.

Herpetz-Dahlmann, B. Schulte-Markwort, M. and Warnke, A. (2003). *Entwicklungspsychiatrie: biopsychologische Grundlagen und die Entwicklung psychischer Störungen*. 1st. ed. Stuttgart: Schattauer.

Hintze, H., Wiese, M., & Wenzel, A. (2007). Cone beam CT and conventional tomography for the detection of morphological temporomandibular joint changes. *Dento maxillo facial radiology*, 36(4), 192.

Hirsch E, Wolf U, Heinicke F, Silva MA,(2008) Dosimetry of the conebeam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3DAccuitomo in different fields of view, *Dentomaxillofac Radiology*, 37: 268-273.

Hirschfelder, U. (1994) [Radiological survey imaging of the dentition: dental CT versus orthopantomography]. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 55 (1): 14-20.

Hilgers, M. L., Scarfe, W. C., Scheetz, J. P., & Farman, A. G. (2005). Accuracy of linear temporomandibular joint measurements with cone beam computed tomography and digital cephalometric radiography. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 128(6), 803-811.

Hoffmann, K. (2008) Cone-Beam-Tomografie mit FPD: Funktionsweise und Anwendungen. *Digital Dental News*, 2: 23-24.

Holberg, C., Steinhäuser, S., Geis, P., & Rudzki-Janson, I. (2005). Cone-beam computed tomography in orthodontics: benefits and limitations. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie*, 66(6), 434-444.

Honey, O., Scarfe, W. and Hilgers, M. Klueber, K., Silveira, A. M., Haskell, B. S., & Farman, A. G. (2007) Accuracy of cone-beam computed tomography imaging of the temporomandibular joint: comparisons with panoramic radiology and linear tomography. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 132 (4): 429-438.

Horn, J., Pistorius, J., Willershausen, B., Kraft, J.: Faktoren des Zahnverlustes bei Patienten mit herausnehmbarem Zahnersatz. *Dtsch Zahnärztl Z* 62, (2007). S. 403.

Houston, W. J. B. (1983). The analysis of errors in orthodontic measurements. *American journal of orthodontics*, 83(5), 382-390.

Huang, Y., Corpas, L. S., Martens, W., Jacobs, R., & Lambrichts, I. (2011). Histomorphological study of myelinated nerve fibres in the periodontal ligament of human canine. *Acta Odontologica Scandinavica*, 69(5), 279-286.

lasella, J., Greenwell, H. and Miller, R. Hill, M., Drisko, C., Bohra, A. A., & Scheetz, J. P. (2003) Ridge preservation with freeze-dried bone allograft and a collagen membrane compared to extraction alone for implant site development: a clinical and histologic study in humans. *Journal of Periodontology*, 74 (7): 990-999.

Ibrahim, N., Parsa, A. and Hassan, B. Stelt, P., Aartman, I. H., & Wismeijer, D. (2013) Accuracy of trabecular bone microstructural measurement at planned dental implant sites using cone-beam CT datasets. *Clinical oral implants research*.

Isaacson KG, Thom AR. (2001): *Orthodontic Radiographs – Guidelines*. London, UK: British Orthodontic Society.

Jacobs, C., Jacobs-Müller, C. and Luley, C. et al. Erbe, C., & Wehrbein, H. (2011) Orthodontic space closure after first molar extraction without skeletal anchorage. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie*, 72 (1): 51-60.

Jacobson, A., and R. Jacobson.(2006) *Radiographic cephalometry from basic to 3-D imaging*. Quintessence Pub Co.

Jakob, F., & Felsenberg, D. (2013). Grundlagen des Knochenstoffwechsels und pharmakologische Daten. *Der MKG-Chirurg*, 6(2), 72-79.

Janssen, J. and Laatz, W. (2009) *Statistische Datenanalyse mit SPSS*. 7th ed. Berlin: Springer.
Jónsdóttir, S. H., Giesen, E. B. W., & Maltha, J. C. (2012). The biomechanical behaviour of the hyalinized periodontal ligament in dogs during experimental orthodontic tooth movement. *The European Journal of Orthodontics*, 34(5), 542-546.

Karnstedt, J. (2011). *Klinische und histologische Ergebnisse der Socket-Preservation-Technik mit Bio Oss und Bio Gide nach Zahnextraktion mit Verlust der bukkalen Knochenlamelle: eine prospektive Patientenstudie bei Notwendigkeit einer gesteuerten Knochenregeneration.*, Medizinische Dissertation, Universität Frankfurt.

Kahl-Nieke, B. (2009). *Einführung in die Kieferorthopädie: Diagnostik, Behandlungsplanung, Therapie*. Köln:Deutscher Ärzteverlag, 181-189.

Katranji, A., Misch, K., & Wang, H. L. (2007). Cortical bone thickness in dentate and edentulous human cadavers. *Journal of periodontology*, 78(5), 874-878.

Kau, C. H., Richmond, S., Palomo, J. M., & Hans, M. G. (2005). Current Products and Practice Three-dimensional cone beam computerized tomography in orthodontics. *Journal of Orthodontics*, 32(4), 282-293.

Kawaura, C., Aoyama, T. and Koyama, S. Achiwa, M., & Mori, M. (2006) Organ and effective dose evaluation in diagnostic radiology based on in-phantom dose measurements with novel photodiode-dosimeters. *Radiation protection dosimetry*, 118 (4): 421-430.

Kopp S,(2011) *Digitale Volumetomographie- die präzise Darstellung dentaler Strukturen*,*Der freie Zahnarzt* 2011;55:1.

Krause J.,(2010) *Untersuchungen zum erforderlichen Field of View für die bildgebende 3D-Diagnostik in der Zahnmedizin* ,Medizinische Dissertation, Charité Berlin.

Kuckartz, U., S. Rädiker, T. Ebert and J. Schehl (2013) *t-Test: zwei Mittelwerte vergleichen*. Statistik, Berlin:Springer2013:159-184.

Kumar, V., Ludlow, J. and Soares Cevidanes, L. Mol, A. (2008) In vivo comparison of conventional and cone beam CT synthesized cephalograms. *The Angle orthodontist*, 78 (5): 873-879.

Kübler, N., Reuther, J., Kirchner, T., Priessnitz, B., & Sebald, W. (1993). Osteoinductive, morphologic, and biomechanical properties of autolyzed, antigen-extracted, allogeneic human bone. *Journal of oral and maxillofacial surgery*, 51(12), 1346-1357.

Küppers, K., (1971). Zusammenfassung. *Analyse der funktionellen Struktur des menschlichen Unterkiefers*, 83-85.

Kyriakou, Y., Kolditz, D. and Langner, O. Krause, J., & Kalender, W. (2011) Digital volume tomography (DVT) and multislice spiral CT (MSCT): an objective examination of dose and image quality., 183 (02): 144-153.

Lai, E., Liu, J. and Chang, J. Z. C., Tsai, S. J., Yao, C. C. J., Chen, M. H., ... & Lin, C. P. (2008) Radiographic assessment of skeletal maturation stages for orthodontic patients: hand-wrist bones or cervical vertebrae?. Journal of the Formosan Medical Association, 107 (4): 316-325.

Lang BR: (1994) A review of traditional therapies in complete dentures. J Prosthet Dent 72, 538-542.

Lapatki, B. and Radeke, J. (2014). Was Zähne bewegt. Wissen Kompakt, 8(3), S.3-17.

Lekovic, V., Camargo, P. and Klokkevold, P. einlaender, M., Kenney, E. B., Dimitrijevic, B., & Nedic, M. (1998) Preservation of alveolar bone in extraction sockets using bioabsorbable membranes. Journal of periodontology, 69 (9): 1044-1049.

Lekovic, V., Kenney, E. and Weinlaender, M. Lekovic, V., Kenney, E. and Weinlaender, M. et al. (1997) A bone regenerative approach to alveolar (1997) A bone regenerative approach to alveolar ridge maintenance following tooth extraction. Report of 10 cases. Journal of Periodontology, 68 (6): 563-570.

Lewis, F. T. (1906). *Stohr's Histology*. 6th U.S. ed. Philadelphia, Pa: P Blakiston's Son and Co.

Lopes, R., Reid, I. and Hobson R. (2007) The two-dimensional Kolmogorov-Smirnov test. XI International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, Nikhef, Amsterdam, the Netherlands.

Loubele, M., Bogaerts, R. and Van Dijck, E. E., Pauwels, R., Vanheusden, S., Suetens, P. & Jacobs, R. (2009) Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. European journal of radiology, 71 (3): 461-468.

Ludlow, J. B., Davies-Ludlow, L. E., & Brooks, S. L. (2003). Dosimetry of two extraoral direct digital imaging devices: NewTom cone beam CT and Orthophos Plus DS panoramic unit. Dento maxillo facial radiology, 32(4), 229.

Ludlow, J. B., Davies-Ludlow, L. E., & White, S. C. (2008). Patient risk related to common dental radiographic examinations. J Am Dent Assoc, 139(9), 1237-43.

Ludlow, J. and Ivanovic, M. (2008) Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 106 (1): 106-114.

Ludwig, B., & Glasl, B. Bock F. (2009). Selbstligierende Brackets: Konzepte und Behandlung. Stuttgart:Thieme, 10-17.

Ludwig, B., Glasl, B. and Kinzinger, G. Schwindling, F. P., Wilmes, B., & Lisson, J. (2009) Minischraubenverankerung für den singulären Lückenschluss im Molaren-und Prämolarenbereich-aktueller Stand, Biomechanik, Risiken, Limitationen. Informationen aus Orthodontie & Kieferorthopädie, 41 (02): 117-127.

Manson, J. D. (1963). The lamina dura. *Oral Surg*, 16, 432-438.

Mazor, Z., Lorean, A., Mijiritsky, E., & Levin, L. (2012). Replacement of a molar with 2 narrow diameter dental implants. *Implant dentistry*, 21(1), 36-38.

Misch, K., Yi, E. and Sarment, D. (2006) Accuracy of cone beam computed tomography for periodontal defect measurements. *Journal of periodontology*, 77 (7): 1261-1266.

Mitgaard, J., Björk, G. und Linder-Aronson, S.(1974): Reproducibility of cephalometric landmarks and errors of measurement of cephalometric cranial distances. In: *Angle Orthodontist*, Band 44:S. 56_61.

Mochizuki, N., Sugino, N. and Ninomiya, T. Yoshinari, N., Udagawa, N., & Taguchi, A. (2014) Association of cortical shape of the mandible on panoramic radiographs with mandibular trabecular bone structure in Japanese adults: a cone-beam CT-image analysis. *Oral Radiology*, 30 (2): 160-167.

Mozzo, P., Procacci, C. and Tacconi, A. Martini, P. T., & Andreis, I. B. (1998) A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *European radiology*, 8 (9): 1558-1564.

Mengering, F. (2011) Probleme der Hypothesenprüfung mittels Signifikanztests. Datenanalyse mit SPSS für Fortgeschrittene 1, Berlin: Springer, 276-297.

Mühlemann, H. R., & Rateitschak, K. H. (1963). Mechanische und elektronische Zahnbeweglichkeitsmessungen. *DZZ*, 22, 50-7.

Müssig, E., Wörtche, R. and Lux, C. (2005) Indications for digital volume tomography in orthodontics. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie*, 66 (3): 241-249.

Nervina, J. M. (2012). Cone beam computed tomography use in orthodontics. *Australian dental journal*, 57(s1), 95-102.

Normando, A. D., Maia, F. A., Ursi, W. J., & Simone, J. L. (2009). Dentoalveolar changes after unilateral extractions of mandibular first molars and their influence on third molar development and position. *World journal of orthodontics*, 11(1), 55-60.

Nötzel, F., & Schultz, C. (2009). Leitfaden der kieferorthopädischen Diagnostik: Analysen und Tabellen für die Praxis. Köln: Deutscher Ärzteverlag.

Nötzel, F., Schultz, C., & Hartung, M. (2007) Fernröntgenseitenbild-Analyse. Köln: Deutscher Ärzteverlag, 233-235.

Neupert, J. (2013) Morphometrische Betrachtung der Mandibula klinisch symmetrischer Patienten – eine CT-Studie, Medizinische Dissertation, Erlangen-Nürnberg.

Palamidakis, F. D., Panou, A., Papadokostaki, K. G., Leontakianakos, G., Stathopoulos, V. N., & Kontakiotis, E. G. (2013). Device and materials for in vitro evaluation of forces developed to teeth and periodontal structures during dental practices. *Journal of dental biomechanics*, 4, 1758736013503648.

Pakravan, N. (2010). Versorgung frischer Extraktionsalveolen mit poly lactid vernetzten β -TCP-Wurzelreplikaten [Beta-TCP-Wurzelreplikaten]: eine histomorphometrische Tierstudie (medizinische Dissertation, Düsseldorf).

Pasler, F. A. (2008). Zahnärztliche Radiologie. Stuttgart: Thieme.

Patel, A. and Sandler, J. (2009) Richtlinien für Röntgenaufnahmen in der kieferorthopädischen Praxis. *Informationen aus Orthodontie & Kieferorthopädie*, 41 (01): 51-60.

Patzelt S. (2013). Bestimmung der Effektiven Dosis, des Dosisflächenprodukts und eines Korrelationskoeffizienten bei diversen dentalen digitalen Volumentomographen, medizinische Dissertation Freiburg.

Peltola, J. (1993) A panoramatomographic study of the teeth and jaws of Finnish university students. *Community dentistry and oral epidemiology*, 21 (1): 36-39.

Poeschl, P. W., Schmidt, N., Guevara-Rojas, G., Seemann, R., Ewers, R., Zipko, H. T., & Schicho, K. (2013). Comparison of cone-beam and conventional multislice computed tomography for image-guided dental implant planning. *Clinical oral investigations*, 17(1), 317-324.

Proffit W.R. (2000) : Contemporary Orthodontics. Calif: Mosby, Inc, 3. Auflage, St. Louis ,304.

Qu, X., Li, G. and Sanderink, G. C. H., Zhang, Z. Y., & Ma, X. C. (2014) Dose reduction of cone beam CT scanning for the entire oral and maxillofacial regions with thyroid collars. *Thyroid*, 100: 20.

Radlanski, R. (2011). Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie. 1st ed. Berlin: Quintessenz: 343-348.

Rasch, B., Friese, M. and Hofmann, W. Naumann, E. (2006) Quantitative Methoden. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Medizin Verlag Heidelberg.

Rateitschak, K., Rateitschak, E., Wolf, H. F. (2003). Farbatlanten der Zahnmedizin. Band 1: Parodontologie . 3. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 5-19.

Reitan, K. (1989). Biomechanische Prinzipien der Gewebsreaktion. *Grundlagen und moderne Techniken der Kieferorthopädie*. Quintessenz Verlag, Berlin, Chicago, London, Sao Paulo, Tokio. S, 149-270.

Ritter, L., Mischkowski, R. and Neugebauer, J. reiseidler, T., Scheer, M., Keeve, E., & Zöller, J. E. (2009) The influence of body mass index, age, implants, and dental restorations on image quality of cone beam computed tomography. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 108 (3): 108-116.

Rödiger, J. (2000) Risikofaktoren für Zahnverlust – Analyse repräsentativer und gesundheitsstudien. Dissertation. Dresden.

Rogers, L. F. (2001). Radiation exposure in CT: why so high?. *American journal of roentgenology*, 177(2), 277-277.

Rossini, G., Cavallini, C. and Cassetta, M. Galluccio, G., & Barbato, E. (2012) Localization of impacted maxillary canines using cone beam computed tomography. Review of the literature. *Annali di stomatologia*, 3 (1): 14.

Rushton, V., Horner, K. and Worthington, H. (2002) Routine panoramic radiography of new adult patients in general dental practice: relevance of diagnostic yield to treatment and identification of radiographic selection criteria. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 93 (4): 488-495.

Salama, H., Salama, M. A., Garber, D., & Adar, P. (1998). The inter-proximal height of bone: a guidepost to esthetic strategies and soft tissue contours in anterior tooth replacement. *J PractPeriodontics and Aesthetic Dentistry*; 10.1131-1141.

Sameshima, G. and Asgarifar, K. (2001) Assessment of root resorption and root shape: periapical vs panoramic films. *The Angle orthodontist*, 71 (3): 185--189.

Sathapana, S., Forrest, A. and Monsour, P. & Naser-ud-Din, S. (2013) Age-related changes in maxillary and mandibular cortical bone thickness in relation to temporary anchorage device placement. *Australian dental journal*, 58 (1): 67-74.

Schattmann, S. (2011) Dentale Volumetomographie in der Diagnostik vestibulärer parodontaler Defekte, medizinische Dissertation, Freie Universität Berlin.

Schiegnitz, E., & Al-Nawas, B. (2013). Durchmesserreduzierte Implantate–Eine Übersicht. *Implantologie*, 21: 251-256.

Schopf P (2008) Curriculum Kieferorthopädie. Band II. 4th ed. Kieferorthopädische Apparatesysteme Teil 2 - Werkstoffe / Festsitzende Apparaturen, Berlin: Quintessenz.

- Schopf, P. (1978) Herstellung und Auswertung von Handaufnahmen. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 39(4), 300-315.
- Schropp, L., Wenzel, A. and Kostopoulos, L. & Karring, T. (2003) Bone healing and soft tissue contour changes following single-tooth extraction: a clinical and radiographic 12-month prospective study. *International Journal of Periodontics and Restorative Dentistry*, 23 (4): 313-324.
- Schroeder, H. E., Listgarten, M. a. (1997). The gingival tissues: the architecture of periodontal protection. *Periodontology 2000*, 13(1), 91–120.
- Schupp, W. and Haubrich, J. (2010) Möglichkeiten und Grenzen der Invisalign-Behandlung. *Quintessenz*, 61 (8): 951-962.
- Schütz, S., Beck, I. and Kühl, S. & Filippi, A. (2012) Results after wisdom tooth transplantation. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin= Revue mensuelle suisse d'odonto-stomatologie= Rivista mensile svizzera di odontologia e stomatologia/SSO*, 123 (4): 303--308.
- Schwarz, A. M. (1932). Die Gewebsveränderungen bei orthodontischen Maßnahmen. *Fortschritte der Orthodontik in Theorie und Praxis*, 2(2), 154-176.
- Schwarz, F., Rothamel, D. and Herten, Sager, M., & Becker, J. (2006) Angiogenesis pattern of native and cross-linked collagen membranes: an immunohistochemical study in the rat. *Clinical Oral Implants Research*, 17 (4): 403-409.
- Schwenzer, N. and Ehrenfeld, M. (2000). *Zahnärztliche Chirurgie*. 3rd ed. Stuttgart: Thieme.
- Scurria, M. S., Bader, J. D., & Shugars, D. A. (1998) Meta-analysis of fixed partial denture survival: prostheses and abutments. *The Journal of prosthetic dentistry*, 79(4), 459-464.
- Seiffert, S. A. (2012) Kraftabgabe thermoplastisch geformter Schienen mit inzisaler Schlitzung zur orthodontischen Zahnbewegung. *Medizinische Dissertation*, Göttingen.
- Shiratori, L., Marotti, J. and Yamanouchi, J. (2012) Measurement of buccal bone volume of dental implants by means of cone-beam computed tomography. *Clinical oral implants research*, 23 (7): 797-804.
- Silva, M., Wolf, U. and Heinicke, F. et al. (2008) Chilvarquer, I., Contin, I., & Tortamano-Neto, P. Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: a radiation dose evaluation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 133 (5): 640-1.
- Smith, R. J., & Burstone, C. J. (1985) Mechanics of tooth movement. *American journal of orthodontics*, 85(4), 294-307.

Springate, S. (2012) The effect of sample size and bias on the reliability of estimates of error: a comparative study of Dahlberg's formula. *The European Journal of Orthodontics*, 34 (2): 158-163.

Staehele, H. (2012) Lückenschluss im Seitenzahnbereich durch direkte Zahnverbreiterungen als Alternative zu prothetischen und implantologischen Eingriffen. *Stomatologie*, 109 (7-8): 103-110.

Stelzenmüller, W. und Wiesner, J. (2010). Therapie von Kiefergelenkschmerzen. 2te Auflage. Stuttgart : Thieme.

Stiehl, J., Müller, B. and Dibbets, J. (2009) The development of the cervical vertebrae as an indicator of skeletal maturity: comparison with the classic method of hand-wrist radiograph. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie*, 70 (4): 327-335.

Suomalainen, A., Kiljunen, T., Käser, Y., Peltola, J., & Kortensniemi, M. (2009) Dosimetry and image quality of four dental cone beam computed tomography scanners compared with multislice computed tomography scanners. *Dento maxillo facial radiology*, 38(6), 367.

Swasty, D., Lee, J. and Huang, J. C., Maki, K., Gansky, S. A., Hatcher, D., & Miller, A. J. (2009) Anthropometric analysis of the human mandibular cortical bone as assessed by cone-beam computed tomography. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 67 (3): 491-500.

Teiser, H. (2009). Haupt-und Nebenbefunde bei der Auswertung von Panoramaschichtaufnahmen, Medizinische Dissertation, Münster.

Timock, A., Cook, V. and McDonald, T. Leo, M. C., Crowe, J., Benninger, B. L., & Covell, D. A. (2011) Accuracy and reliability of buccal bone height and thickness measurements from cone-beam computed tomography imaging. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 140 (5): 734-744.

Urban, T., Kostopoulos, L., & Wenzel, A. (2012) Immediate implant placement in molar regions: risk factors for early failure. *Clinical oral implants research*, 23(2), 220-227.

Van Leeuwen, E. J. Kuijpers-Jagtman, A. M., Von den Hoff, J.W., Wagener, F. A. D. T. G., & Maltha, J. C. (2010) Rate of orthodontic tooth movement after changing the force magnitude: an experimental study in beagle dogs. *Orthodontics & craniofacial research*, 13(4), 238-245.

Van Vlijmen, O., Berg'e, S. and Swennen, G. Bronkhorst, E. M., Katsaros, C., & Kuijpers-Jagtman, A. M. (2009) Comparison of cephalometric radiographs obtained from cone-beam computed tomography scans and conventional radiographs. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 67 (1): 92-97.

Vandenberghe, B., Jacobs, R. and Yang, J. (2007) Topographic Assessment of Periodontal Craters and Furcation Involvements by Using 2D Digital Images Versus 3D Cone Beam CT: an in-vitro Study. *Chinese Journal of Dental Research*, 10 (1): 21.

Van der Molen AJ, Veldkamp WJ, Geleijns J (2007) 16-slice CT: achievable effective doses of common protocols in comparison with recent CT dose surveys. *Br J Radiol*, 80(952):248-255 .
Vegter, F. and Hage, J. (2001) Facial anthropometry in cleft patients: a historical appraisal. *The Cleft palate-craniofacial journal*, 38 (6): 577-581.

Watanabe, H., Abdul, M. and Kurabayashi, T. & Aoki, H. (2010) Mandible size and morphology determined with CT on a premise of dental implant operation. *Surgical and radiologic anatomy*, 32 (4): 343-349.

Weihrauch, D.(2002) Die Entwicklung eines epidemiologischen Modells zur Identifizierung von Faktoren für den Zahnverlust – Ergebnisse der Study of Health in Pomerania (SHIP). Medizinische Dissertation. Greifswald.

Wichelhaus, A. (2012) Kieferorthopädie-Therapie Band 1: Grundlegende Behandlungskonzepte. 1st ed. Stuttgart:Thieme.

Wolf, H. F., Rateitschak, E. M., Rateitschak, K. H. (2005) Color atlas of dental medicine. Periodontology (3rd ed., pp. 8–18). Thieme.

Yokoya, K., Sasaki, T., & Shibasaki, Y. (1997). Distributional changes of osteoclasts and pre-osteoclastic cells in periodontal tissues during experimental tooth movement as revealed by quantitative immunohistochemistry of H⁺-ATPase. *Journal of dental research*, 76(1), 580-587.

7. Eidesstaatliche Erklärung

Ich, Julia Beier, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Dentale Volumentomografie zur Diagnostik von Molarenlücken im Unterkiefer – quantitative Untersuchungen zum Knochenangebot nach frühzeitigem Verlust der ersten Molaren“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

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

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

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

06.06.2016

Julia Beier

8. Lebenslauf

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

9. Publikationsliste

10. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mir bei der Fertigstellung meiner Promotion geholfen haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr. Axel Bumann, für die Überlassung des Themas und die stetige Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Weiterhin möchte ich mich beim gesamten MESANTIS Team Berlin für die immer hilfsbereite und freundliche Betreuung bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, die mir mein Zahnmedizinstudium ermöglichten und mich während meines Studiums und meiner Dissertation immer unterstützt haben. Außerdem möchte ich mich ganz herzlich bei Simone Drost für ihre Zeit und ihre Hilfe bei der Bearbeitung aller statistischen Fragen bedanken.

Meinem Verlobten, Felix Christoph Palm, möchte ich für seine Zuwendung und Unterstützung während der Erstellung meiner Dissertation danken.