

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktorin: Prof. Dr. Andrea Wichelhaus

Vermessung des menschlichen Parodontalspaltes anhand von DVT-Aufnahmen

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Hausner André
aus Immenstadt

2019

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität München

Berichterstatterin:	Prof. Dr. med. dent. Andrea Wichelhaus
Mitberichterstatter:	PD Dr. Jan-Frederik Güth Prof. Dr. Matthias Folwaczny
Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:	Dr. rer. nat. Sebastian Stapfner, Dipl.-Phys.
Dekan:	Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel
Tag der mündlichen Prüfung:	12.02.2019

Diese Dissertation ist in Dankbarkeit meinen Eltern gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Literaturübersicht.....	7
2.1	Anatomischer Aufbau des Zahnes und des Zahnhalteapparates	7
2.1.1	Der Zahn	7
2.1.2	Der Zahnhalteapparat	8
2.2	Biomechanische Grundlagen der Zahnbewegung	9
2.2.1	Die initiale Zahnbewegung.....	10
2.2.2	Die kieferorthopädische Zahnbewegung	10
2.3	Bislang zu diesem Thema veröffentlichte Studien	11
3	Fragestellung	13
4	Patienten und Methode	14
4.1	Patientenerfassung und Datenverwaltung	14
4.2	Protokollierung und Erstellung einer Excel-Datenbank	19
4.3	Digitales Volumetomogramm	20
4.3.1	DVT-Bildgebung und Technik.....	21
4.3.2	An der Zahnklinik München verwendete DVT-Geräte.....	22
4.4	Messmethodik.....	22
4.4.1	Festlegen der Zahnachse und Positionierung der drei Messebenen	23
4.4.2	Festlegen der Anzahl und Positionen der Messpunkte	25
4.4.3	Durchführung der Messung	26
4.5	Statistik	26
4.6	Verfahren der Gruppenbildung.....	27
4.7	Beschreibung der grafischen Präsentation der Messergebnisse	32
5	Ergebnisse.....	35
5.1	Inzisivi	35
5.2	Canini	59
5.3	Prämolaren.....	67
5.4	Molaren.....	77
5.5	Betrachtung des PDLs in Abhängigkeit unterschiedlicher Kriterien	87
5.5.1	PDL-Breite in Relation zum Lebensalter der Patienten	87
5.5.2	PDL-Breite im Vergleich OK zu UK	90
5.5.3	PDL-Breite in Abhängigkeit des Geschlechts	93
5.5.4	PDL-Breiten der untersuchten Zahngruppen.....	96
6	Diskussion	98
6.1	Diskussion von Material und Methode.....	98
6.2	Vergleich der Messergebnisse und -methodik mit anderen Studien	99
6.2.1	Betrachtung des PDLs in Relation zum Lebensalter	100
6.2.2	Vergleich Oberkiefer zu Unterkiefer	101
6.2.3	Einfluss des Geschlechtes auf die Größe des PDLs	102
6.2.4	Sanduhrförmiger Verlauf des PDLs	102

6.2.5	Vergleich einzelner Messpositionen.....	103
6.2.6	Radialsymmetrische Verteilung der Messwerte in den Messebenen	104
6.3	Unterschied zwischen DVT und anatomischen Präparaten.....	105
6.4	Bedeutung der Messergebnisse für die Kieferorthopädie.....	106
7	Zusammenfassung	107
8	Anhang	109
9	Literaturverzeichnis	114
10	Danksagung	117

1 Einleitung

Aufgrund einer immer größer werdenden Werkstoffvielfalt, der Verfügbarkeit neuer kieferorthopädischer Apparaturen sowie der Möglichkeit, mittels Finite-Element-Modellen (FE-Modellen) deren Einflüsse auf das stomatognathe System untersuchen zu können, ist eine detailgetreue Wiedergabe der tatsächlich vorliegenden anatomischen Verhältnisse für eine präzise Berechnung der am Zahnhalteapparat wirkenden Kräfte von überaus großer Bedeutung. Insbesondere die Parameter Kraftgröße (Faltin et al. 1998; Kurol et al. 1996; McFadden et al. 1989) und Behandlungsdauer (DeShields 1969; Harry und Sims 1982; Kurol et al. 1996; McFadden et al. 1989; Reitan 1974) sind hierbei die entscheidenden Faktoren für die durch die kieferorthopädischen Apparaturen verursachten Wurzelresorptionen.

Bei der kieferorthopädischen Zahnbewegung spielt der Parodontalspalt (PDL) eine wesentliche Rolle, da durch ihn die während der initialen Zahnbewegung einwirkenden Kräfte sowohl durch Streckung beziehungsweise Stauchung der Sharpeyschen Fasern als auch durch Verschiebung von Gewebeflüssigkeit und Blut gedämpft werden. Länger andauernde Belastungen induzieren eine zelluläre Reorganisation des umliegenden Alveolarknochens, wodurch es zu einer irreversiblen Stellungsänderung des Zahnes kommt. Für die Erstellung von FE-Modellen, mit deren Hilfe die durch kieferorthopädische Apparaturen auf den Zahnhalteapparat einwirkenden Kräfte berechnet werden können, wurden in der Vergangenheit zumeist PDL-Werte herangezogen, die anhand von anatomischen Präparaten ermittelt wurden (Coolidge 1937; Klein 1928).

Wie bereits erwähnt handelt es sich bei dem parodontalen Ligament um einen flüssigkeitsgefüllten Spalt, der unter einem mikroosmotischen Druck steht. Durch ein Fehlen dieses mikroosmotischen Druckes, wie dies unter anderem bei anatomischen Präparaten, bedingt durch den Prozess des Fixierens, der Fall ist, kommt es zu einer Diskrepanz der Spaltbreite *in vivo* und *ex vivo*. Ziel dieser Dissertation war es, mittels der retrospektiven Betrachtung von DVT-Aufnahmen den PDL *in vivo* und somit ohne Präparationsartefakte zu vermessen. Darüber hinaus sollte in diesem Zusammenhang untersucht werden, inwieweit die Faktoren Lebensalter, Geschlecht sowie Zahnanatomie die Breite des Parodontalspaltes beeinflussen.

2 Literaturübersicht

Um die Rolle des PDLs während der kieferorthopädischen Zahnbewegung sowie seine Bedeutung bei der computergestützten Zahnbewegung anhand von FE-Modellen besser verstehen zu können, sind Kenntnisse bezüglich des anatomischen Zahnaufbaues, des Zahnhalteapparates sowie deren Funktion von größter Wichtigkeit.

2.1 Anatomischer Aufbau des Zahnes und des Zahnhalteapparates

Das folgende Kapitel erläutert den anatomischen Aufbau des Zahnes, unterteilt in Zahnkrone und Zahnwurzel, sowie den Aufbau des Zahnhalteapparates (Abbildung 1).

2.1.1 Der Zahn

Der Aufbau des menschlichen Zahnes kann im Wesentlichen in zwei Bereiche unterteilt werden: die Zahnkrone mit der äußersten Schicht, dem Schmelz, und die Zahnwurzel, welche von Zement überzogen ist. Unter dieser äußeren Schicht befinden sich das Dentin und die Pulpa. Die Zahnkrone besteht aus der härtesten Substanz im menschlichen Körper (Hellwig et al. 2009), dem Zahnschmelz, der seinerseits wiederum zu ca. 93-98 Gewichtsprozent aus anorganischen Substanzen (Hellwig et al. 2009), vorwiegend jedoch aus Hydroxylapatitkristallen besteht. Unterhalb der Schmelzschicht befindet sich das Dentin, das innerhalb des Alveolarfaches von Wurzelzement umschlossen ist. Das Dentin besteht zu ca. 70 Gewichtsprozent aus anorganischem und zu 20 Gewichtsprozent aus organischem Material, der Rest ist Wasser (Hellwig et al. 2009). Das Dentin ist von vielen kleinen Kanälchen, den sogenannten Dentinkanälchen, durchzogen welche die Odontoblastenfortsätze beinhalten. Die Odontoblasten liegen direkt an der Pulpa-Dentingrenze an und sind in der Lage, Dentin nachzubilden. Über die Dentinkanälchen besteht somit eine direkte Verbindung zwischen dem Dentin und der darunter liegenden Pulpa (Steiniger 2010).

Die Pulpa bildet den weichgewebigen Kern des Zahnes und besteht vorwiegend aus Blutgefäßen, Nervenfasern, Lymphgefäßen und Zellen. Der die Zahnwurzel innerhalb des Knochenfaches umgebende Zement ähnelt in seinem strukturellen Aufbau dem Geflechtknochen. Hier inserieren die parodontalen Fasern, die den Zahn bindegewebig aufhängen.

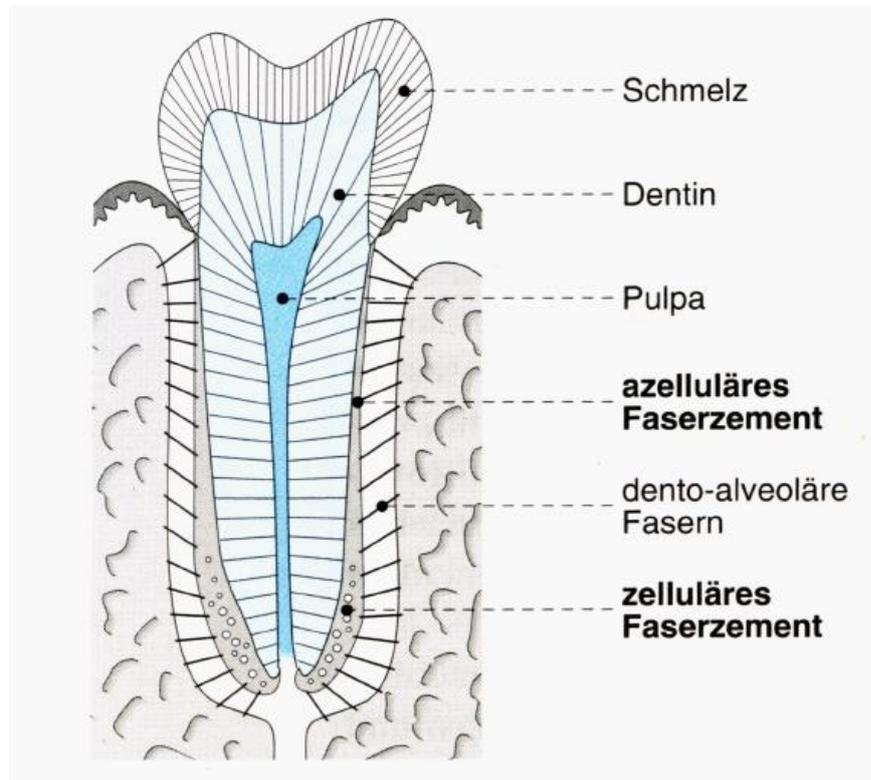


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Anatomie von Zahn und Zahnhalteapparat (aus: Hellwig et al. (2009). Einführung in die Zahnerhaltung. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, Seite 12, Abbildung 1.6 a; Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Zahnärzte Verlages)

2.1.2 Der Zahnhalteapparat

Das parodontale Ligament (PDL) umgibt die Zahnwurzel von allen Seiten und stellt somit eine syndesmotische Verbindung zwischen Zahn und Kieferkochen dar (Hellwig et al. 2009). Es besteht vorwiegend aus in Faserbündeln geordneten, unelastischen kollagenen Fasern. Im belastungsfreien Zustand liegen diese Fasern in gewellter Form vor (Berkovitz 1990; Natali et al. 2003). Seine Hauptaufgabe besteht, neben der Verankerung des Zahnes im Alveolarfach, vorwiegend darin, die bei der Mastikation entstehenden Kräfte abzdämpfen.

Betrachtet man den Zahn im Querschnitt (Abbildung 2b), so fällt auf, dass die Fasern in unterschiedlichen Winkeln an der Zahnoberfläche ansetzen. Je nachdem wie die Sharpeyschen Fasern am Zahn inserieren, erfüllen sie entsprechend ihrer Positionierung im PDL die nachfolgenden Funktionen. Durch die schrägen und längeren Fasern innerhalb des PDLs wird bei der initialen Zahnbewegung eine geringfügige Rotation und Kippung des Zahnes in oro-vestibulärer Richtung ermöglicht. Eine Extraktion des Zahnes wird vor allem durch die krestalen und

horizontalen Faserbündel verhindert, welche den Zahn im Alveolarfach fixieren. Durch die Faserbündel am Apex, die vorwiegend in horizontaler und in geringerer Anzahl in vertikaler Richtung ausgerichtet sind, wird ein Auslenken der Wurzelspitze verhindert (Steiniger 2010).

Neben den kollagenen Fasern, die den Hauptanteil des PDLs ausmachen, verlaufen in dem mit interstitieller Flüssigkeit gefüllten PDL unter anderem auch zahlreiche Blut-, Nerv- und Lymphgefäße (Berkovitz 1990; Hellwig et al. 2009; Natali et al. 2003). Der Zellpopulation des Desmodonts werden unter anderem auch die Osteoklasten, Osteoblasten, Zementoblasten, Malassez'sche Epithelreste und Leukozyten zugerechnet (Hellwig et al. 2009).

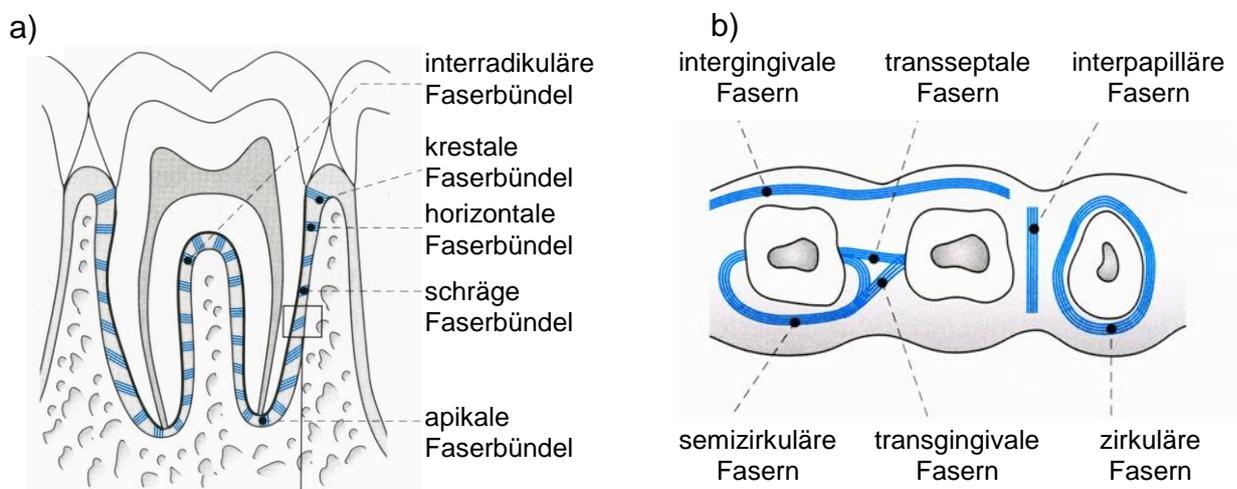


Abbildung 2: Fasern im PDL. a) Verlauf der desmodontalen Fasern eines unteren Molaren, b) Schematische Darstellung des Verlaufes der gingivalen Faserbündel, horizontaler Schnitt in Höhe der Schmelz-Zement-Grenze (aus Hellwig et al. (2009). Einführung in die Zahnerhaltung. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, Seite 441/443, Abbildung 15.6a und 15.7a; Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Zahnärzte Verlages)

2.2 Biomechanische Grundlagen der Zahnbewegung

Grundsätzlich lassen sich, je nach Belastungsdauer, zwei unterschiedliche Bewegungsformen der Zahnbewegung mit den ihnen eigenen Prozessen unterscheiden: zum einen die initiale Zahnbewegung, die für sich gesehen einen reversiblen Vorgang darstellt, der durch kurzzeitige Krafteinwirkung induziert wird, und zum anderen die kieferorthopädische-Zahnbewegung, bei der es, aufgrund länger anhaltender Belastung, zu einer irreversiblen Änderung der Zahnposition kommt.

2.2.1 Die initiale Zahnbewegung

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der initialen Zahnbewegung um einen reversibel elastischen Prozess, bei der das PDL eine wichtige Rolle spielt. Bei kurzzeitigen Belastungen mit moderaten Kräften kommt es, aufgrund der Steifigkeit von Knochen und Zahn, zu einer Deformation in Form einer Kompression und Streckung (Natali, 2003) des PDLs, wodurch jedoch keine geweblichen Umbauprozesse induziert werden (Baxmann 2007). Das PDL ermöglicht hierbei ein Abpuffern der einwirkenden Kräfte (He et al. 2016; Wills et al. 1972). Dies geschieht zum einen durch eine Verschiebung der sich innerhalb des Spaltes befindlichen Gewebsflüssigkeit und Blutes in den umliegenden Alveolarknochen und zum anderen durch eine Streckung der Sharpey-Fasern in der Zug- und einer Stauchung in der Druckzone (Abbildung 3).

2.2.2 Die kieferorthopädische Zahnbewegung

Bei einem längeren Anhalten der auf den Zahn applizierten Kräfte/Drehmomente kommt es, wie in der Kieferorthopädie gewünscht, zu einer irreversiblen Positionsänderung des Zahnes. Um einen Zahn kieferorthopädisch bewegen zu können, bedarf es einer kontinuierlichen Kraftapplikation von 4-8 Stunden. Je länger diese appliziert wird, desto effektiver ist in der Folge auch die Zahnbewegung (Proffit 2007). Eingeleitet wird dies unter anderem durch die Aktivierung von Osteoklasten (Krishnan und Davidovitch 2009), die zu einer Remodellierung des Alveolarknochens führen. Vereinfacht ist dieser dreidimensionale Vorgang der kieferorthopädischen Zahnbewegung in Abbildung 3 grafisch dargestellt.

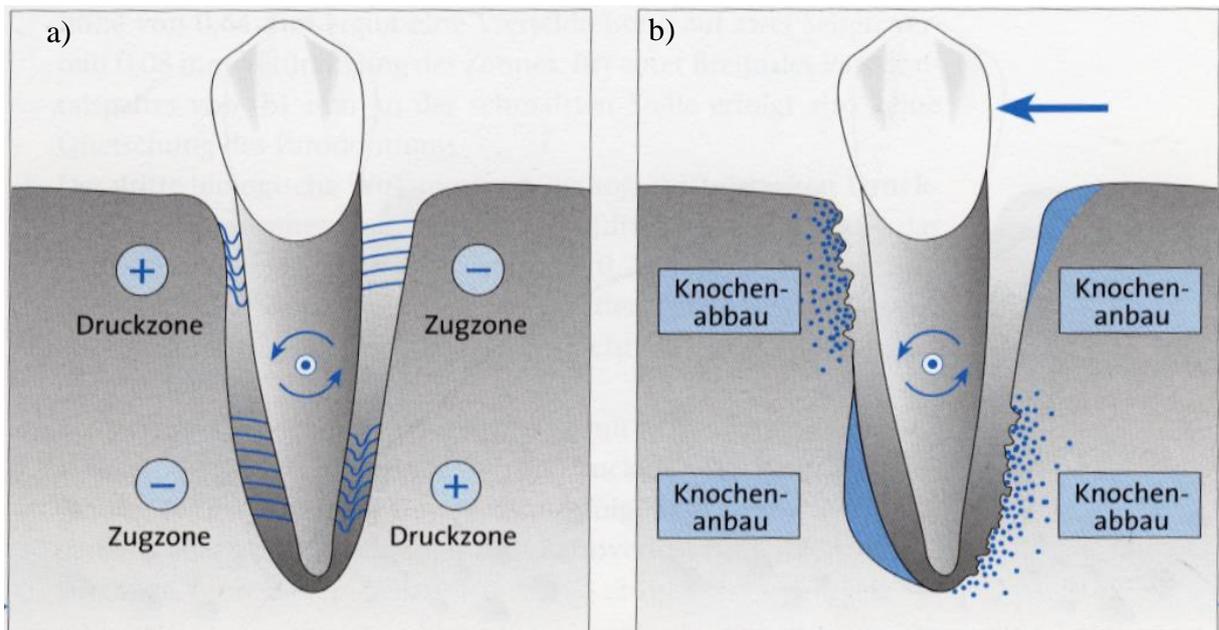


Abbildung 3: a) Druck- und Zugzonen b) Knochenabbau in der Druckzone, Knochenanbau in der Zugzone (aus Kahl-Nieke (2010). Einführung in die Kieferorthopädie Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, Seite 187, Abbildung 19-9; Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Zahnärzte Verla- ges)

Wie Abbildung 3 zeigt, kommt es bei dieser Art der Zahnbewegung im Bereich der desmodon- talen Zugzone, in der die Parodontalfasern gestreckt werden, zu einer Knochenapposition, wo- hingegen es in der ihr gegenüberliegenden Druckzone, bedingt durch Zellstimulation, zu einer Knochenresorption durch Osteoklasten kommt. Je nach Art und Ausmaß der kieferorthopädi- schen Zahnbewegung variieren die oben genannten Zonen in ihrer Lokalisation (Kahl-Nieke 2010; Wichelhaus 2013). In beiden Fällen, das heißt sowohl in der initialen als auch in der orthodontischen Zahnbewegung, nimmt dabei das PDL eine wichtige Rolle ein.

2.3 Bislang zu diesem Thema veröffentlichte Studien

Wie der Literatur zu entnehmen ist, basieren die bislang publizierten Angaben bezüglich der Größe des Parodontalspalttes zumeist auf Messungen an anatomischen Präparaten (Coolidge 1937; Keller 1931; Klein 1928; Kronfeld 1931). Dies gilt u.a. auch für die Studien von Coolidge (1937) der im Rahmen seiner Untersuchungen 1145 Messwerte anhand von 172 Zähnen an 15 Patienten erhob. Zu diesem Zweck wurden histologische Schnitte der Zähne angefertigt, wovon neun in mesio-distaler Ausrichtung, 79 in oro-vestibulärer Ausrichtung sowie an 23 Zähnen

Schnitte in beiden Ausrichtungen durchgeführt wurden. Die so gewonnen Proben wurden anschließend unter einem Mikroskop vermessen. Die Studie ergab, dass mit zunehmendem Alter die PDL-Breite abnimmt: 11-16 Jahre: 0,21 mm; 32-50 Jahre: 0,18 mm; 50-67 Jahre: 0,15 mm.

Die Studie von Klein (1928) basiert auf 950 Messungen die er mittels Mikroskop und Mikrometerokulars an 150 Zähnen durchführte. Diese Messungen ergaben, dass Zähne mit hoher funktioneller Belastung einen größeren PDL aufweisen als Zähne mit vergleichbar geringer Belastung. Klein (1928) konnte in seiner Studie ebenfalls den sanduhrförmigen Verlauf des PDL nachweisen, wobei er im Durchschnitt in der zervikalen Ebene einen Wert von 390 μm , in der mittleren Ebene von 170 μm und in der apikalen Ebene von 210 μm ermittelte.

Kronfeld (1931) untersuchte in seiner Studie die Ober- und Unterkiefer eines 38-jährigen Patienten, die kurz nach dem Tod des Patienten in Formalin fixiert wurden. Ein Schwerpunkt der Studie war es zu ermitteln, welchen Einfluss die funktionelle Beanspruchung der Zähne auf die Breite des Parodontalspaltes ausübt. Kronfeld (1931) kommt zu dem Schluss, dass funktionell beanspruchte Zähne eine größere PDL-Breite aufweisen als Zähne mit geringerer funktioneller Beanspruchung.

Keller (1931) untersuchte in seiner Studie anhand eines Probanden unbekanntes Alters, den Einfluss der funktionellen Belastung auf den Zahnhalteapparat und die einzelnen Gewebe. Er kam zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. die retroalveoläre Spongiosa wird durch die funktionelle Belastung beeinflusst.
2. im Vergleich zu den am Kauprozess nicht beteiligten Zähnen ist bei den Zähnen mit funktioneller Belastung die Zementbreite kleiner und die PDL-Breite größer.

Ein Kriterium das allen bislang bekannten Studien gemein ist, ist die Tatsache, dass in allen Fällen die Dicke des PDL stets *in vitro* ermittelt wurde. Hierdurch ergeben sich Nachteile wie Fixationsartefakte, Schrumpfungen durch Wasserentzug während der Fixation und auch ein fehlender osmotischer Druck, der *in vivo* vorhanden ist. Aufgabe dieser Studie war es daher, im Vergleich zu den vorgenannten Studien, die PDL-Spalten-Breite durch die Vermessung von DVT-Aufnahmen *in vivo* zu bestimmen.

3 Fragestellung

In der vorliegenden, retrospektiven Studie wurde die Breite des menschlichen Parodontalspaltes anhand von DVT-Aufnahmen ermittelt. Die herangezogenen Bilder entstammen der gemeinsamen Röntgendatenbank der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie (Direktor: Prof. Dr. R. Hickel) und der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik (Direktor: Prof. Dr. D. Edelhoff) der LMU München. Pro Zahn wurden hierbei drei transversale Messebenen festgelegt. Innerhalb dieser Messebenen wurden jeweils vier Messpunkte etabliert, welche in einem Winkel von 90° zueinander versetzt angeordnet sind. In Zahnängsachse wurde am Apex jeder Wurzel eines Zahnes ein vertikaler Messwert, im Falle von mehrwurzeligen Zähnen zusätzlich ein Messwert in der Furkation ermittelt. Ziel war es hierbei, die Breite des menschlichen Parodontalspaltes *in vivo* und somit ohne Verfälschung der ermittelten Werte durch Fixation zu vermessen.

Hierbei ergaben sich folgende Fragestellungen:

1. Welchen Einfluss hat das Lebensalter des Patienten auf die Breite des Parodontalspaltes?
2. Gibt es einen Unterschied in der PDL-Breite von Zähnen im Oberkiefer (nachfolgend als OK bezeichnet) und Unterkiefer (nachfolgend als UK bezeichnet)?
3. Welchen Einfluss hat das Geschlecht des Probanden auf die Breite des Parodontalspaltes?
4. Ergeben sich Unterschiede in den PDL-Breiten der unterschiedlichen Zahngruppen?

4 Patienten und Methode

In diesem Abschnitt werden einleitend in den Kapiteln 4.1 und 4.2 die Themenschwerpunkte Patientenerfassung, Datenverwaltung und Protokollierung behandelt, wobei sowohl auf die Herkunft der DVT-Datensätze, als auch auf die datenschutzrechtlichen Vorgaben und Auswahlkriterien für die Bearbeitung und Übernahme der DVT-Aufnahmen in die zu erstellende Datenbank eingegangen wird. Darüber hinaus gibt dieser Abschnitt einen Überblick über die Anzahl und Verteilung der erhobenen Messdaten. Im Anschluss daran werden in Kapitel 4.3 die technischen Grundlagen der DVT-Bildgebung erläutert. Abschließend werden in den Kapiteln 4.4 bis 4.7 die Themenschwerpunkte, Messmethodik, statistische Datenauswertung, Verfahren der Gruppenbildung, sowie die graphische Präsentation der Messergebnisse beschrieben.

4.1 Patientenerfassung und Datenverwaltung

Die für diese Studie herangezogenen DVT-Datensätze wurden ausschließlich aus der gemeinsamen Röntgendatenbank der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie (Direktor: Prof. Dr. R. Hickel) und der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik (Direktor: Prof. Dr. D. Edelhoff) der LMU München entnommen. Darüber hinausgehend wurden keine weiteren, zusätzlichen DVT-Aufnahmen angefertigt, da ähnlich wie bei jeder Röntgenuntersuchung auch bei der Anwendung der DVT grundsätzlich das „ALARA“-Prinzip gilt („as low as reasonable achievable“) (Farman 2005). Somit handelt es sich bei der hier vorliegenden Studie um eine rein retrospektive Studie, bei welcher die Aufnahmen bereits im Rahmen einer vorangegangenen medizinischen Indikation angefertigt wurden und somit durch die Ethikkommission als unbedenklich eingestuft wurden (Reg.-Nr. 076-13 vom 23.04.2013).

Die DVT-Datensätze in den genannten Röntgendatenbanken wurden zunächst gesichtet und entsprechend den nachfolgend beschriebenen Kriterien ausgewählt. Datensätze, welche diese Kriterien nicht erfüllten, wurden grundsätzlich nicht berücksichtigt bzw. exportiert.

1. Eine Mindestauflösung der Aufnahmen von 90 μm muss gegeben sein.
2. Keinerlei ersichtliche Artefakte wie Streustrahlung oder Bewegungsartefakte hervorgerufen unter anderem durch metallische Restaurationen, kieferorthopädische Apparaturen und

Implantate (Scarfe und Farman 2008). Anmerkung: Im Allgemeinen ist die Artefaktbildung im DVT im Vergleich zum Multislice-CT bei hochdichten Metallen, wie sie in Kronen und Brücken vorkommt, deutlich geringer ausgeprägt (Pauwels et al. 2013).

3. Sowie das Fehlen von pathologischen Veränderungen an Zähnen oder dem Alveolarknochen.

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurden die DVT-Datensätze beider an der Zahnklinik verwendeten DVT's (siehe Kapitel 4.3.2) bereits vor deren Export anonymisiert. Dies geschah in beiden Fällen mit Hilfe der „Dental Imaging Software“ (Carestream Health, Inc, Rochester, New York, USA). Diese Software ermöglicht ein automatisches Exportieren und Anonymisieren, wobei lediglich die Information bezüglich des Geburtsdatums, nicht aber die des Untersuchungsalters erhalten bleibt. Um dennoch auch zu einem späteren Zeitpunkt mögliche Zusammenhänge hinsichtlich des Geschlechts und Lebensalters der Probanden untersuchen zu können, wurden diese Informationen vor der Anonymisierung in der Excel-Datenbank manuell protokolliert.

Die Datenauswertung erfolgte mit Hilfe des Software Tools DICOM-Viewer OsiriX Version 4.1.2 (32-bit) (Pixmeo SARL, Bernex, Switzerland). Als Recheneinheit diente ein Apple MacPro, der mit 2 × 3 GHz Quad-Core Intel Xeon Prozessor, 5GB 667 MHz F8-DIMM Arbeitsspeicher und dem Betriebssystem Mac OS X Version 10.6.8 ausgestattet war. Das DICOM-Format („*Digital Imaging and Communications in Medicine*“) stellt einen international gültigen und weit verbreiteten Standard für die Bearbeitung, die Handhabung, sowie für das Drucken und die Weitergabe von medizinischen Bilddaten dar (Schulze 2013).

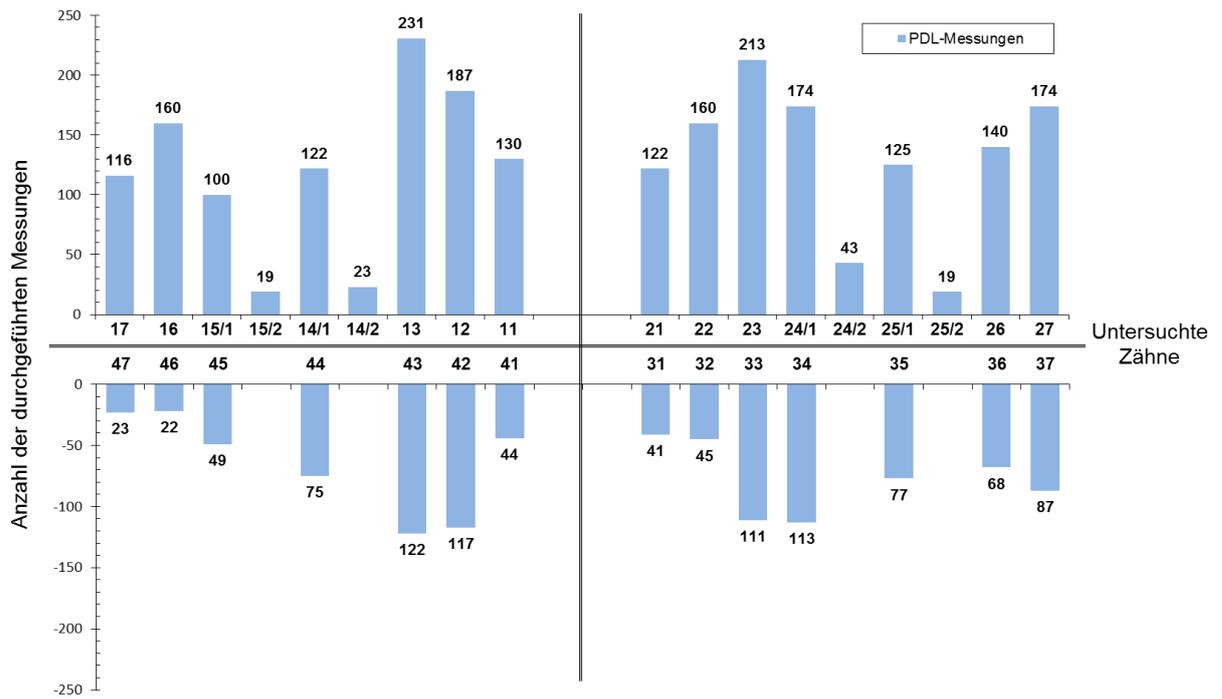


Abbildung 4: Zahl der je Zahn durchgeführten PDL-Messungen

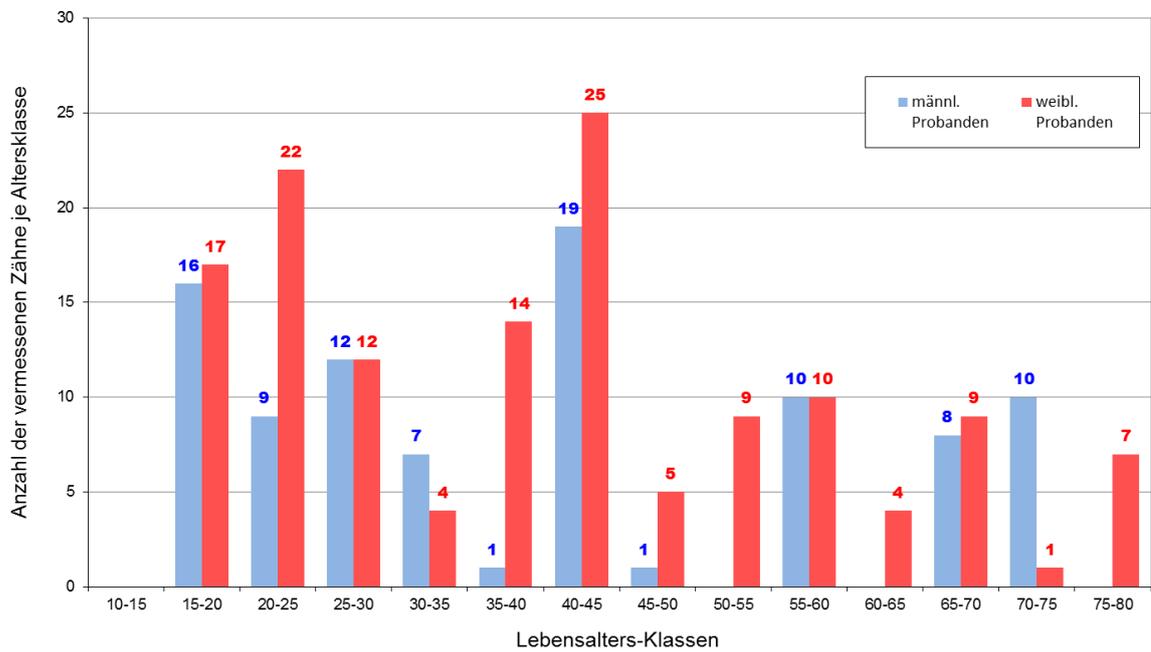


Abbildung 5: Anzahl der vermessenen Zähne

Für die hier vorliegende Arbeit wurden insgesamt 3.252 Messungen an 232 Zähnen durchgeführt (Abbildungen 4 und 5). In diese Studie eingeschlossen wurden insgesamt 25 Männer sowie 33 Frauen im Alter von 17 bis 78 Jahren (Abbildung 6, Tabelle 1).

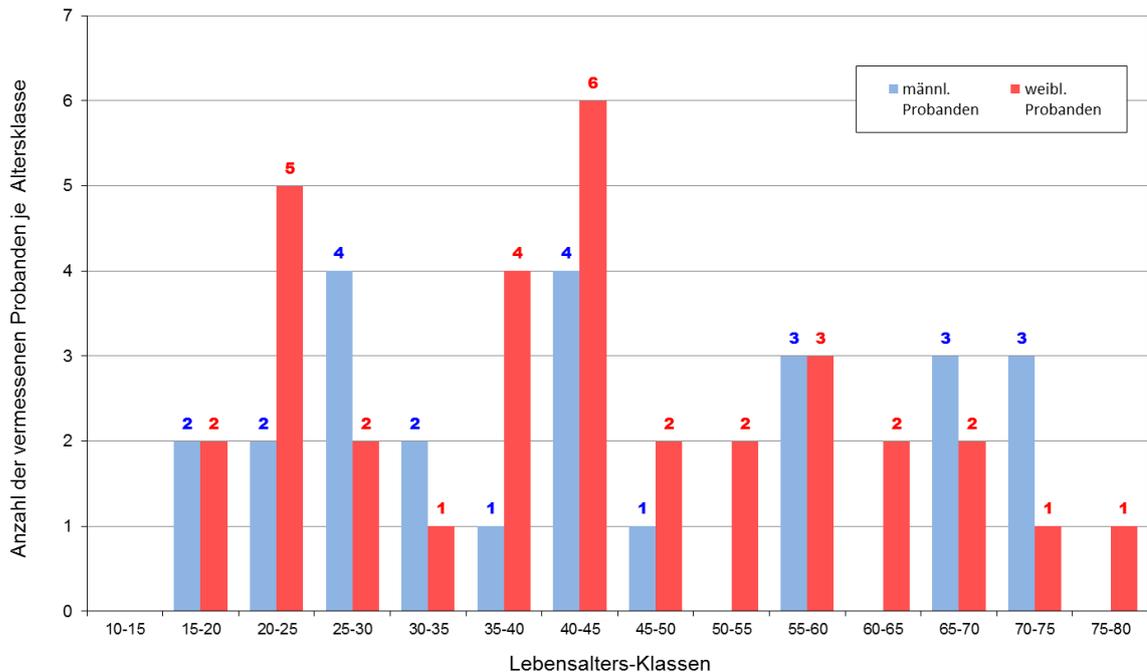


Abbildung 6: Anzahl der vermessenen Probanden

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenbasis, bzw. des vorgefundenen Altersspektrums, wurden die Probanden in drei Altersklassen (AK) zusammengefasst.

- AK 1: Lebensalter 10-30 Jahre
- AK 2: Lebensalter 30-50 Jahre
- AK 3: Lebensalter 50-80 Jahre

Die Festlegung der Altersklassen ergab sich hierbei unter anderem durch die retrospektive Betrachtung der Patienten, wobei anzumerken ist, dass die untersuchten Aufnahmen vorwiegend im Rahmen einer präimplantären Diagnostik angefertigt wurden.

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Messungen in Abhängigkeit von Lebensalters und Geschlechts der Patienten, sowie die errechneten absoluten- und relativen Häufigkeiten (N = 58; 25 männlich, 33 weiblich)

Anzahl der vermessenen Patienten:					
Lebensalter	Geschlecht	absolut	relativ	kumuliert	
				absolut	relativ
10 - 30 Jahre	weiblich	9	15,52%	9	15,52%
	männlich	8	13,79%	17	29,31%
31 - 50 Jahre	weiblich	13	22,41%	30	51,72%
	männlich	8	13,79%	38	65,52%
51 - 80 Jahre	weiblich	11	18,97%	49	84,48%
	männlich	9	15,52%	58	100,00%

Anzahl der vermessenen Zähne:

Zahngruppe	alle Patienten		Männer	Frauen
	Gesamt	OK / UK	OK / UK	OK / UK
incl. der 2-wurzigen Zähne:	232	156 / 76	66 / 27	90 / 49
excl. der 2-wurzigen Zähne:	227	151 / 76	63 / 27	88 / 49
MOLAREN:	30	21 / 9	6 / 4	15 / 5
PRÄMOLAREN:	67	42 / 25	20 / 6	22 / 19
CANINI:	57	37 / 20	14 / 7	23 / 13
INZISIVI [11+21]:	43	21 / 22	10 / 10	11 / 12
INZISIVI [12+22]:	52	30 / 22	13 / 10	17 / 12

Anzahl der durchgeführten Messungen:

	alle Patienten		Männer	Frauen
	Gesamt	OK / UK	OK / UK	OK / UK
incl. der 2-wurzigen Zähne:	3252	2258 / 994	916 / 358	1342 / 636
excl. der 2-wurzigen Zähne:	3148	2154 / 994	856 / 358	1298 / 636

Anmerkung:

Für den Fall, dass das aktuelle Lebensalter des Probanden exakt auf der Bereichsgrenze (Geburtsjahr) einer Altersklasse (AK) liegt, werden alle relevanten Mess- und Begleitdaten des Probanden sowohl in der darunter als auch in der darüber liegenden Altersklasse eingearbeitet/berücksichtigt. Hierdurch kann es in einigen Fällen dazu kommen, dass sich bei Aufsummierung der Messungen je Altersklasse ein im Vergleich zur Anzahl der tatsächlich durchgeführten Messungen geringfügig höherer Wert ergibt.

Ebenfalls ist zu erwähnen, dass bei der hier vorliegenden Auswertung die PDL-Messwerte korrespondierender Zähne (z. B. des ersten und zweiten bzw. des dritten und vierten Quadranten) aufgrund ihres vergleichbaren anatomischen Aufbaus zusammengefasst wurden (siehe Kapitel

4.5). Zur Bestätigung der getroffenen Annahme, bzw. Validierung der durchgeführten Messungen (Stichproben) erfolgte in allen untersuchten Fällen stets eine statistische Überprüfung mittels XLSTAT entsprechend den in Kapitel 4.6 beschriebenen Verfahren.

4.2 Protokollierung und Erstellung einer Excel-Datenbank

Um eine rasche und übersichtliche Erfassung der großen Datenmengen zu ermöglichen, wurde mit Hilfe des Programmes Microsoft Excel 2010 (Microsoft Coop., Redmond, Washington, USA) eine speziell den Erfordernissen der Untersuchung angepasste Eingabemaske erstellt. Die Eingabemaske teilt sich in zwei übergeordnete Themenblöcke (Abbildung 7).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2		Dateneingabe - File: (die Masseinheit der eingegebenen Zahlen-/Messwerte entspricht µm)														
3		PATIENT:	W 14.10.2012	17						16						
4		GEBURT S-DATUM:	10.10.1976	MESIAL	DISTAL	ORAL	VESTIB.	APEX	FURK	MESIAL	DISTAL	ORAL	VESTIB.	APEX	FURK	
5		Id. NR.:	ZERVIKAL	260	276	259	252		323	265	253	258	251		327	
6		1	MITTE P [O]	234	221	213	235			229	220	227	209			
7		MANN (s)	MITTE MB [V]	225	228	241	223			219	208	220	222			
8			MITTE DB	233	233	229	237			219	223	225	224			
9		FRAU (s)	APIKAL P [O]	258	254	254	306	283		278	346	266	237	290		
10		X	APIKAL MB [V]	259	238	277	264	361		275	275	272	265	325		
11			APIKAL DB	260	252	268	270	341		265	255		289	345		
12																
14		SCAN TAG	14.10.2012	47						46						
15				MESIAL	DISTAL	ORAL	VESTIB.	APEX	FURK	MESIAL	DISTAL	ORAL	VESTIB.	APEX	FURK	
16			ZERVIKAL	259	253	256	253		438	253	258	264	250		227	
17			MITTE M [O]	219	219	211	214			206	203	210				
18			MITTE D [V]	218	217	219	217			219	219	217	210			
19			APIKAL M [O]	252	253	253	253	322		244	234	235	252	255		
20			APIKAL D [V]	277	266	240	265	269		254	259	268	268	239		
21																

Abbildung 7: Excel-Eingabemaske

Dies ist zum einen der in Abbildung 7 rot gekennzeichnete Bereich zur Eingabe der persönlichen Patientenkenndaten (Geburtsdatum, Geschlecht, Patientencode, Datum der DVT-Untersuchung) und zum anderem der gelb hinterlegte Bereich zur Eingabe der erhobenen Messdaten. Berücksichtigt wird hierbei unter anderem auch die anatomische Lage der Wurzel bei mehrwurzeligen Zähnen. Der rechte Teil der Eingabemaske lehnt sich hierbei sehr stark an das

„Fédération Dentaire Internationale (FDI)“-Zahnschema nach Viohl an, bei dem das Gebiss in vier Quadranten, bestehend aus jeweils acht Zähnen, eingeteilt wird (siehe Abbildung 8).

Bleibendes Gebiss															
Oben rechts								Oben links							
18	17	16	15	14	13	12	11	21	22	23	24	25	26	27	28
48	47	46	45	44	43	42	41	31	32	33	34	35	36	37	38
Unten rechts								Unten links							

Abbildung 8: FDI-Zahnschema nach Viohl (ISO 3950)

Nach Abschluss der Messkampagne wurden die Daten des Eingabeblattes einmalig in die eigentliche Datenbank übernommen, aus der alle nachrangigen Excel-Datenblätter automatisch per Datenverknüpfung ihre Daten beziehen. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass

- a) alle Datenblätter mit den gleichen Daten/Datensätzen arbeiten und
- b) mögliche Änderungen innerhalb der Datenbank automatisch von den übrigen Datenblättern mittels Datenaktualisierung importiert werden.

4.3 Digitales Volumentomogramm

Bei der „Digitalen Volumentomographie“ (DVT), die erstmals im Jahre 1997 in der Zahn- und Kieferheilkunde eingeführt wurde (Cohnen et al. 2002), handelt es sich um ein dreidimensionales Tomographieverfahren, welches speziell für den Kopfbereich entwickelt wurde. Ziel der Entwicklung war es, zum einen die knöchernen Strukturen des menschlichen Schädels präziser und somit aussagekräftiger darzustellen und zum anderen die während der Untersuchung auf den Patienten einwirkende Strahlenexposition gegenüber dem konventionellen CT deutlich zu verringern (Scarfe und Farman 2008). Die Strahlenbelastung kann mit der Aufnahmetechnik mittels DVT um das 5-15-Fache gegenüber den Werten eines konventionellen CT reduziert werden (Cohnen et al. 2002; Dula et al. 2001; Mozzo et al. 1998; Scarfe et al. 2006). Neben den bereits angesprochenen technischen Vorteilen sprechen unter anderem auch wirtschaftliche Aspekte, wie z. B. die geringeren Anschaffungskosten, die leichte Bedienung (Zöllner 2007)

sowie die geringeren Aufnahmezeiten für den Einsatz des DVT (Mozzo et al. 1998; Suomalainen et al. 2015).

Von Nachteil sind hingegen die sich deutlich schwächer abzeichnenden Weichgewebekontraste sowie die auch beim CT auftretenden Bildartefakte, verursacht durch Metalle wie z. B. Amalgamfüllungen oder Kronen (Suomalainen et al. 2015), die die diagnostische Qualität des DVT beeinflussen können (Bechara et al. 2012).

4.3.1 DVT-Bildgebung und Technik

Ähnlich wie bei der herkömmlichen Computertomographie entstehen auch bei der digitalen Volumentomographie Schnittbilder, die durch eine sich um den liegenden, sitzenden oder auch stehenden Patienten drehende (Scarfe und Farman 2008; Zöllner 2007), 180° zueinander versetzte Sender-Detektoreinheit (Röntgenröhre, Bilddetektor) erzeugt werden. Die Besonderheit des DVT gegenüber anderen Schichtaufnahmetechniken besteht jedoch darin, dass sich die Sender-Detektoreinheit des DVT im Rahmen der Untersuchung lediglich einmal (360°) (Rother 2006) um das zu untersuchende stationäre Objekt dreht (Goch 2005; Scarfe und Farman 2008) und somit der Patient einer deutlich geringeren Strahlenexposition ausgesetzt ist. Während eines Umlaufs entstehen hierbei je nach Gerätetyp ca. 360 bis 400 Einzelaufnahmen.

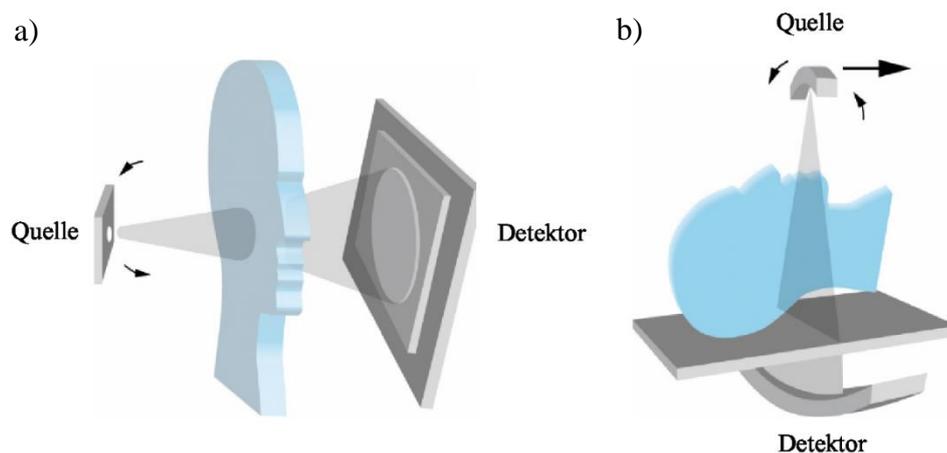


Abbildung 9: Projektionsschema eines DVT-Gerätes a) im Vergleich zu einem Multi-slice-CT b) (nachgezeichnet nach Miracle und Mukherji (2009), Abbildung erstellt von Denise Staudacher)

Das fokussierte Objekt wird, im Gegensatz zu einem konventionellen CT, nicht von einem fächerförmigen, sondern von einem konusförmigen bzw. pyramidenförmigen Strahlenbündel erfasst (Scarfe und Farman 2008) (Abbildung 9). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal liegt in

der Anordnung der bei beiden Geräten verwendeten Detektoren. Während im CT die Detektoren aufgrund ihrer Funktionsweise ausschließlich ringförmig auf dem Detektor Kranz verbaut sind, kommen beim DVT so genannte „Flat-Panel-Detektoren“ zum Einsatz (siehe Abbildung 9). Aus der Vielzahl an aufgezeichneten Einzelprojektionen generiert das DVT-Gerät im Anschluss mittels mathematischer Rekonstruktionsalgorithmen (meist eine Modifikation des approximativen Feldkamp-Algorithmus (Feldkamp et al. 1984)) dreidimensionale Rohdatensätze (Volumendatensätze), die es ermöglichen, das untersuchte Objekt sowohl dreidimensional als auch schichtweise aus nahezu allen Richtungen betrachten zu können.

4.3.2 An der Zahnklinik München verwendete DVT-Geräte

Bei der hier vorliegenden Studie wurden die DVT-Datensätze zum einen mit dem CS 9300[®] der Fa. Carestream Health Deutschland GmbH (Stuttgart) und zum anderen mit dem GALILEOS Compact[®] (Fa. Densply Sirona Intl., Salzburg, Österreich) erstellt.

Das Kodak CS 9300[®] besitzt eine flexible Volumengröße von 5×5 cm bis 17×13,5 cm, wobei das jeweils erfasste Volumen einen Zylinder beschreibt. Die Voxel sind isotropisch, d.h. sie weisen gleiche Kantenlängen in allen drei Achsrichtungen auf. Sie weisen je nach vorgeählter Volumengröße eine Größe zwischen 90 µm bis 500 µm. Die Scan-Zeit beträgt hierbei je nach ausgewähltem Aufnahmemodus ca. 12-28 Sekunden (Carestream 2017).

Das SIRONA GALILEOS Compact[®] bietet ebenfalls eine Auflösung von bis zu 90 µm. Der Detektor hat eine aktive Eingangsfenstergröße von 215 mm Durchmesser, die CCD-Kamera besitzt eine Auflösung von 1000×1000 Pixel. Der Scan-Vorgang an sich benötigt ca. 14 Sekunden, wobei über einen Umlaufwinkel von 204° ca. 200 Einzelaufnahmen erzeugt werden (Sirona 2013).

Sowohl das Kodak CS 9300[®] als auch das SIRONA GALILEOS Compact[®] arbeiten mit einer mittelharten Strahlung, was im Maximum einer Röhrenspannung von weniger als 100 kV entspricht.

4.4 Messmethodik

Die für die Vermessung des PDLs erforderliche Definition der Messebenen, Messpositionen sowie Anzahl der Messpunkte erfolgte in Anlehnung an die Arbeit von Klein (1928) und

Coolidge (1937). Gemäß diesen Studien werden zunächst in einem ersten Schritt drei horizontale Messebenen entlang der Zahn­längsachse etabliert, wobei sich die oberste Messebene am Aveolarrand, die mittlere Messebene auf halber Strecke zwischen Aveolarrand und Wurzelspitze und abschließend die unterste Messebene an der Wurzelspitze befindet.

Anschließend werden auf jeder dieser Messebenen jeweils zwei Messpunkte auf der mesial/distalen sowie zwei Messpunkte auf der oral/vestibulären Zahnachse platziert. Der in der Zahn­längsachse zu bestimmende apikale Messwert errechnet sich jeweils aus dem Abstand von Wurzelspitze zum Boden der Alveole (Coolidge 1937; Klein 1928).

4.4.1 Festlegen der Zahnachse und Positionierung der drei Messebenen

Um die PDL-Dicke entlang der Zahnwurzel möglichst präzise und reproduzierbar erfassen und abbilden zu können, ist es zunächst erforderlich, die Zahnachse in der sagittalen und koronaren Ebene festzulegen bzw. zu justieren. In den Fällen, wo sich jedoch eine Wurzelkrümmung in dem zu messenden Bereich befindet, ist es zwingend erforderlich, die Ausrichtung der Zahn- bzw. Bezugsachse entsprechend der Krümmung anzupassen, um mögliche Parallaxenfehler weitestgehend ausschließen zu können (Abbildung 10). Eine allgemeingültige Definition der anatomischen Achsen zeigt Abbildung 11.

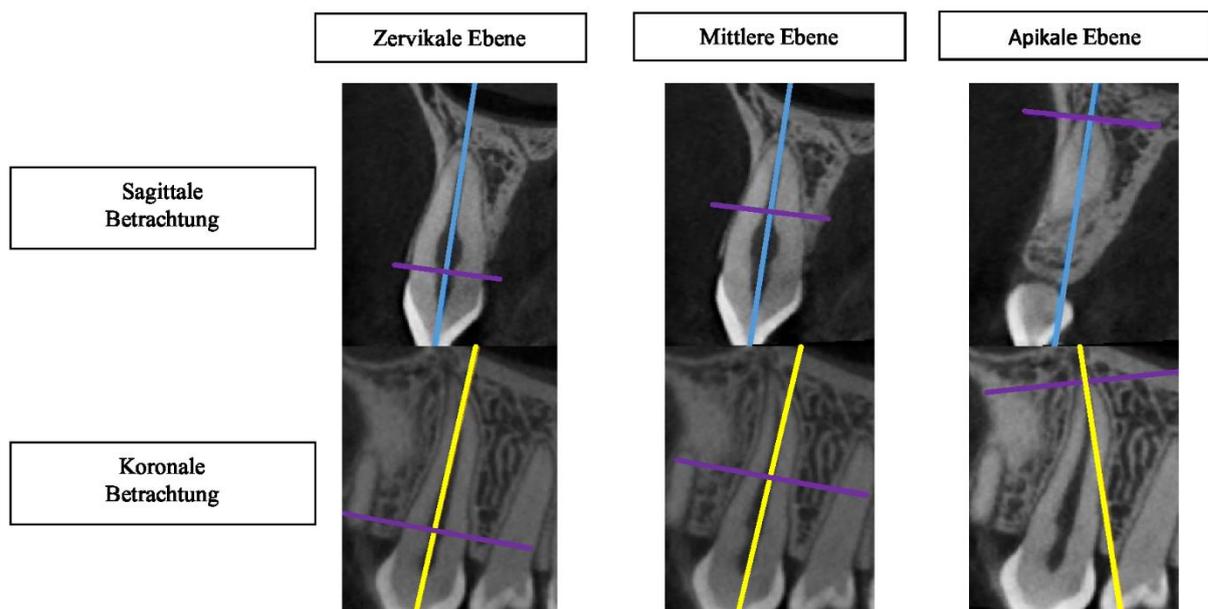


Abbildung 10: Festlegung und Anpassung der Zahn- bzw. Bezugsachse

Die Positionen der drei senkrecht zur Zahnachse ausgerichteten Messebenen wurden wie folgt festgelegt.

Zervikale Messebene: Ebene mit minimaler Distanz zur Schmelz-Zementgrenze, bei der der Zahn zirkulär von Knochen umgeben ist.

Mittlere Messebene: Ebene wird bestimmt durch die „Streckenhalbierende“ der Distanz von zervikaler- zu apikaler Ebene, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Ausrichtung der Zahnachse (das heißt in der Sagittal- und Koronarebene).

Apikale Messebene: Ebene mit minimaler Distanz zum anatomischen Apex, bei der die Zahnwurzel zirkulär von Knochen umgeben ist.

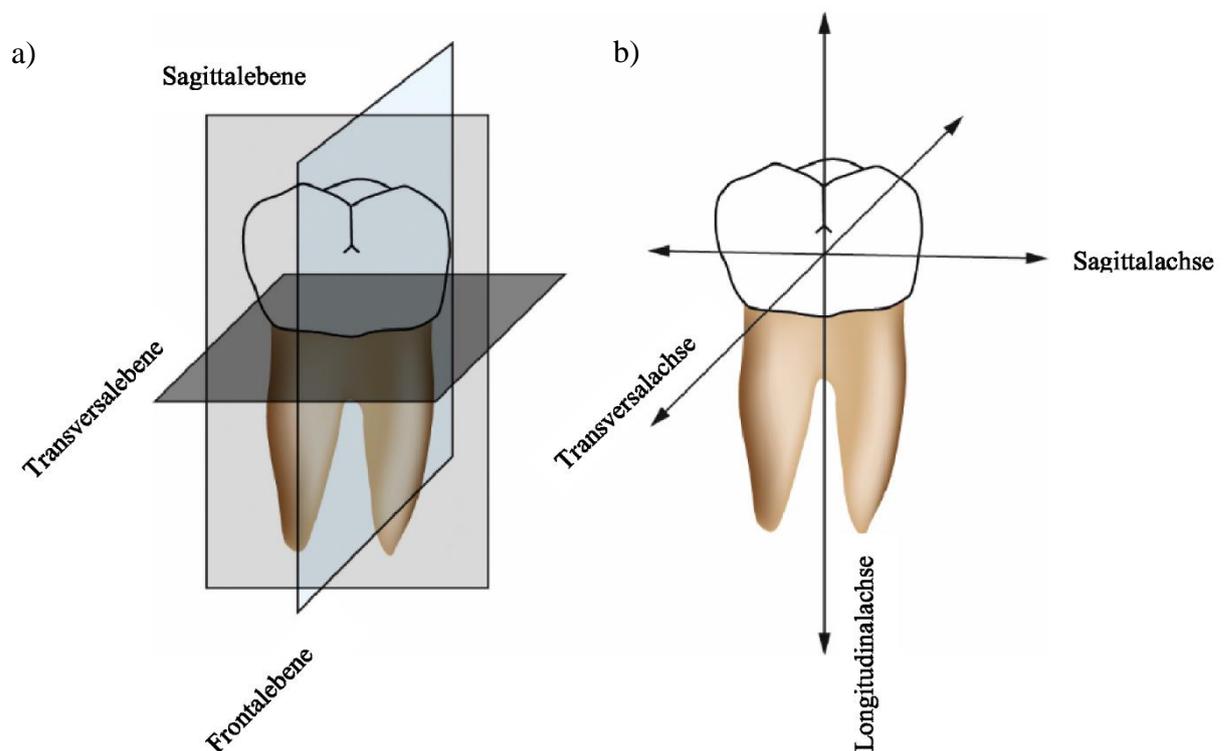


Abbildung 11: Übersicht über die anatomischen Ebenen a) und Achsen b) (Abbildung erstellt von Denise Staudacher)

4.4.2 Festlegen der Anzahl und Positionen der Messpunkte

Um zum einen der tatsächlichen Form des PDLs weitestgehend analytisch gerecht zu werden, zum andern aber auch den hierfür erforderlichen messtechnischen Aufwand in einem überschaubaren und vertretbaren Rahmen zu halten, wurde die Anzahl und die Position der Messpunkte wie folgt festgelegt:

In den drei transversalen Messebenen wurden jeweils vier Messpunkte etabliert, welche in einer 90° zueinander versetzten Position (mesial, distal, oral, vestibulär) am Zahnumfang angeordnet sind (Abbildung 13). Um eine Verfälschung der Messwerte durch das Messen in einem Recessus der Kortikalis zu vermeiden (Abbildung 12), wurde die Messposition bei Vorhandensein eventueller Unregelmäßigkeiten in Anlehnung an die von Coolidge (1937) durchgeführte Studie in ihrer Lage leicht verschoben.

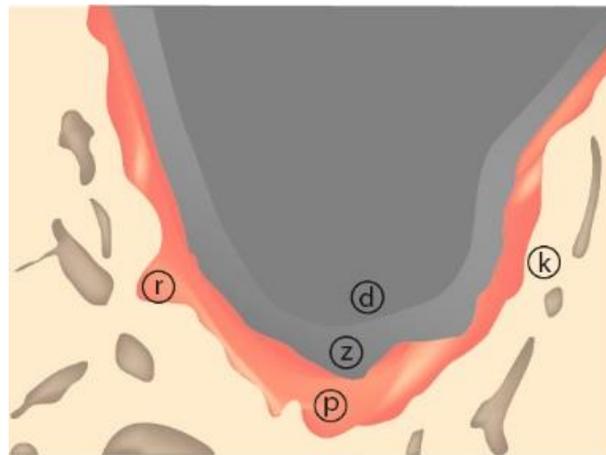


Abbildung 12: Einziehungen an der Kontur (r) des Alveolarknochens (k), Dentin (d); Zement (z); PDL (p) (modifiziert nach Steiniger (2010); Abbildung erstellt von Denise Staudacher)

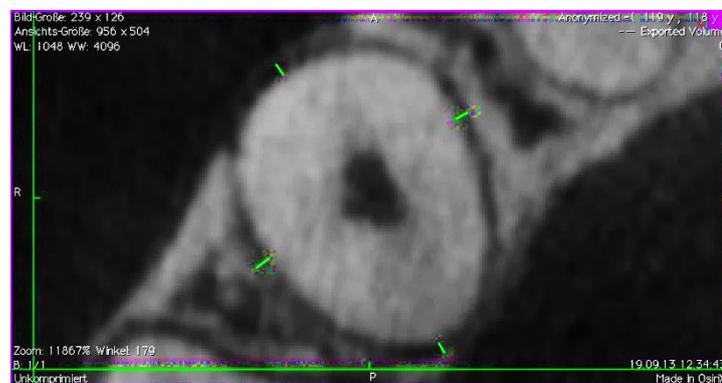


Abbildung 13: Vermessung des PDLs in der koronalen Ebene eines einwurzeligen Zahnes

Neben diesen insgesamt 12 Messpunkten der drei Transversalebene wurden zusätzlich zwei weitere Messpositionen eingeführt, die dazu dienten, die vertikale Situation des PDLs abzubilden. Dies sind zum einen ein apikaler Wert (definiert als der vertikal gemessene Wert, ausgehend vom anatomischen Apex) und zum anderen ein furkaler Wert. Dieser interradikuläre Wert (ermittelt in der Sagittal- und Koronal-Ebene, gemessen in der Sagittal-Ebene) wurde jeweils an der tiefsten Stelle der Furkation abgegriffen.

4.4.3 Durchführung der Messung

Bereits vor Beginn der eigentlichen Messkampagne fand im Rahmen der Einarbeitung ein umfangreiches Trainingsprogramm statt, das unter anderem dazu diente die später zur Anwendung kommenden Messprozeduren und Abläufe zu optimieren. Zu diesem Zweck wurden unter anderem gleiche Zähne von jeweils beiden Teammitgliedern einzeln und getrennt voneinander vermessen, die Messergebnisse im Anschluss einander gegenübergestellt und im Team analysiert. Um auch in besonders schwierigen Fällen, wie z. B. bei Vorliegen von anatomischen Variationen (Wurzelkrümmungen, Zahnrotationen etc.), stets zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen, wurde entschieden, dass generell alle Messungen ohne Ausnahme von denselben zwei Personen in Teamarbeit durchgeführt werden.

4.5 Statistik

Im Wesentlichen setzt sich die statistische Datenanalyse aus zwei großen Bausteinen zusammen: zum einen aus dem Basiselement der „deskriptiven“ Statistik und zum anderen aus dem darauf aufbauenden Element der „schließenden“ (induktiven) Statistik.

Während die deskriptive Statistik in einem ersten Schritt die Daten sowohl in Form von tabellarischen Auflistungen, statistischen Kennwerten (Mittelwert, Median, Standardabweichung etc.) als auch in Form von graphischen Darstellungen beschreibt, besteht die Aufgabe der induktiven Statistik darin, ausgehend von einem bestehenden Datensatz Schlussfolgerungen hinsichtlich der Grundgesamtheit zu ziehen. Im Allgemeinen bedeutet dies, dass mit Hilfe von mathematischen Modellen bzw. mittels des Testens von Hypothesen von einer bereits bestehenden Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen wird.

Die hier vorliegende statistische Datenanalyse wurde entsprechend den o. a. Verfahren mit Hilfe des Statistikprogramms XLSTAT Version 2016.05.35338 (Addinsoft SARL, New York, New York) durchgeführt, wobei schrittweise folgende mathematischen Testverfahren zur Anwendung kamen.

- Überprüfung der zu untersuchenden Stichproben auf Normalverteilung mittels des Anderson-Darling-Tests.
- Untersuchung der Stichproben auf Varianzhomogenität bei Vorliegen einer Normalverteilung mit Hilfe des Levene-Tests.
- Überprüfung der Eigenschaften-, bzw. Vergleichbarkeit der PDL-Ausprägung gleicher als auch artverwandter Zähne entlang der Zahnwurzel mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests um festzustellen, in wie weit die H_0 -Hypothese bestätigt werden kann, wonach statistisch betrachtet die jeweils in der gleichen Ebene gemessenen vier Messwerte (mesial, distal, oral, vestibulär) der gleichen Grundgesamtheit angehören.
- Da in einigen Fällen der Faktor Lebensalter (Zugehörigkeit zur Altersklasse AK1, AK2, AK3) zur Ablehnung der H_0 -Hypothese führte, wurden in diesen Fällen Post-hoc-Tests durchgeführt, um feststellen zu können, welche der betrachteten Stichproben (Altersklassen) für die Zurückweisung der H_0 -Hypothese verantwortlich sind.
- Die Untersuchung hinsichtlich des Einflusses des Geschlechts als auch der Nachweis der sanduhrförmigen Ausprägung des PDL entlang der Wurzellängsachse erfolgte mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests für die Messebenen -Zervikal-, -Mitte- und -Apikal-.

Als Nullhypothese H_0 wurde in allen Fällen die Annahme gewählt, dass die untersuchten Stichproben jeweils der gleichen Grundgesamtheit angehören. Als Signifikanzniveau für den Paarvergleich wurde ein p-Wert $< 0,05$ angesetzt. Im Falle der multiplen Vergleiche wurde die Niveaukorrektur von Bonferroni angewandt.

4.6 Verfahren der Gruppenbildung

Um anhand der gewonnenen Messdaten Rückschlüsse auf die PDL-Breite des jeweiligen Zahntyps, der Zahnpaarung bzw. der Zahngruppe ziehen zu können, wurden die Daten entsprechend den in Kapitel 4.5. beschriebenen statistischen Verfahren und den nachfolgend beschriebenen Kriterien, dargestellt im Flussdiagramm Abbildung 16, schrittweise analysiert. Da die Form

und Größe des PDL primär durch seine Ausdehnung in den vier Achsrichtungen der drei horizontalen Ebenen beschrieben wird, wurde bei der nachfolgend beschriebenen Vorgehensweise als Nullhypothese H_0 stets die Forderung/Annahme gestellt, dass für die jeweils zu untersuchende Zahngruppe die vier axialen Messwerte (mesial, distal, oral, vestibulär) einer Ebene (-Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-) der gleichen Population angehören. Als Testverfahren diene, wie bereits in Kapitel 4.5 erwähnt, der Kruskal-Wallis Test.

1. Individuelle Betrachtung der vermessenen Zähne

Untersuchung jeder einzelnen Messposition einer Messebene (mesial, distal, oral, vestibulär) hinsichtlich der Erfüllung der statistischen Voraussetzungen.

2. Zusammenfassen der Zähne des gleichen Zahntyps

Statistische Auswertung der Daten in Bezug auf Realisierbarkeit einer Zusammenführung von Zähnen gleichen Zahntyps.

3. Bildung von Ebenenmittelwerten

Überprüfung hinsichtlich der Möglichkeit, die an den 4 Positionen der gleichen Wurzelebene gemessenen PDL-Breiten zu einem gemeinsamen Mittelwert der PDL-Breiten (weiterführend als PDL-Mittelwert bezeichnet) zusammenfassen zu können (Radialsymmetrie bezüglich eines in einem fiktiven Punkt gedachten Zahnes).

4. Zusammenfassen der Quadranten

Untersuchung, inwieweit basierend auf den gewonnenen Messdaten die Annahme bestätigt werden kann, dass anatomisch gleiche Zähne, d. h. Zähne sich gegenüberliegender Quadranten des ersten und zweiten, bzw. des dritten und vierten Quadranten, zu einer gemeinsamen Zahnpaarung zusammengefasst werden können (Abbildung 16).

5. Zusammenlegen von Zähnen gleicher anatomischer Zahnnotation zu Zahngruppen

Überprüfung dahingehend, inwieweit die Möglichkeit besteht, auch Zähne gleicher anatomischer Zahnnotation (Abbildung 14) wie z. B. der Molaren, Prämolaren, Canini und Inzisivi zu entsprechenden Zahngruppen zusammenfassen zu können.

Eine Besonderheit bilden hierbei die Inzisivi des OK und UK. Bei diesen Zähnen besteht lediglich die Möglichkeit, die Zähne [11] und [21] bzw. die Zähne [12] und [22] zu jeweils einer Zahnpaarung zusammenzufassen. Die Bildung einer übergeordneten, d. h. gemeinsamen Zahngruppe, bestehend aus den vier Frontzähnen, ist aufgrund der anatomischen Diskrepanzen bezüglich Zahnlänge, Durchmesser sowie des Kronen-Wurzel-Verhältnisses nicht möglich. Im Unterkiefer hingegen sind diese anatomischen Merkmale nahezu identisch, weshalb hier die Möglichkeit einer Zusammenfassung der vier Frontzähne zu einer gemeinsamen Zahngruppe durchaus gegeben ist.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass bei den mehrwurzeligen Zähnen, analog zu den bereits beschriebenen Verfahren, nachgewiesen werden konnte, dass die an den verschiedenen Wurzeln in gleicher Wurzelebene gemessenen PDL-Zahlenwerte zu einem sogenannten „Gesamtebenenwert/PDL-Mittelwert“ zusammengefasst werden können (Abbildung 15). Da hierfür der erforderliche statistische Nachweis erbracht werden konnte, war es möglich, die grafische Aufbereitung anhand von Sanduhr- und Polardiagrammen deutlich übersichtlicher zu gestalten.

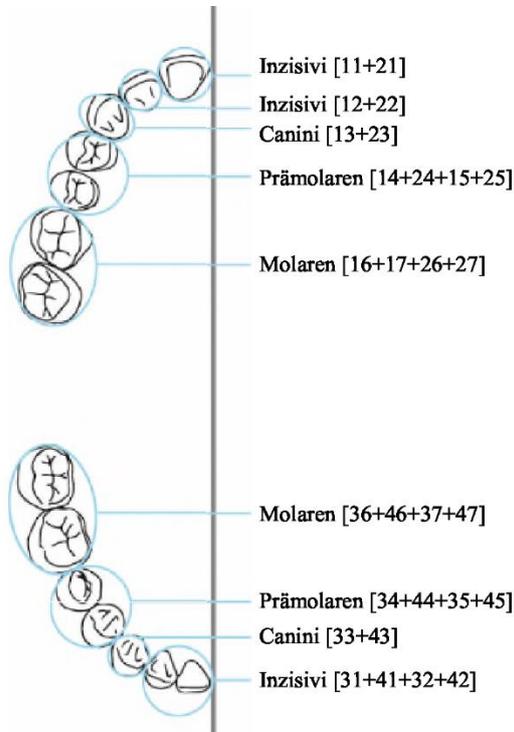


Abbildung 14: Schematische Darstellung der gebildeten Zahngruppen (Nachgezeichnet nach „human dental arches - upper and lower“ von Kaligula, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Human_dental_arches.svg. Lizenziert unter einer Creative Commons Lizenz: CC-BY-SA-3.0, Abbildung erstellt von Denise Staudacher)

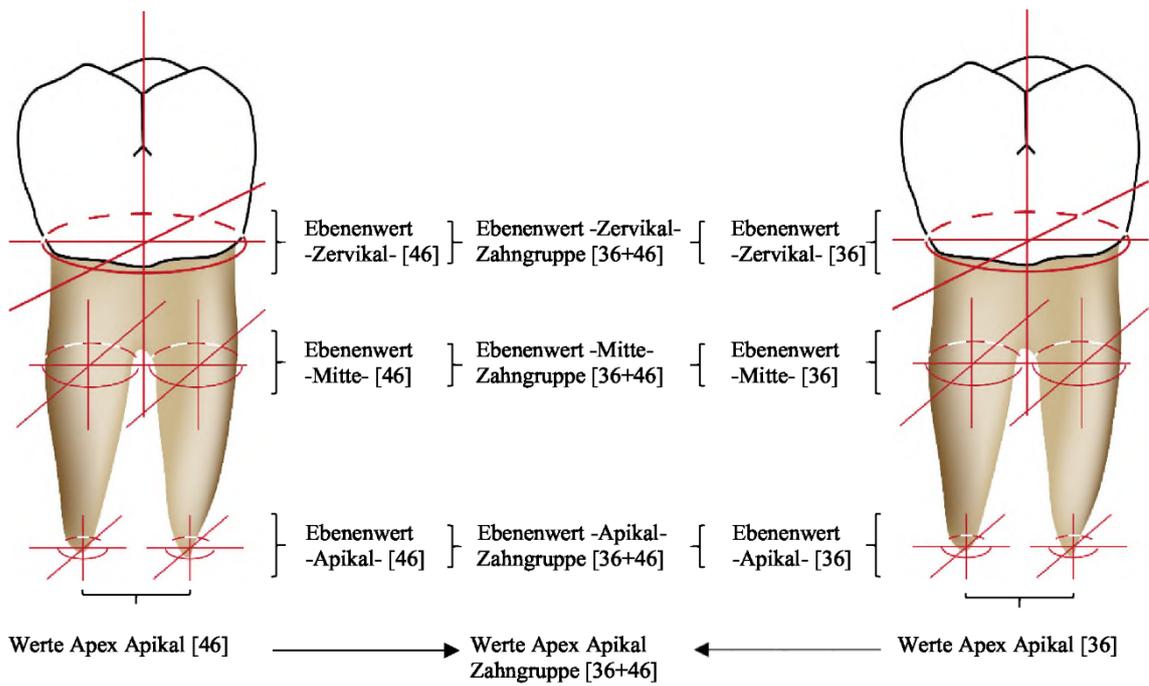


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Ebenenwertbildung/Zahngruppenbildung (Abbildung erstellt von Denise Staudacher)

1. Individuelle Betrachtung der vermessenen Zähne

Zahn 17	Anzahl 1...4	Messebenen 3	Messpositionen 32	Zahn 15	Anzahl 1...8	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 13	Anzahl 1...19	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 11	Anzahl 1...11	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 21	Anzahl 1...10	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 23	Anzahl 1...18	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 25	Anzahl 1...4	Messebenen 3	Messpositionen 23	Zahn 27	Anzahl 1...6	Messebenen 3	Messpositionen 32	OK
Zahn 47	Anzahl 1...1	Messebenen 3	Messpositionen 23	Zahn 45	Anzahl 1...4	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 43	Anzahl 1...10	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 41	Anzahl 1...4	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 31	Anzahl 1...4	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 33	Anzahl 1...10	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 35	Anzahl 1...6	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 37	Anzahl 1...4	Messebenen 3	Messpositionen 23	UK

2. Zusammenfassen der Zähne des gleichen Zahntyps

Zahn 17	Anzahl 4	Messebenen 3	Messpositionen 32	Zahn 14	Anzahl 10	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 11	Anzahl 11	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 21	Anzahl 10	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 24	Anzahl 14	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 27	Anzahl 6	Messebenen 3	Messpositionen 32	OK
Zahn 47	Anzahl 1	Messebenen 3	Messpositionen 23	Zahn 44	Anzahl 6	Messebenen 3	Messpositionen 23	Zahn 41	Anzahl 4	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 31	Anzahl 4	Messebenen 3	Messpositionen 13	Zahn 34	Anzahl 9	Messebenen 3	Messpositionen 23	Zahn 37	Anzahl 4	Messebenen 3	Messpositionen 23	UK

3. Bildung von Ebenenwerten

(Zusammenfassen der 4 Axial-PDL Werte einer jeden Ebene zu einem Ebenenreferenzwert)

Zahn 17	Messebenen 3	Zahn 11	Messebenen 3	Zahn 21	Messebenen 3	Zahn 27	Messebenen 3	OK
Zahn 47	Messebenen 3	Zahn 41	Messebenen 3	Zahn 31	Messebenen 3	Zahn 37	Messebenen 3	UK

4. Zusammenlegung der Quadranten

Zahn 17+27	Messebenen 3	Zahn 16+26	Messebenen 3	Zahn 15+25	Messebenen 3	Zahn 14+24	Messebenen 3	Zahn 13+23	Messebenen 3	Zahn 12+22	Messebenen 3	Zahn 11+21	Messebenen 3	OK
Zahn 37+47	Messebenen 3	Zahn 36+46	Messebenen 3	Zahn 35+45	Messebenen 3	Zahn 34+44	Messebenen 3	Zahn 33+43	Messebenen 3	Zahn 32+42	Messebenen 3	Zahn 31+41	Messebenen 3	UK

5. Zusammenlegung von Zähnen gleicher anatomischer Zahnnummernklatur zu Zahngruppen

Zahn 16+26+17+27	Messebenen 3	Zahn 14+24+15+25	Messebenen 3	Zahn 13+23	Messebenen 3	Zahn 12+22	Messebenen 3	Zahn 11+21	Messebenen 3	OK
Zahn 36+46+37+47	Messebenen 3	Zahn 34+44+35+45	Messebenen 3	Zahn 33+43	Messebenen 3	Zahn 31+41+32+42	Messebenen 3	UK		

Abbildung 16: Schematische Darstellung des schrittweisen Zusammenführens der Messdaten zu Zahngruppen

4.7 Beschreibung der grafischen Präsentation der Messergebnisse

Die graphische Präsentation der PDL-Messdaten/-Berechnungen erfolgt zum einen in Form von vertikalen Schnittdiagrammen entlang der Achsen mesial-distal, bzw. oral-vestibulär (X-Y-Diagrammen/Sanduhrdiagrammen, Abbildung 17) und zum anderen in Form von horizontalen Schnittdiagrammen (Polardiagrammen, Abbildung 18) für die Ebenen „Zervikal“, „Mitte“ und „Apikal“.

Sanduhrdiagramm:

Was die vertikalen Sanduhrdiagramme betrifft, so ist anzumerken, dass aufgrund des großen Skalierungsunterschiedes (PDL-Breite [μm]/Zahnlänge [cm]) lediglich die gemessenen PDL-Breiten in ihrer horizontalen Ausdehnung für die jeweiligen Messebenen maßstäblich auf der X-Achse aufgetragen sind, nicht aber die vertikalen Abstände der einzelnen Messebenen (-Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-) zueinander. Aus diesem Grunde befindet sich keine Skalierung auf dem positiven Ast der Y-Achse.

Die auf dem negativen Ast der Y-Achse angebrachte Skalierung des Diagramms bezieht sich ausschließlich auf die Messwerte Apex-Apikal. Den betrachteten Zahn selbst muss man sich hierbei konzentriert als vertikale Linie auf der Y-Achse vorstellen.

Die Kurvenform (Sanduhrform) der in den Diagrammen eingetragenen Mittelwertkurven bzw. Hüllkurven entsteht durch die Anwendung der von Excel zur Verfügung gestellten „Splinefunktion/-interpolation“, wobei die jeweils aktuell gemessenen Messpunkte als Stützwerte dienen.

Die blau bzw. grün eingefärbten Kurven zeigen jeweils die Hüllkurven um die rot eingefärbte, strichpunktierte Mittelwertkurve, die bei allen Abbildungen auf $\pm 15\%$ des arithmetischen Mittelwertes festgelegt wurden.

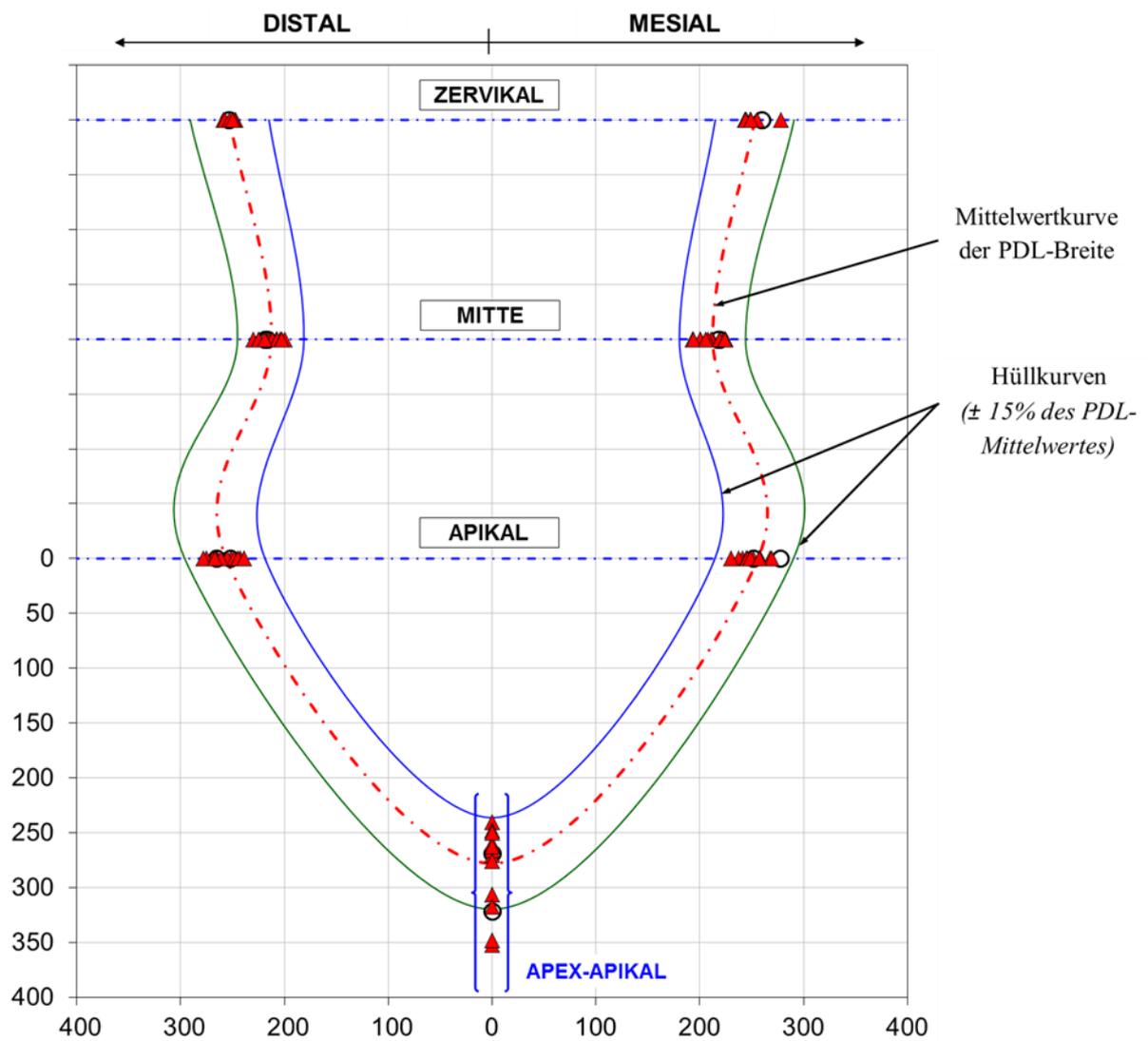


Abbildung 17: Sanduhrdiagramm (Hüllkurven begrenzen ein Streuband von $\pm 15\%$ des jeweiligen Ebenenmittelwertes)

Polardiagramm:

Das Polardiagramm zeigt die in den vier Hauptachsrichtungen gemessenen PDL-Breiten der jeweils angegebenen horizontalen Messebene, wobei der rot eingefärbte, strichpunktierte Kreis bzw. Ellipse die berechneten arithmetischen Mittelwerte der vier Achsmesspunkte miteinander verbindet. Die blau, bzw. grün eingefärbten, gepunkteten Kreise/Ellipsen zeigen die durch den Betrachter in ihrer Größe frei wählbaren Hüllkurven (Maß für die Streubreite um den arithmetischen Mittelpunkt/-linie), welche jeweils die vier arithmetischen Achsmittelwertmesspunkte in dem vom Betrachter gewählten Abstand miteinander verbinden. Sie wurden bei allen Abbildungen auf $\pm 15\%$ des arithmetischen Mittelwertes festgelegt.

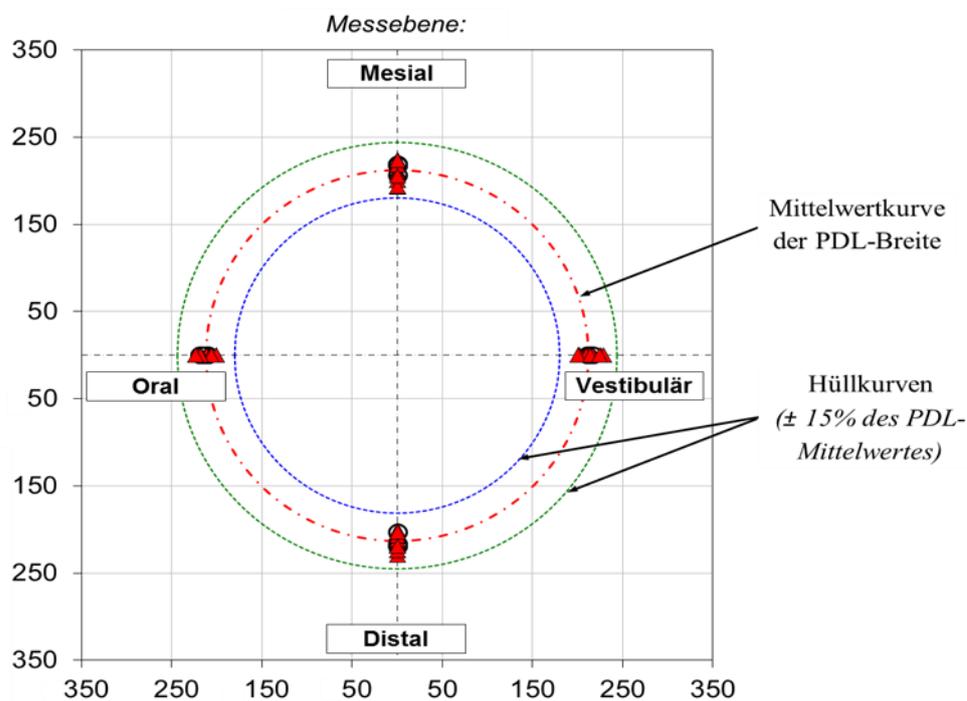


Abbildung 18: Polardiagramm (die angegebenen Hüllkurven begrenzen ein Streuband, welches die vier arithmetischen Achsmittelwertmesspunkte im Abstand von $+15\%$, bzw. -15% miteinander verbindet)

5 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die ermittelten Messergebnisse präsentiert. Hierbei werden zunächst die zuvor festgelegten Zahngruppen hinsichtlich der Themenschwerpunkte Radialsymmetrie, mittlere PDL-Breite, sowie Ausprägung der PDL-Breite entlang der Zahnlängsachse analysiert. Im Anschluss werden die Messergebnisse in Abhängigkeit des Alters, Vergleich OK zu UK, des Geschlechtes und der Zahn-Gruppen betrachtet.

5.1 Inzisivi

Die Gruppe der Inzisivi umfasst im Oberkiefer zwei Untergruppen, welche sich aus den Zähnen [11] und [21] bzw. [12] und [22] zusammensetzt. Im Gegensatz dazu können die vier Inzisivi im Unterkiefer aufgrund ihrer anatomischen Ähnlichkeit zu einer Gruppierung zusammengefasst werden [31+41+32+42].

Zahngruppe [11+21]

Aus dem Bereich der Zahngruppe Inzisivi [11+21] wurden im Verlauf von 252 Messungen insgesamt 21 Zähne vermessen, wobei sich die Gruppe der untersuchten Zähne aus 11 Zähnen des Zahntyps [11] und 10 Zähnen des Zahntyps [21] zusammensetzte. Eine detaillierte Aufschlüsselung der durchgeführten Messungen und der errechneten PDL-Mittelwerte hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der jeweils gewählten Messposition, Messebene, Probandengruppe und Altersklasse zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [11+21] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, und -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [11+21]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	5	17	256	7	17	222	6	20	268	17	5	331	41
	AK2	1	4	250	5	4	220	12	4	263	24	1	247	
	AK3	4	13	258	11	16	218	13	11	269	17	3	287	15
	Gesamt	10	34	256	9	37	220	10	35	268	17	9	307	43
Frauen	AK1	6	24	261	14	23	231	14	23	276	27	6	349	77
	AK2	3	12	252	10	12	213	9	9	256	30	3	266	46
	AK3	2	7	255	3	8	222	9	8	264	7	2	334	32
	Gesamt	11	43	258	12	43	224	14	40	269	26	11	323	70
Gesamt	AK1	11	41	259	12	40	227	12	43	272	23	11	340	61
	AK2	4	16	252	9	16	215	10	13	258	27	4	261	39
	AK3	6	20	257	9	24	219	12	19	267	14	5	306	33
	Gesamt	21	77	257	11	80	222	12	75	268	22	20	316	59

Aufgrund der durchgeführten Messungen konnte u. a. statistisch der Nachweis erbracht werden, dass die beiden Zähne zu einer gemeinsamen Zahnpaarung [11+21] zusammengefasst werden können (Tabelle 3).

Tabelle 3: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [11], [21] und Zahnpaarung [11+21] (N, Anzahl Messungen)

Zahnebene	ZAHN [11]		ZAHN [21]		ZAHN [11+21]	
	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a
-Zervikal-	42	0,8971	35	0,4008	77	0,8303
-Mitte-	42	0,5213	38	0,2424	80	0,3264
-Apikal-	36	0,2727	39	0,1742	75	0,2290

a = Kruskal-Wallis Test

Bei Vernachlässigung der Faktoren Lebensalter und Geschlechtszugehörigkeit der Probanden zeigt sich bei allen untersuchten Zähnen deutlich eine statistisch signifikante, sanduhrförmige Ausprägung des PDLs entlang der Zahnwurzel (Tabelle 4, Abbildung 19).

Tabelle 4: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [11+21] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [μm]	
ZAHN [11+21] Zervikal-Mitte	77 / 80	257 / 222	< 0,0001
ZAHN [11+21] Mitte-Apikal	80 / 75	222 / 268	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Der für die Formgebung des PDLs verantwortliche Bereich liegt hier in der Nähe des Widerstandszentrums des Zahnes (ca. 42 % der Wurzellänge in Richtung Apex) in welchem sich auch die Messebene -Mitte- befindet (Pope et al. 2002). Der für diese Messebene berechnete arithmetische Mittelwert des PDLs liegt mit 222 μm deutlich (ca. 35-46 μm) unterhalb des für die Zervikal-Ebene (257 μm) bzw. Apikal-Ebene (268 μm) ermittelten Wertes. Anhand der Polarogramme ist deutlich zu erkennen, dass sich die Mittelwerte der PDL-Breite in den vier anatomischen Achsrichtungen nahezu radialsymmetrisch verhalten (Abbildung 19). Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten der Zahnpaarung [11+21] sind hierbei in allen horizontalen Messebenen statistisch nicht signifikant ($75 < N < 80$; $0,229 < \text{Signifikanz}^a < 0,8303$) (Tabelle 3, Zahnpaarung ZAHN [11+21]).

Was die Streuung der Messpunkte insbesondere in den drei horizontalen Messebenen angeht, so ist festzustellen, dass sich in mehr als 95 % aller Fälle die Messwerte innerhalb eines Streubandes von ± 15 % des jeweiligen arithmetischen Ebenenmittelwertes befinden. Im Gegensatz hierzu ist bei den Messwerten der vertikalen Messebene eine deutlich höhere Streuung anzutreffen. Lediglich 60 % aller gemessenen Werte liegen hier in einem Streubereich von ± 15 %. Um zu erreichen, dass auch in der vertikalen Messebene 95 % aller Messwerte innerhalb eines gemeinsamen Fensters zu liegen kommen, müsste die Größe des Streubandes auf ca. ± 35 % des arithmetischen Mittelwertes erweitert werden.

Während ein direkter Zusammenhang, oder eine Abhängigkeit der mittleren Breite des PDLs von den Parametern Zahntyp, und Geschlecht der untersuchten Probanden nicht festgestellt werden kann (Tabelle 5), zeigt sich hinsichtlich des Lebensalters bei den weiblichen Probanden ein signifikanter, nichtlinearer Einfluss des Lebensalters auf die PDL-Breite der Zahnebenen -Mitte- und -Apikal- (Tabelle 6).

Tabelle 5: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [11+21] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [11+21] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	43	258	34	256	0,8334
-Mitte-	43	224	37	220	0,2240
-Apikal-	40	269	35	268	0,7180

a = Mann-Whitney-U-Test

Tabelle 6: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [11+21] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [11+21] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	24	261	12	252	7	255	0,0752	0,4346	0,5324
-Mitte-	23	231	12	213	8	222	< 0,0001	0,0790	0,0621
-Apikal-	23	276	9	256	8	264	0,0027	0,0892	0,3199

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Bei den männlichen Patienten kann im Vergleich hierzu dieses Verhalten nicht beobachtet werden (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [11+21] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [11+21] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	17	256	4	250	13	258	0,1155	0,0800	0,7166
-Mitte-	17	222	4	220	16	218	0,7301	0,5799	0,1557
-Apikal-	20	268	4	263	11	269	0,2902	0,2971	0,9371

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

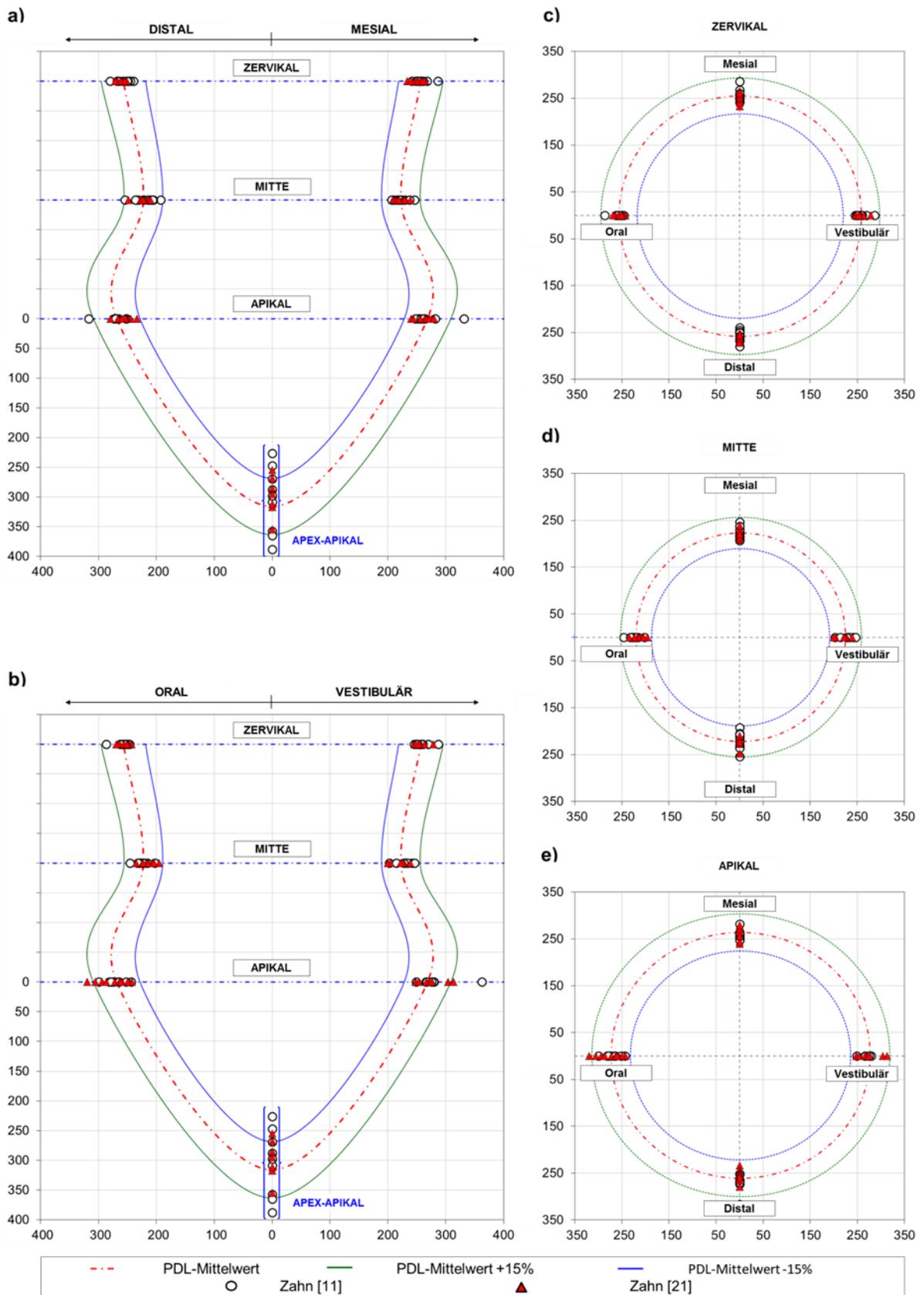


Abbildung 19: Breite des PDLs (in µm) der Zähne [11+21], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

Zahngruppe [12+22]

Für die Untersuchung der Zahnpaarung Inzisivi [12+22] wurden insgesamt 347 Messungen an 30 Zähnen durchgeführt, wobei sich die Gruppe der untersuchten Zähne aus 16 Zähnen des Zahns [12], sowie 14 Zähnen des Zahns [22] zusammensetzte. Eine tabellarische Zusammenfassung der durchgeführten Messungen wie auch eine Präsentation der berechneten PDL-Mittelwerte in Abhängigkeit von der jeweils zugehörigen Messposition, Messebene, Probandengruppe und Altersklasse findet sich in Tabelle 8.

Tabelle 8: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen (SD) an den Zähnen [12+22] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [μm] der Zahnpaarung [12+22]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	7	28	250	12	22	214	11	24	268	10	5	301	54
	AK2	3	11	244	15	10	214	20	12	248	13	3	265	18
	AK3	3	10	252	8	8	222	5	8	269	25	2	333	74
	Gesamt	13	49	249	12	40	216	13	44	263	17	10	297	51
Frauen	AK1	11	41	252	16	39	217	18	42	267	21	11	341	71
	AK2	4	15	246	6	12	214	13	15	262	16	4	306	25
	AK3	2	7	243	10	8	217	14	8	257	18	2	294	85
	Gesamt	17	63	250	14	59	216	16	65	264	19	17	327	64
Gesamt	AK1	18	69	251	15	61	216	16	66	267	18	16	329	67
	AK2	7	26	245	11	22	214	16	27	256	16	7	289	30
	AK3	5	17	248	10	16	220	10	16	263	22	4	314	69
	Gesamt	30	112	250	13	99	216	15	109	264	18	27	316	61

Aufgrund der geringen Abweichungen zwischen den korrespondierenden Werten kann statistisch der Nachweis erbracht werden, dass beide Zähne im Rahmen der weiteren Betrachtungen zusammengefasst werden können (Tabelle 9).

Tabelle 9: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [12], [22] und Zahnpaarung [12+22] (N, Anzahl Messungen)

Zahnebene	ZAHN [12]		ZAHN [22]		ZAHN [12+22]	
	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a
-Zervikal-	61	0,5401	51	0,7242	112	0,6509
-Mitte-	54	0,2610	45	0,2527	99	0,8528
-Apikal-	58	0,4495	51	0,9359	109	0,8816

a = Kruskal-Wallis Test

Hinsichtlich der Ausprägung der PDL-Breite entlang der Zahnwurzel zeigt sich auch bei der Inzisivi-Zahnpaarung [12+22] eine signifikante Einschnürung des PDLs im Bereich des Widerstandszentrums des Zahnes und der damit verbundenen sanduhrförmigen Charakteristik des PDLs (Tabelle 10, Abbildung 20).

Tabelle 10: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [12+22] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [12+22] Zervikal-Mitte	112 / 99	250 / 216	< 0,0001
ZAHN [12+22] Mitte-Apikal	99 / 109	216 / 264	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Der in der Messebene -Mitte- gemessene Wert für die Spaltbreite liegt mit durchschnittlich ca. 216 µm deutlich (ca. 34-48 µm) unterhalb des in der Zervikal-Ebene (250 µm) bzw. in der Apikal-Ebene (264 µm) gemessenen Spaltwertes. Bei Betrachtung der Polardiagramme lässt sich ebenfalls in allen drei horizontalen Messebenen ein auf den Koordinatenursprung bezogenes, radialsymmetrisches Verhalten der PDL-Mittelwerte erkennen (Abbildung 20). Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten waren in allen drei horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [12+22] statistisch nicht signifikant ($99 < N < 112$; $0,6509 < \text{Signifikanz}^a < 0,8816$) (Tabelle 9, Zahnpaarung ZAHN [12+22]).

Bezüglich der Streuung des gemessenen PDLs ist festzustellen, dass sich auch bei den Inzisivi [12+22] ca. 95 % des in den horizontalen Ebenen gemessenen PDLs innerhalb einer Bandbreite von ± 15 % bewegen. Bei einer weiteren Reduzierung der Streubreite auf ca. ± 10 % würden immerhin noch 90 % aller Messpunkte in diesem Fenster anzutreffen sein. Im Vergleich hierzu ist bei den in der vertikalen Messebene gemessenen Werten des Apex-Apikal erneut eine

deutlich erhöhte Streuung des gemessenen PDLs zu beobachten. Lediglich 59 % der gemessenen Werte liegen hier in einem Streuband von ± 15 %. Für das Erreichen einer 95 %-igen Abdeckung aller Messwerte würde sich jedoch die Bandbreite im Gegenzug deutlich auf ca. ± 42 % erhöhen. Während bei den weiblichen Patienten im gesamten gemessenen Bereich keine statistisch signifikanten Veränderungen der PDL-Breite in Abhängigkeit des Lebensalters zu beobachten sind (Tabelle 11), zeigt sich bei den männlichen Patienten in der apikalen Messebene ein statistisch signifikantes, nichtlineares Verhalten der mittleren PDL-Breite in Abhängigkeit des Lebensalters (Tabelle 12).

Tabelle 11: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [12+22] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [12+22] Zahnebene	PDL-Breite [μm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	41	252	15	246	7	243	0,0291	0,9495	0,0905
-Mitte-	39	217	12	214	8	217	0,5029	0,6575	0,9608
-Apikal-	42	267	15	262	8	257	0,4139	0,5861	0,2114

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Tabelle 12: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [12+22] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [12+22] Zahnebene	PDL-Breite [μm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	28	250	11	244	10	252	0,3315	0,3872	0,9307
-Mitte-	22	214	10	214	8	222	0,7585	0,3457	0,1748
-Apikal-	24	268	12	248	8	269	< 0,0001	0,0081	0,3004

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Ein statistisch signifikanter Einfluss des Geschlechts auf die Größe und Form des Parodontalspaltes kann hingegen in beiden Patientengruppen nicht festgestellt werden (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Einfluss (Signifikanz) des Geschlechts auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [12+22] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [12+22] Zahnebene	PDL-Breite [μm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	63	250	49	249	0,5288
-Mitte-	59	216	40	216	0,8291
-Apikal-	65	264	44	263	0,7567

a = Mann-Whitney-U-Test

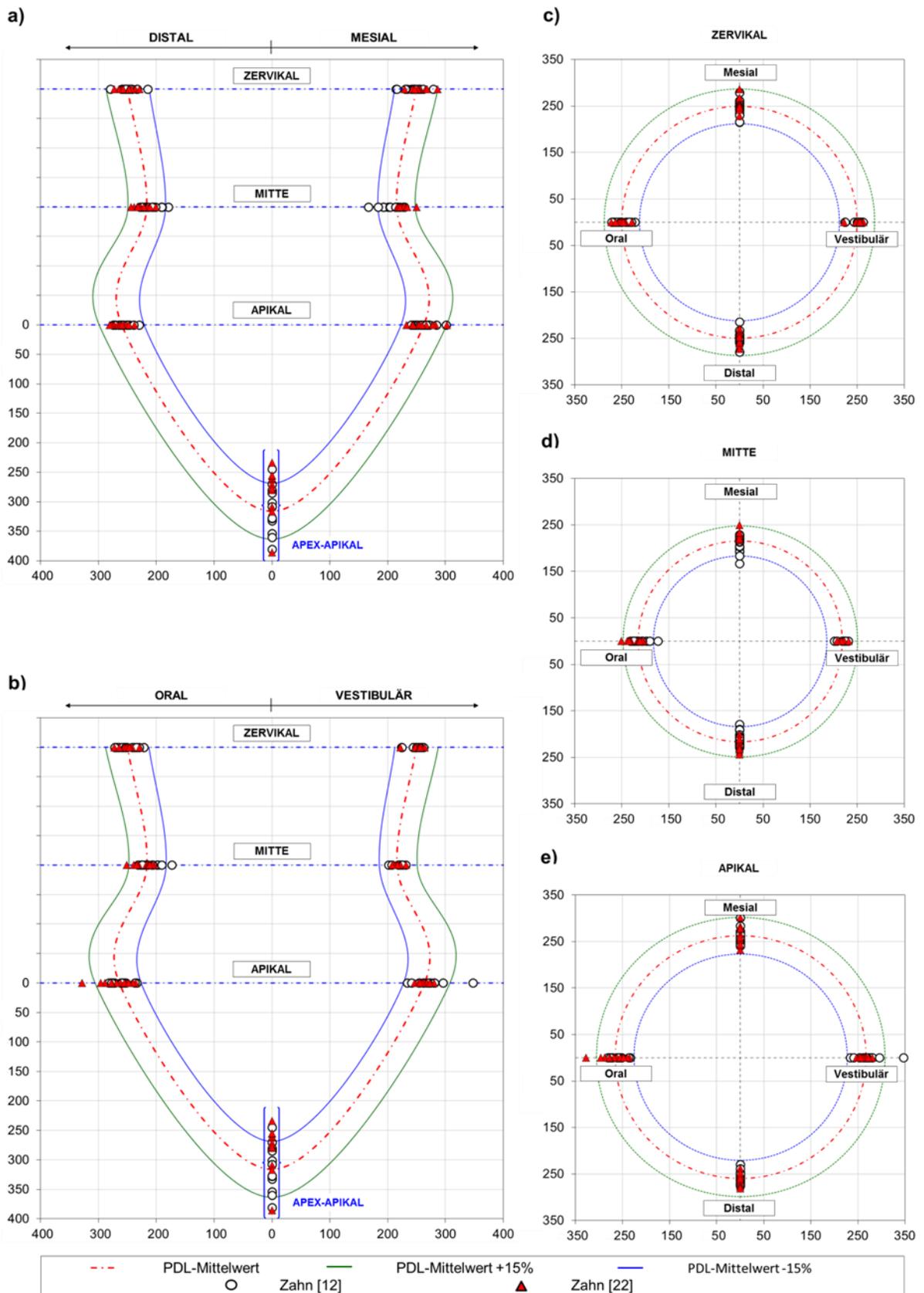


Abbildung 20: Breite des PDLs (in μm) der Zähne [12+22], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

Zahngruppe [31+41]

Was die Zahnpaarung der Inzisivi [31+41] angeht, so standen für die Untersuchung des PDLs jeweils vier DVT-Aufnahmen des Zahntyps [31] und [41] zur Verfügung. Insgesamt umfasste die Messkampagne 85 Messungen. Eine detaillierte Aufbereitung der Messergebnisse wie auch eine Präsentation der berechneten PDL-Mittelwerte in Abhängigkeit der jeweils zugehörigen Messposition, Messebene, Probandengruppe und Altersklasse sind in Tabelle 14 zu finden.

Tabelle 14: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [31+41] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [μm] der Zahnpaarung [31+41]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1													
	AK2	2	6	244	2	6	215	8	7	262	11	2	310	19
	AK3	2	6	238	7	5	206	5	8	246	15	2	282	13
	Gesamt	4	12	241	6	11	211	8	15	253	15	4	296	21
Frauen	AK1	1	2	249	0	4	207	3	4	259	5	1	265	
	AK2	1	2	249	0	4	207	3	4	259	5	1	265	
	AK3	3	10	222	14	8	187	9	12	254	32	2	274	25
	Gesamt	4	12	226	16	12	194	12	16	255	27	3	271	18
Gesamt	AK1	1	2	249	0	4	207	3	4	259	5	1	265	
	AK2	3	8	245	3	10	212	8	11	261	9	3	295	29
	AK3	5	16	228	14	13	194	12	20	251	26	4	278	17
	Gesamt	8	24	234	14	23	202	14	31	254	22	7	285	23

Basierend auf den durchgeführten Messungen konnte u. a. statistisch der Nachweis dafür erbracht werden, dass die beiden Zähne zu einer gemeinsamen Zahnpaarung [31+41] zusammengeführt werden können (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [31], [41] und Zahnpaarung [31+41] (N, Anzahl Messungen)

Zahnebene	ZAHN [31]		ZAHN [41]		ZAHN [31+41]	
	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a
-Zervikal-	13	0,8565	11	0,9045	24	0,9539
-Mitte-	9	0,4773	14	0,7378	23	0,6439
-Apikal-	16	0,5008	15	0,0597	31	0,1241

a = Kruskal-Wallis Test

Wie bereits bei den Messungen des zugehörigen Antagonisten im Oberkiefer zu beobachten ist, zeigt sich auch bei der Zahnpaarung [31+41] des Unterkiefers eine signifikante, sanduhrförmige Ausprägung des PDLs entlang der Wurzel (Tabelle 16, Abbildung 21).

Tabelle 16: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [31+41] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [31+41] Zervikal -Mitte	24 / 23	234 / 202	< 0,0001
ZAHN [31+41] Mitte-Apikal	23 / 31	202 / 254	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Der an der Einschnürung gemessene Wert des PDLs liegt mit einem errechneten Mittelwert von ca. 202 µm ebenfalls deutlich (32 µm, bzw. 52 µm) unterhalb den Werten der Zervikal-Ebene (234 µm), bzw. Apikal-Ebene (254 µm). Wie aus den Polardiagrammen (siehe Abbildung 21) deutlich zu ersehen ist, liegen auch bei der Zahnpaarung [31+41] die PDL-Mittelwerte der jeweiligen Messebene in nahezu gleichem Kreisabstand zum gemeinsamen Koordinatenursprung (Radialsymmetrie). Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten waren in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [31+41] statistisch nicht signifikant ($23 < N < 31$; $0,1241 < \text{Signifikanz}^a < 0,9539$) (Tabelle 15, Zahnpaarung ZAHN [31+41]).

Was die Streuung der Messwerte in den jeweiligen Messebenen angeht, so liegt diese sowohl bei der vertikalen, als auch bei den horizontalen Messebenen bei einer Bandbreite von ca. ±13-14 % und einer Häufigkeit der Messwerte von ca. 96 %. Was den Einfluss des Lebensalters auf die Größe des PDLs angeht, so kann bei den weiblichen Probanden in den Messebenen -

Zervikal- und -Mitte- eine statistisch signifikante Verringerung des PDL-Mittelwertes mit zunehmendem Lebensalter festgestellt werden (Tabelle 17). Im Mittel liegen hier die Messwerte der Altersklasse (AK1) um ca. 10 % über den Werten der Altersklasse (AK3).

Tabelle 17: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [31+41] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [31+41] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	2	249	2	249	10	222	1,0000	0,0068	0,0068
-Mitte-	4	207	4	207	8	187	1,0000	0,0001	0,0001
-Apikal-	4	259	4	259	12	254	1,0000	0,0795	0,0795

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Bei den männlichen Patienten ist der Einfluss des Lebensalters statistisch betrachtet lediglich in der Ebene -Apikal- signifikant ausgeprägt (Tabelle 18).

Tabelle 18: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [31+41] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [31+41] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	0	-	6	244	6	238	-	0,1535	-
-Mitte-	0	-	6	215	5	206	-	0,0805	-
-Apikal-	0	-	7	262	8	246	-	0,0489	-

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,05)

Ein statistisch signifikanter Einfluss des Geschlechts auf die Größe des PDLs kann in den Ebenen -Zervikal- und -Mitte- festgestellt werden. Hier liegen die PDL-Mittelwerte der weiblichen Probanden mit einem Wert von ca. 16 µm annähernd 8 % unterhalb der Werte der männlichen Probanden (Tabelle 19).

Tabelle 19: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [31+41] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [31+41] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	12	226	12	241	0,0324
-Mitte-	12	194	11	211	0,0011
-Apikal-	16	255	15	253	0,7219

a = Mann-Whitney-U-Test

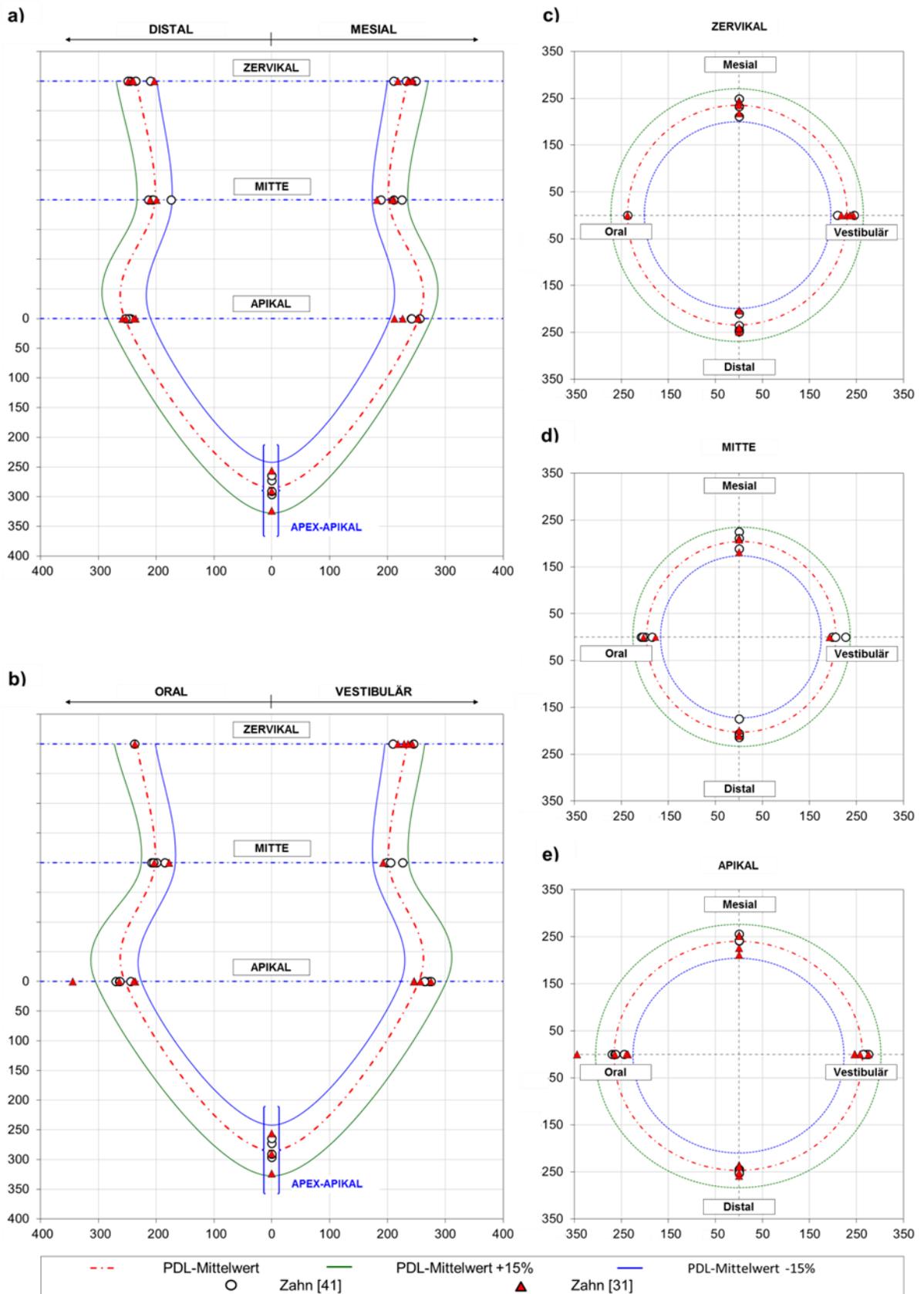


Abbildung 21: Breite des PDLs (in µm) der Zähne [31+41], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

Zahngruppe [32+42]

Für die Vermessung der Zahnpaarung Inzisivi [32+42] standen der Studie insgesamt 14 DVT-Aufnahmen zur Verfügung. Darunter fielen 10 Aufnahmen auf den Zahn [42], bzw. vier Aufnahmen auf den Zahn [32]. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit 162 Messungen durchgeführt. Eine Übersicht der durchgeführten Messungen der berechneten arithmetischen PDL-Mittelwerte, in Abhängigkeit von Messposition, Messebene patientenspezifischen Parametern wie Lebensalter und Geschlecht, findet sich in Tabelle 20.

Tabelle 20: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [32+42] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [32+42]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1													
	AK2	1	3	244	6	3	207	4	4	262	13	1	337	
	AK3	5	16	240	6	18	208	9	20	259	16	5	331	73
	Gesamt	6	19	240	6	21	208	9	24	259	16	6	332	66
Frauen	AK1	2	7	255	15	7	219	9	8	262	11	2	315	46
	AK2	1	4	242	2	3	210	5	4	258	2	1	283	
	AK3	6	18	228	12	20	200	9	24	239	14	6	266	24
	Gesamt	8	25	235	18	27	205	13	32	245	16	8	278	35
Gesamt	AK1	2	7	255	15	7	219	9	8	262	11	2	315	46
	AK2	2	7	243	4	6	208	4	8	260	8	2	310	38
	AK3	11	34	233	11	38	204	10	44	248	18	11	296	60
	Gesamt	14	44	238	14	48	206	11	56	251	18	14	301	56

Wie bereits bei der Zahnpaarung [31+41] konnte auch für die Zahnpaarung [32+42] aufgrund der geringen Abweichungen zwischen den korrespondierenden Werten statistisch der Nachweis erbracht werden, dass beide Zähne im Rahmen der weiteren Betrachtungen zusammengefasst werden können (Tabelle 21).

Tabelle 21: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen(-Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [32], [42] und Zahnpaarung [32+42] (N, Anzahl Messungen)

Zahnebene	ZAHN [32]		ZAHN [42]		ZAHN [32+42]	
	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a
-Zervikal-	12	0,8226	32	0,4899	44	0,7044
-Mitte-	13	0,6858	35	0,6076	48	0,2552
-Apikal-	16	0,6976	40	0,7065	56	0,7480

a = Kruskal-Wallis Test

Hinsichtlich der Formgebung der PDL-Breite entlang der Zahnwurzel zeigt sich auch bei den Zähnen der Zahnpaarung [32+42] eine signifikant ausgeprägte Einschnürung im Bereich des Widerstandszentrums des Zahnes (Tabelle 22; Abbildung 22).

Tabelle 22: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [32+42] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [32+42] Zervikal-Mitte	44 / 48	238 / 206	< 0,0001
ZAHN [32+42] Mitte-Apikal	48 / 56	206 / 251	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Der für diesen Bereich berechnete arithmetische Mittelwert des PDLs liegt mit ca. 206 µm deutlich (ca. 32-45 µm) unterhalb der Zahlenwerte, die für die -Zervikal- (238 µm) bzw. die -Apikal-Ebene (251 µm) berechnet wurden (Tabelle 22). Was die Formgebung des PDLs entlang des Wurzelumfanges angeht, so zeigen die Polardiagramme der drei horizontalen Messebenen deutlich ein auf den Koordinatenursprung bezogenes, radialsymmetrisches Verhalten der PDL-Mittelwerte (Abbildung 22). Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten waren in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [32+42] statistisch nicht signifikant ($44 < N < 56$; $0,2552 < \text{Signifikanz}^a < 0,7480$) (Tabelle 21, Zahnpaarung ZAHN [32+42]).

Bezüglich der Messwertstreuung ist anzumerken, dass sich mit Ausnahme der Werte für Apex-Apikal (57 %) nahezu 100 % aller in den horizontalen Ebenen gemessenen Messpunkte in dem für sie jeweils relevanten Streuband von ± 15 % des arithmetischen Ebenenmittelwertes bewegen. Während bei den männlichen Patienten in allen drei horizontalen Messebenen keine sta-

tistisch signifikanten Veränderungen der PDL-Breite in Abhängigkeit des Alters festgestellt werden können (Tabelle 23), zeigt sich im Gegensatz hierzu bei den weiblichen Patienten ein signifikanter Einfluss des Lebensalters in allen drei Messebenen (siehe Tabelle 24).

Tabelle 23: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [32+42] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [32+42] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	0	-	3	244	16	240	-	0,5307	-
-Mitte-	0	-	3	207	18	208	-	1,0000	-
-Apikal-	0	-	4	262	20	259	-	0,5319	-

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,05)

Tabelle 24: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [32+42] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [32+42] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	7	255	4	242	18	228	0,4299	0,0004	< 0,0001
-Mitte-	7	219	3	210	20	200	0,3383	0,0255	< 0,0001
-Apikal-	8	262	4	258	24	239	0,9773	0,0001	< 0,0001

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Im Mittel liegen hier die Messwerte der Altersklasse (AK1) um ca. 10 % über den vergleichbaren Werten der Altersklasse (AK3). Aufgrund der in Tabelle 20 gezeigten Konstellation der verfügbaren Daten ist eine Aussage bezüglich eines möglichen Einflusses des Geschlechts auf die Größe des PDLs lediglich für die Altersklasse (AK3) möglich. In dieser Altersgruppe wurde bei den weiblichen Patienten durchwegs ein signifikant geringerer PDL-Wert in der Größenordnung von 5% gemessen. Bei Vernachlässigung des Lebensalters zeigt sich lediglich in der Ebene -Apikal- ein signifikanter Einfluss des Geschlechts auf die Größe der mittleren PDL Breite (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [32+42] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [32+42] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	25	235	19	240	0,0520
-Mitte-	27	205	21	208	0,2162
-Apikal-	32	245	24	259	0,0017

a = Mann-Whitney-U-Test

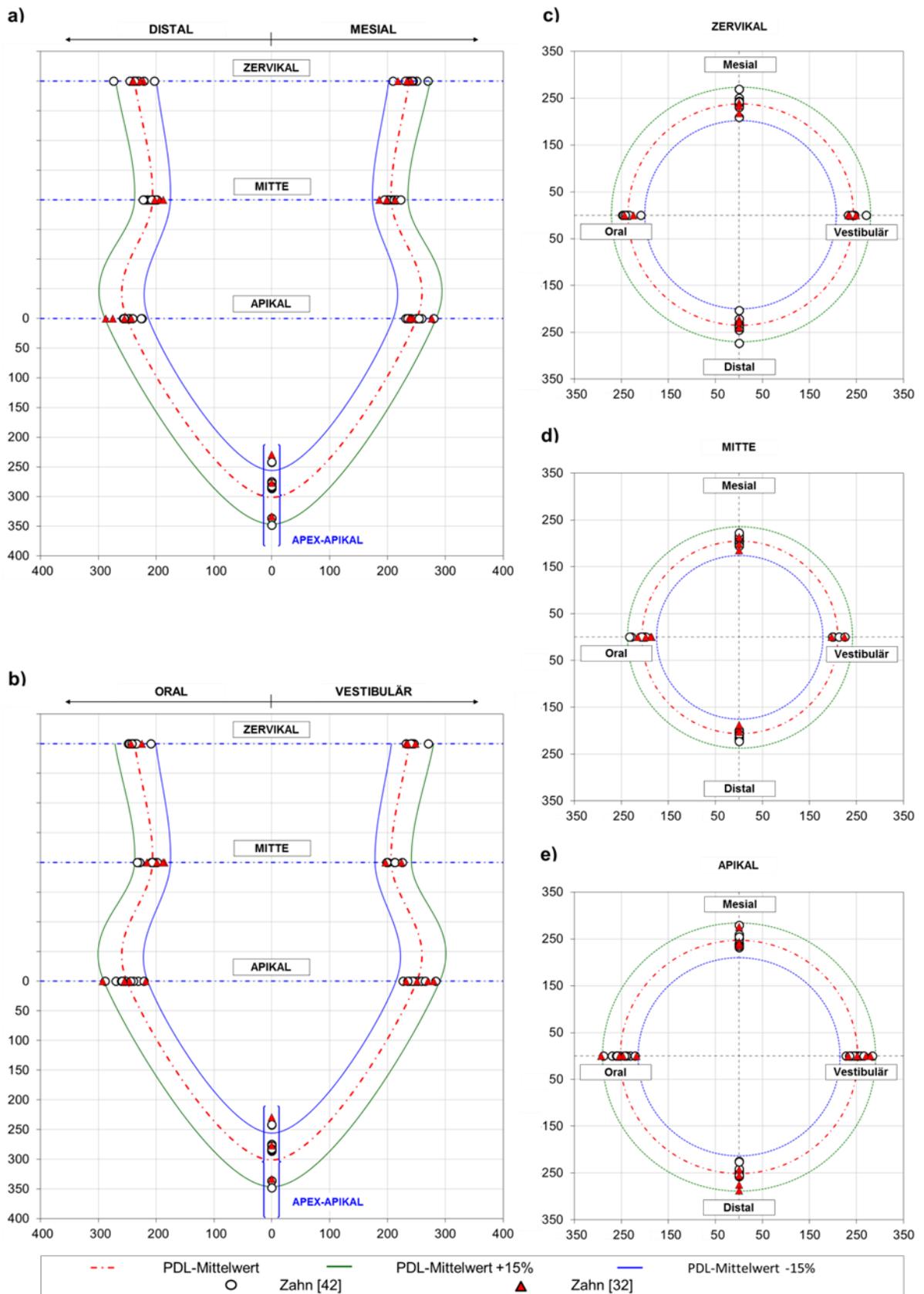


Abbildung 22: Breite des PDLs (in μm) der Zähne [32+42], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

Zahngruppe [31+41+32+42]

Im Rahmen der Untersuchung der Unterkiefer Inzisivi [31+41+32+42] wurden im Laufe von 247 Messungen insgesamt 22 Zähne vermessen, wobei sich die Gruppe der untersuchten Zähne aus 10 Zähnen des Typs [42], vier Zähnen des Typs [41] sowie jeweils vier Zähnen des Typs [32] und [31] zusammensetzte. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Messergebnisse (arithmetische PDL-Mittelwerte) in Abhängigkeit der untersuchten Probandengruppe, Altersklasse (AK), Messposition und Messebene findet sich in Tabelle 26.

Tabelle 26: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [31+41+32+42] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [μm] der Zahnpaarung [31+41+32+42]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1													
	AK2	3	9	244	4	9	212	8	11	262	11	3	319	21
	AK3	7	22	239	7	23	208	8	28	255	17	7	317	65
	Gesamt	10	31	241	6	32	209	8	39	257	16	10	318	54
Frauen	AK1	3	9	253	14	11	215	10	12	261	9	3	298	44
	AK2	2	6	245	4	7	208	4	8	259	4	2	274	13
	AK3	9	28	226	13	28	196	11	36	244	22	8	268	23
	Gesamt	12	37	232	18	39	202	13	48	248	21	11	276	31
Gesamt	AK1	3	9	253	14	11	215	10	12	261	9	3	298	44
	AK2	5	15	244	3	16	211	7	19	260	8	5	301	29
	AK3	16	50	232	12	51	202	11	64	249	21	15	291	52
	Gesamt	22	68	236	14	71	205	12	87	252	19	21	296	47

Wie aus der Tabelle 27, bzw. der Abbildung 23 zu ersehen ist, unterscheiden sich die errechneten PDL-Mittelwerte der übergeordneten Zahngruppe [31+41+32+42] mit den Zahlenwerten (Zervikal 236 μm , Mitte 205 μm , Apikal 252 μm) nur sehr marginal (< 2 % von den arithmetischen PDL-Mittelwerten der Zahnpaarungen [31+41] bzw. [32+42]). Aufgrund der gewonnenen Messergebnisse kann zudem statistisch der Nachweis erbracht werden, dass die vier Unterkiefer-Inzisivi für die weiteren Betrachtungen zusammengefasst werden können.

Tabelle 27: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [31+41], [32+42] und der Zahngruppe [31+41+32+42] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; S, Signifikanz)

Zahnpaarung / Zahnebene	Mittlere PDL-Breite [μm]									Signifikanzen ^b	
	[31+41]			[32+42]			[31+41+32+42]			MW _A vs MW _C	MW _B vs MW _C
	N	MW _A	S ^a	N	MW _B	S ^a	N	MW _C	S ^a		
-Zervikal-	24	234	0,9539	44	238	0,7044	68	236	0,9863	0,8391	0,8919
-Mitte-	23	202	0,6439	48	206	0,2552	71	205	0,5795	0,5002	0,6782
-Apikal-	31	254	0,1241	56	251	0,7480	87	252	0,4168	0,6006	0,7234

a = Kruskal-Wallis / b = Kruskal-Wallis Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Was die Formgebung des PDLs entlang der Wurzellängsachse angeht, so zeigt sich auch bei den Unterkiefer-Inzisivi deutlich eine statistisch signifikante Reduzierung des PDLs von ca. 31-47 μm im Bereich der Messebene -Mitte- (Tabelle 28, Abbildung 23).

Tabelle 28: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [31+41+32+42] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [μm]	
ZAHN [31+41+32+42] Zervikal-Mitte	68 / 71	236 / 205	< 0,0001
ZAHN [31+41+32+42] Mitte-Apikal	71 / 87	205 / 252	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Signifikante Änderungen hinsichtlich des radialsymmetrischen Verhaltens der PDL-Mittelwerte sind, wie den Polardiagrammen zu entnehmen ist (siehe Abbildung 23), nicht zu erkennen. Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten sind in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [31+41+32+42] statistisch nicht signifikant ($68 < N < 87$; $0,4168 < \text{Signifikanz}^a < 0,9863$) (Tabelle 27, Zahnpaarung [31+41+32+42]).

Hinsichtlich der Streuung der Messwerte ist anzumerken, dass sich die Werte für 95 % Abdeckung mit Bandbreiten von ca. ± 13 -14 % in den horizontalen Ebenen bzw. ± 36 % in der vertikalen Ebene durchaus in dem bereits bekannten Größenrahmen bewegen. Ein signifikanter Einfluss des Lebensalters auf die Größe des PDLs ist bei den weiblichen Probanden in allen drei Ebenen festzustellen. Im Mittel liegen hier die Messwerte der Altersklasse (AK1) um ca. 10 % über den vergleichbaren Werten der Altersklasse (AK3) (Tabelle 29).

Tabelle 29: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [31+41+32+42] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [31+41+32+42] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	9	253	6	245	28	226	0,5105	< 0,0001	< 0,0001
-Mitte-	11	215	7	208	28	196	0,3378	0,0027	< 0,0001
-Apikal-	12	261	8	259	36	244	0,9229	< 0,0001	< 0,0001

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Bei den männlichen Patienten ist, wie bereits bei Betrachtung der beiden Einzelpaarungen [31+41] und [32+42] festgestellt wurde, nahezu kein signifikanter Einfluss des Lebensalters auf die Größe der PDL-Breite zu beobachten (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [31+41+32+42] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [31+41+32+42] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	0	-	9	244	22	239	-	0,0954	-
-Mitte-	0	-	9	212	23	208	-	0,1989	-
-Apikal-	0	-	11	262	28	255	-	0,1372	-

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,05)

In Bezug auf die Abhängigkeit der PDL-Breite vom Geschlecht der untersuchten Probanden zeigt sich bei den weiblichen Probanden eine signifikant geringere PDL-Breite als bei den männlichen Probanden (siehe Tabelle 31).

Tabelle 31: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [31+41+32+42] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [31+41+32+42] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	37	232	31	241	0,0038
-Mitte-	39	202	32	209	0,0039
-Apikal-	48	248	39	257	0,0056

a = Mann-Whitney-U-Test

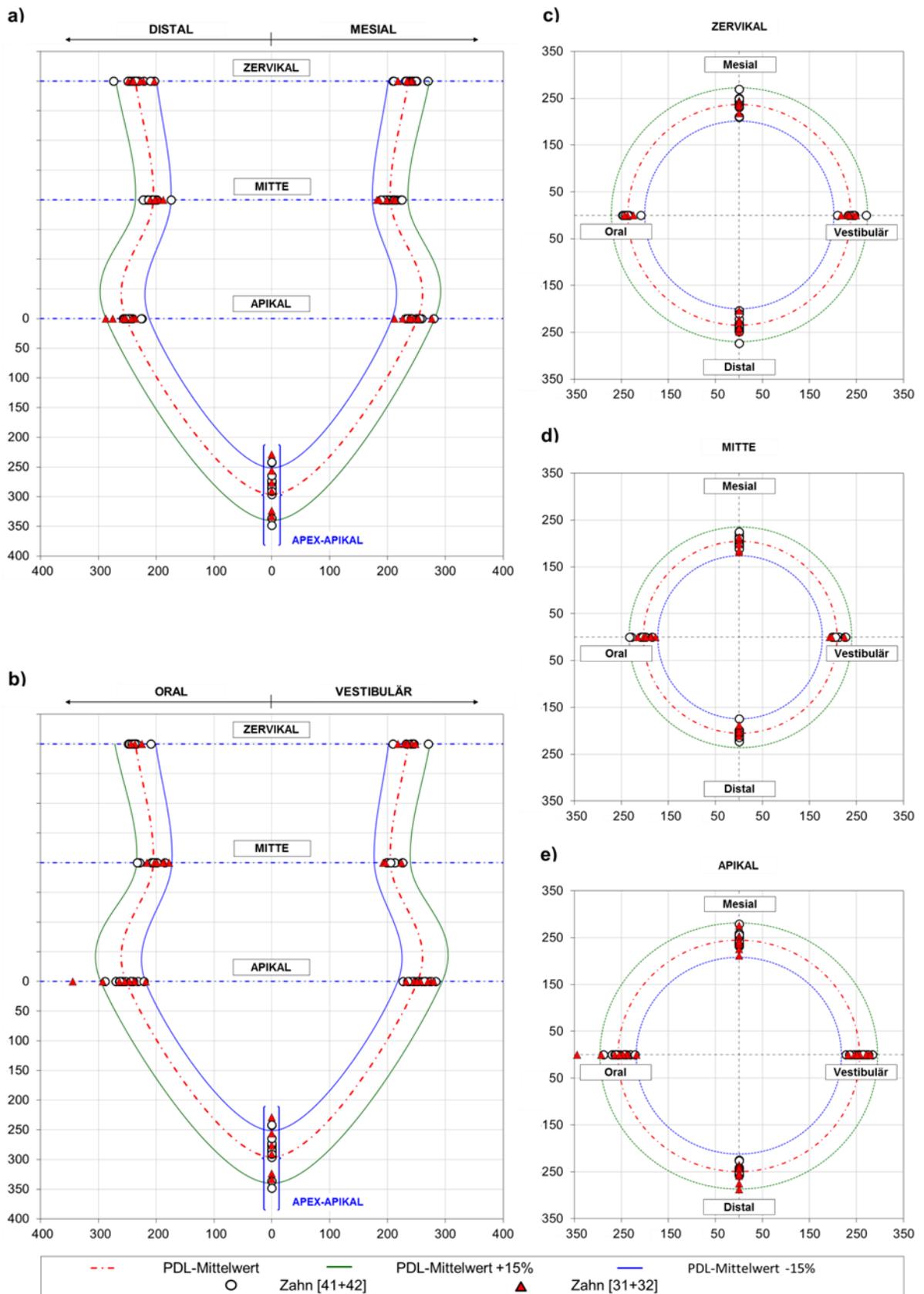


Abbildung 23: Breite des PDLs (in µm) der Zähne [31+41+32+42] dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

5.2 Canini

Zu der Zahngruppe der Canini gehören im Oberkiefer die Zähne [13] und [23] und im Unterkiefer die Zähne [33] und [43].

Zahngruppe [13+23]

Aus dem Bereich der Zahngruppe Canini [13+23] wurden im Verlauf von 444 Messungen insgesamt 37 Zähne vermessen, wobei sich die Gruppe der untersuchten Zähne aus 19 Zähnen des Typs Canini [13] und 18 Zähnen des Typs Canini [23] zusammensetzte. Eine detaillierte Aufschlüsselung der durchgeführten Messungen und der errechneten PDL-Mittelwerte hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der jeweils gewählten Messposition, Messebene, Probandengruppe und Altersklasse zeigt Tabelle 32.

Tabelle 32: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [13+23] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [13+23]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	7	26	263	11	27	221	10	28	264	18	7	306	36
	AK2	4	15	263	12	14	221	10	16	261	9	4	303	50
	AK3	3	9	264	11	11	226	17	10	270	11	3	326	15
	Gesamt	14	50	263	11	52	222	12	54	264	15	14	309	36
Frauen	AK1	11	40	261	15	41	225	10	44	269	20	11	329	46
	AK2	10	36	259	13	34	221	17	35	265	24	9	306	24
	AK3	2	6	261	12	8	227	11	8	265	26	2	305	54
	Gesamt	23	82	260	14	83	224	13	87	267	22	22	317	39
Gesamt	AK1	18	66	262	13	68	224	10	72	267	20	18	320	43
	AK2	14	51	260	13	48	221	15	51	263	20	13	305	32
	AK3	5	15	263	11	19	226	14	18	268	18	5	317	31
	Gesamt	37	132	261	13	135	223	13	141	266	20	36	314	37

Aufgrund der durchgeführten Messungen kann u. a. der Nachweis erbracht werden, dass die beiden Zähne aufgrund statistisch vernachlässigbarer Unterschiede in den Messwerten für die nachfolgenden Betrachtungen zu einer gemeinsamen Zahnpaarung [13+23] zusammengefasst werden können (Tabelle 33).

Tabelle 33: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [13],[23] und Zahnpaarung [13+23] (N, Anzahl Messungen)

Zahnebene	ZAHN [13]		ZAHN [23]		ZAHN [13+23]	
	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a
-Zervikal-	70	0,5711	62	0,9559	132	0,9101
-Mitte-	69	0,1213	66	0,6988	135	0,2199
-Apikal-	74	0,1394	67	0,6442	141	0,3753

a = Kruskal-Wallis Test

Bereits bei einer ersten Betrachtung der Messergebnisse, das heißt ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht, zeigt sich aufgrund von signifikanten Unterschieden in den PDL-Mittelwerten der drei horizontalen Zahnebenen bei allen untersuchten Zähnen entlang der Zahnwurzel ein stark ausgeprägter sanduhrförmiger Verlauf des PDLs (Tabelle 34, Abbildung 24).

Tabelle 34: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [13+23] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [13+23] Zervikal-Mitte	132 / 135	261 / 223	< 0,0001
ZAHN [13+23] Mitte-Apikal	135 / 141	223 / 266	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Der für die Formgebung des PDLs verantwortliche PDL-Mittelwert der Messebene -Mitte- liegt mit ca. 223 µm deutlich (ca. 38-43 µm) unterhalb des mit ca. 261 µm in der Zervikal- bzw. mit ca. 266 µm in der Apikalebene gemessenen, mittleren Spaltwertes (Tabelle 34).

Bei Betrachtung der horizontalen Schnittebenen im Polardiagramm ist festzustellen, dass sich die für die jeweiligen anatomischen Achsen gemessenen PDL-Mittelwerte in nahezu gleichem Abstand vom Koordinatenursprung auf einem Kreis befinden (siehe Abbildung 24). Die gemessenen Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten waren hierbei in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [13+23] statistisch nicht signifikant ($132 < N < 141$; $0,2199 < \text{Signifikanz}^a < 0,9101$) (Tabelle 33, Zahnpaarung ZAHN [13+23]).

Was die Streuung der Messpunkte angeht, so liegen im Falle der horizontalen Messebenen ca. 95 % aller PDL-Messwerte innerhalb eines Streubandes von ± 15 %, wohingegen in der vertikalen Achse lediglich etwa 78 % der Apikalwerte in diesem Bereich anzutreffen sind.

Ein statistisch signifikanter Einfluss des Lebensalters auf die Größe der PDL-Breite ist weder bei den weiblichen Patienten (Tabelle 35) noch bei den männlichen Patienten festzustellen (Tabelle 36).

Tabelle 35: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [13+23] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [13+23] Zahnebene	PDL-Breite [μm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	40	261	36	259	6	261	0,5296	0,7012	0,9550
-Mitte-	41	225	34	221	8	227	0,7684	0,3226	0,4064
-Apikal-	44	269	35	265	8	265	0,2437	0,8378	0,3701

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Tabelle 36: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [13+23] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [13+23] Zahnebene	PDL-Breite [μm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	26	263	15	263	9	264	0,7609	0,7244	0,8970
-Mitte-	27	221	14	221	11	226	0,9877	0,3827	0,3191
-Apikal-	28	264	16	261	10	270	0,7214	0,0585	0,0757

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Gleiches gilt für den direkten Vergleich der Geschlechter untereinander, auch hier zeigt sich kein statistisch signifikanter Unterschied in den Messwerten beider Patientengruppen (Tabelle 37).

Tabelle 37: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [13+23] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [13+23] Zahnebene	PDL-Breite [μm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	82	260	50	263	0,2418
-Mitte-	83	224	52	222	0,1983
-Apikal-	87	267	54	264	0,3293

a = Mann-Whitney-U-Test

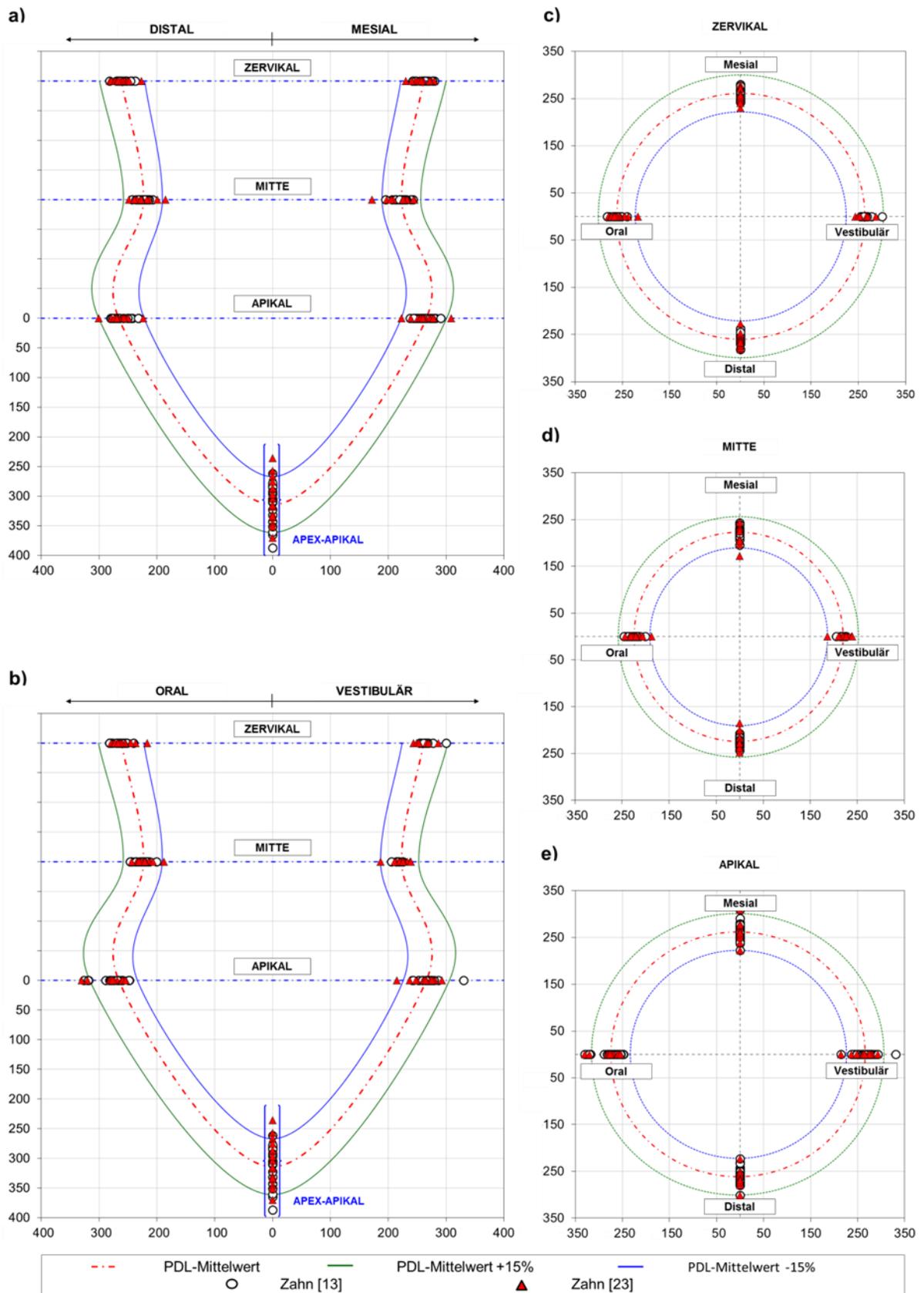


Abbildung 24: Breite des PDLs (in µm) der Zähne [13+23] dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

Zahngruppe [33+43]

Was die Zahnpaarung der Canini [33+43] angeht, so standen für die Untersuchung des PDLs jeweils 10 DVT-Aufnahmen des Zahntyps [33] und [43] zur Verfügung. Insgesamt umfasste die Messkampagne 233 Messungen. Eine detaillierte Aufbereitung der Messergebnisse wie auch eine Präsentation der berechneten PDL-Mittelwerte in Abhängigkeit von der jeweils zugehörigen Messposition, Messebene, Probandengruppe und Altersklasse zeigt Tabelle 38.

Tabelle 38: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [33+43] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [33+43]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	1	4	256	7	3	226	8	4	269	19	1	348	
	AK2	2	7	251	5	7	221	8	8	268	33	2	306	39
	AK3	4	15	241	7	15	205	7	12	254	7	3	301	33
	Gesamt	7	26	246	9	25	212	11	24	261	21	6	311	33
Frauen	AK1	3	11	255	8	11	218	10	12	263	14	3	314	36
	AK2	3	11	251	7	10	211	7	12	263	18	3	277	29
	AK3	9	31	247	10	27	210	12	36	255	17	9	284	30
	Gesamt	13	46	249	10	41	212	12	52	258	17	13	288	34
Gesamt	AK1	4	15	256	8	14	219	10	16	265	15	4	322	34
	AK2	5	18	251	6	17	215	9	20	265	24	5	288	32
	AK3	13	46	245	9	42	208	11	48	255	15	12	288	30
	Gesamt	20	72	248	9	66	212	11	76	259	19	19	295	34

Aufgrund der durchgeführten Messungen konnte u. a. statistisch der Nachweis erbracht werden, dass die beiden Zähne zu einer gemeinsamen Zahnpaarung [33+43] zusammengefasst werden können (Tabelle 39).

Tabelle 39: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [33], [43] und Zahnpaarung [33+43] (N, Anzahl Messungen)

Zahnebene	ZAHN [33]		ZAHN [43]		ZAHN [33+43]	
	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a	N	Signifikanz ^a
-Zervikal-	35	0,2755	37	0,9468	72	0,8294
-Mitte-	31	0,9505	35	0,9466	66	0,6937
-Apikal-	36	0,1353	40	0,4453	76	0,2447

a = Kruskal-Wallis Test

Es zeigt sich auch bei der Zahnpaarung [33+43] des Unterkiefers aufgrund signifikanter Unterschiede in den PDL-Mittelwerten der drei Messebenen eine deutliche, sanduhrförmige Ausprägung des PDLs (Tabelle 40, Abbildung 25).

Tabelle 40: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [33+43] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [33+43] Zervikal-Mitte	72 / 66	248 / 212	< 0,0001
ZAHN [33+43] Mitte-Apikal	66 / 76	212 / 259	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Der an der Einschnürung gemessene Wert des PDLs liegt mit einem errechneten Mittelwert von ca. 212 µm ebenfalls deutlich (36 µm bzw. 47 µm) unterhalb der Werte der Zervikal-Ebene (248 µm) bzw. Apikal-Ebene (259 µm). Wie aus den Polardiagrammen (siehe Abbildung 25) deutlich zu ersehen ist, liegen auch bei der Zahnpaarung [33+43] die PDL-Mittelwerte der jeweiligen Messebene in nahezu gleichem Kreisabstand zum gemeinsamen Koordinatenursprung (Radialsymmetrie). Die gemessenen Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten waren hierbei in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [33+43] statistisch nicht signifikant ($66 < N < 76$; $0,2447 < \text{Signifikanz}^a < 0,8294$) (Tabelle 39, Zahnpaarung ZAHN [33+43]).

Die Streuung der Messwerte in den jeweiligen Messebenen liegt in den horizontalen Messebenen in einem Bereich von ca. $\pm 10-14$ %, bzw. ± 20 % in der vertikalen Messebene bei einer darin anzutreffenden Häufigkeit der Messwerte von jeweils ca. 95 %.

Bei der Betrachtung des Einflusses des Lebensalters auf die Größe des PDLs zeigt sich insbesondere bei den männlichen Patienten sowohl in der zervikalen Ebene als auch in der Messebene -Mitte- eine signifikante Abhängigkeit (ca. 8 %) der PDL-Breite vom Lebensalter des Patienten. In der Messebene -Apikal- hingegen ist diese Abhängigkeit statistisch nicht signifikant ausgeprägt (Tabelle 41).

Tabelle 41: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [33+43] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [33+43] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	4	256	7	251	15	241	0,1582	0,0003	< 0,0001
-Mitte-	3	226	7	221	15	205	0,3413	0,0002	0,0003
-Apikal-	4	269	8	268	12	254	0,5790	0,2121	0,1212

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Bei den weiblichen Probanden ist hingegen lediglich in der Ebene -Zervikal- eine signifikante Abhängigkeit vom Lebensalter festzustellen (Tabelle 42).

Tabelle 42: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [33+43] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [33+43] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	11	255	11	251	31	247	0,1544	0,3838	0,0112
-Mitte-	11	218	10	211	27	210	0,1148	0,9858	0,0535
-Apikal-	12	263	12	263	36	255	0,6976	0,2358	0,0991

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Ein signifikanter Einfluss der Geschlechtszugehörigkeit auf die Größe des PDLs ist in allen Messebenen nicht festzustellen (Tabelle 43).

Tabelle 43: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [33+43] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [33+43] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	46	249	26	246	0,1134
-Mitte-	41	212	25	212	0,9578
-Apikal-	52	258	24	261	0,9243

a = Mann-Whitney-U-Test

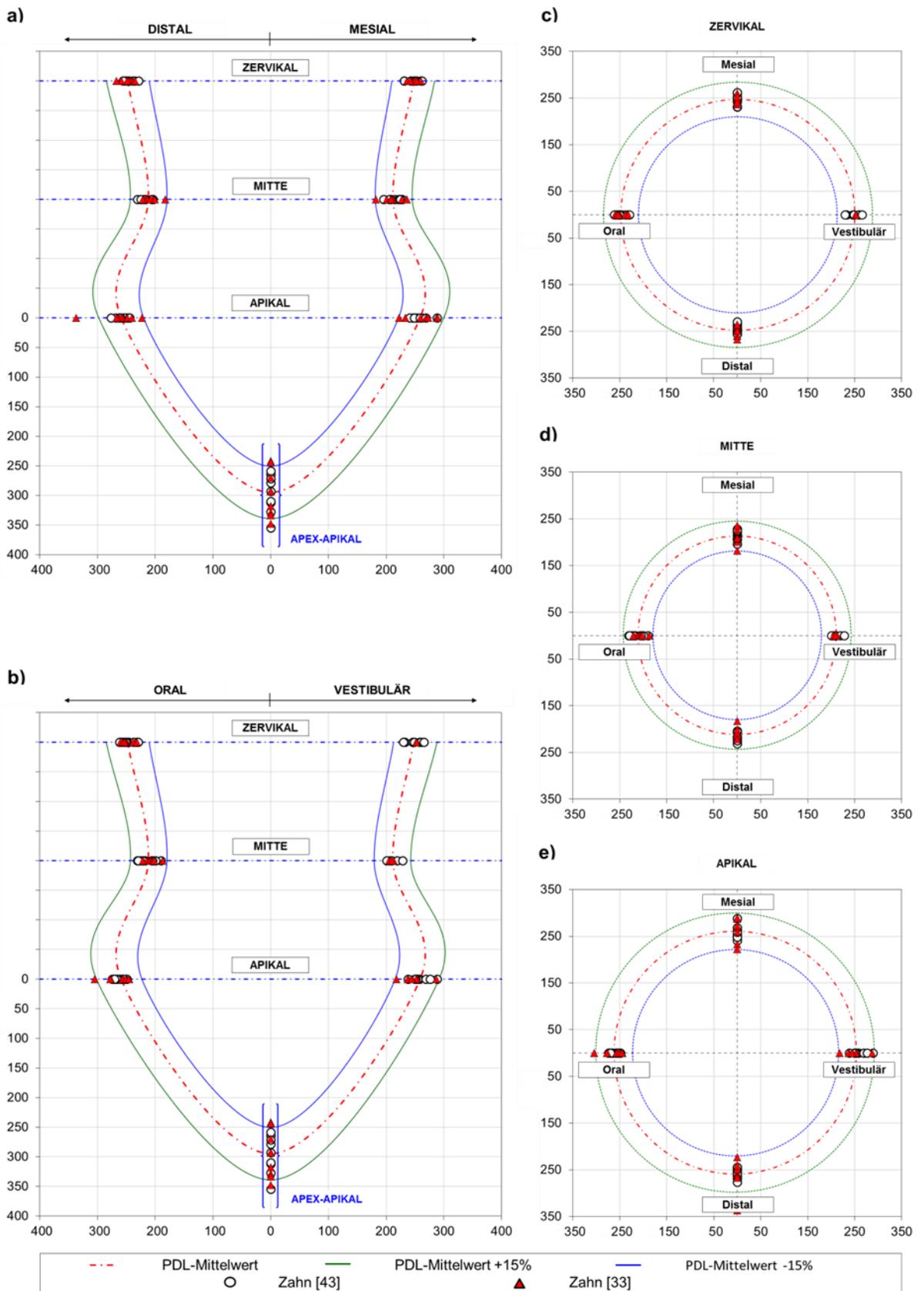


Abbildung 25: Breite des PDLs (in µm) der Zähne [33+43], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

5.3 Prämolaren

Die Gruppe der Prämolaren umfasst im Ober- wie auch im Unterkiefer jeweils vier Zähne. Als Besonderheit ist anzumerken, dass nur die einwurzeligen Zähne für die statistische Auswertung herangezogen wurden, um der Grundvoraussetzung der Gruppenbildung, der anatomischen Gleichheit der Zähne, gerecht zu werden.

Zahngruppe [14+24+15+25]

Die Gruppe der betrachteten Prämolaren [14+24+15+25] des Oberkiefers setzt sich zusammen aus 10 Zähnen des Typs [14], acht Zähnen des Typs [15], 14 Zähnen des Typs [24] sowie 10 Zähnen des Typs [25]. Insgesamt wurden im Verlauf der Messreihe 42 Zähne im Rahmen von 521 Messungen untersucht und analysiert, wovon 20 Zähne von männlichen, und 22 Zähne von weiblichen Patienten stammten. Eine Zusammenstellung der durchgeführten Messungen und Messergebnisse bezüglich ihrer Abhängigkeit von den Parametern Messposition, Patientengruppe und Altersklasse findet sich in Tabelle 44 und Tabelle 45.

Tabelle 44: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [14+24+15+25] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [μm] der Zahnpaarung [14+24+15+25]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	10	38	262	8	39	227	9	35	271	24	10	316	68
	AK2	6	24	254	8	24	221	8	23	267	19	6	358	59
	AK3	5	19	254	8	20	221	8	20	280	25	5	355	48
	Gesamt	20	77	258	9	79	224	9	74	270	23	20	337	64
Frauen	AK1	10	38	267	12	39	228	11	39	274	24	9	323	38
	AK2	10	38	252	10	37	220	12	36	261	18	10	305	34
	AK3	2	7	260	7	8	208	4	8	254	5	2	272	19
	Gesamt	22	83	259	13	84	223	12	83	267	22	21	310	37
Gesamt	AK1	20	76	264	11	78	227	10	74	272	24	19	320	55
	AK2	16	62	253	9	61	220	11	59	263	18	16	325	50
	AK3	7	26	255	8	28	217	9	28	273	24	7	332	57
	Gesamt	42	160	259	11	163	223	11	157	268	22	41	323	53

Tabelle 45: Gegenüberstellung der mittleren PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zahnpaarungen [14+24] und [15+25] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [14+24]								PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [15+25]							
		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		Apex-Ap.		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		Apex-Ap.	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Männer	AK1	260	9	225	7	273	29	332	87	263	8	228	10	269	17	301	47
	AK2	257	6	225	6	260	9	396	55	252	9	216	8	272	23	320	35
	AK3	254	9	218	7	263	21	367	91	254	9	223	8	291	20	348	16
	Gesamt	258	8	223	8	267	23	358	77	258	10	224	11	274	21	315	40
Frauen	AK1	264	13	227	11	273	26	320	32	272	10	232	9	276	20	337	72
	AK2	254	8	224	8	268	20	324	22	250	11	216	14	255	14	285	34
	AK3	260	7	208	4	254	5	272	19								
	Gesamt	260	12	223	11	268	23	314	31	258	15	222	14	264	19	300	48
Gesamt	AK1	263	11	226	10	273	27	325	58	266	10	230	10	272	18	311	51
	AK2	255	7	224	7	265	17	351	50	251	10	216	12	262	20	298	36
	AK3	257	8	213	8	259	15	320	77	254	9	223	8	291	20	348	16
	Gesamt	259	10	223	10	268	23	333	58	258	12	223	12	269	21	309	43

In Tabelle 46 sind diesen Ergebnissen die jeweiligen Berechnungen der beiden untergeordneten Zahnpaarungen [14+24] und [15+25] gegenübergestellt. Aufgrund der geringen, statistisch nicht signifikanten Abweichungen zwischen den jeweils korrespondierenden PDL-Messdaten der beiden Zahnpaarungen und der übergeordneten Zahngruppe kann u. a. auch statistisch der Nachweis erbracht werden, dass die vier Oberkiefer-Prämolaren im Rahmen der weiteren Betrachtungen zu einer gemeinsamen, übergeordneten Zahngruppe zusammengefasst werden können.

Tabelle 46: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [14+24], [15+25] und der Zahnpaarung [14+24+15+25] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; S, Signifikanz)

Zahnpaarung / Zahnebene	Mittlere PDL-Breite [µm]									Signifikanzen ^b	
	[14+24]			[15+25]			[14+24+15+25]			MW _A vs MW _C	MW _B vs MW _C
	N	MW _A	S ^a	N	MW _B	S ^a	N	MW _C	S ^a		
-Zervikal-	89	259	0,2647	71	258	0,3134	160	259	0,2690	0,7626	0,7255
-Mitte-	93	223	0,0751	70	223	0,6429	163	223	0,3159	0,7402	0,6887
-Apikal-	90	268	0,1657	67	269	0,9962	157	268	0,7328	0,6807	0,6165

a = Kruskal-Wallis / b = Kruskal-Wallis Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Was die Formgebung des PDLs entlang der Wurzellängsachse angeht, so zeigt sich auch bei den Prämolaren des OK eine deutlich sichtbare, statistisch signifikante Reduzierung des PDLs im Bereich der Messebene -Mitte- (Abbildung 26, Tabelle 47).

Tabelle 47: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [14+24+15+25] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [14+24+15+25] Zervikal-Mitte	160 / 163	259 / 223	< 0,0001
ZAHN [14+24+15+25] Mitte-Apikal	163 / 157	223 / 268	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Der im Bereich der Einschnürung ermittelte arithmetische Mittelwert des PDLs liegt mit einem Zahlenwert von ca. 223 µm deutlich (36 µm/45 µm) unterhalb der im Vergleich hierzu gemessenen, berechneten Werte der Zervikal- (259 µm) bzw. Apikal-Ebene (268 µm). Bei Betrachtung der horizontalen Ausprägung des PDLs am Wurzelumfang ist in allen drei horizontalen Messebenen eine deutlich sichtbare Radialsymmetrie der errechneten PDL-Mittelwerte zu erkennen (Abbildung 26). Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten sind in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [14+24+15+25] statistisch nicht signifikant ($157 < N < 163$; $0,2690 < \text{Signifikanz}^a < 0,7328$) (Tabelle 46, Zahnpaarung [14+24+15+25]).

Mit einer anzutreffenden Messwerthäufigkeit von 95 % und einer Streubreite um den jeweils errechneten Mittelwert von ca. ±12 % in der horizontalen bzw. 33 % in der vertikalen Messebene liegen auch hier die Werte im Bereich der bereits bekannten Größenordnungen. Was den Einfluss des Lebensalters auf die Größe des PDLs angeht, so kann bei den weiblichen Probanden in allen drei Ebenen eine statistisch signifikante Abhängigkeit festgestellt werden (Tabelle 48).

Tabelle 48: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [14+24+15+25] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [14+24+15+25] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	38	267	38	252	7	260	< 0,0001	0,0430	0,2074
-Mitte-	39	228	37	220	8	208	0,0114	0,0008	< 0,0001
-Apikal-	39	274	36	261	8	254	0,0285	0,2421	0,0139

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Gleiches gilt analog auch für die Gruppe der männlichen Probanden wo ebenfalls ein signifikantes, nichtlineares Verhalten der mittleren PDL-Breite in Anhängigkeit des Lebensalters zu beobachten ist (Tabelle 49).

Tabelle 49: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [14+24+15+25] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [14+24+15+25] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	38	262	24	254	19	254	0,0022	0,7269	0,0013
-Mitte-	39	227	24	221	20	221	0,0092	0,7662	0,0314
-Apikal-	35	271	23	267	20	280	0,3259	0,0381	0,1791

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Ein statistisch signifikanter Einfluss des Geschlechts auf die Größe und Form des PDLs ist nicht festzustellen (Tabelle 50).

Tabelle 50: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [14+24+15+25] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [14+24+15+25] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	83	259	77	258	0,5286
-Mitte-	84	223	79	224	0,6903
-Apikal-	83	267	74	270	0,2430

a = Mann-Whitney-U-Test

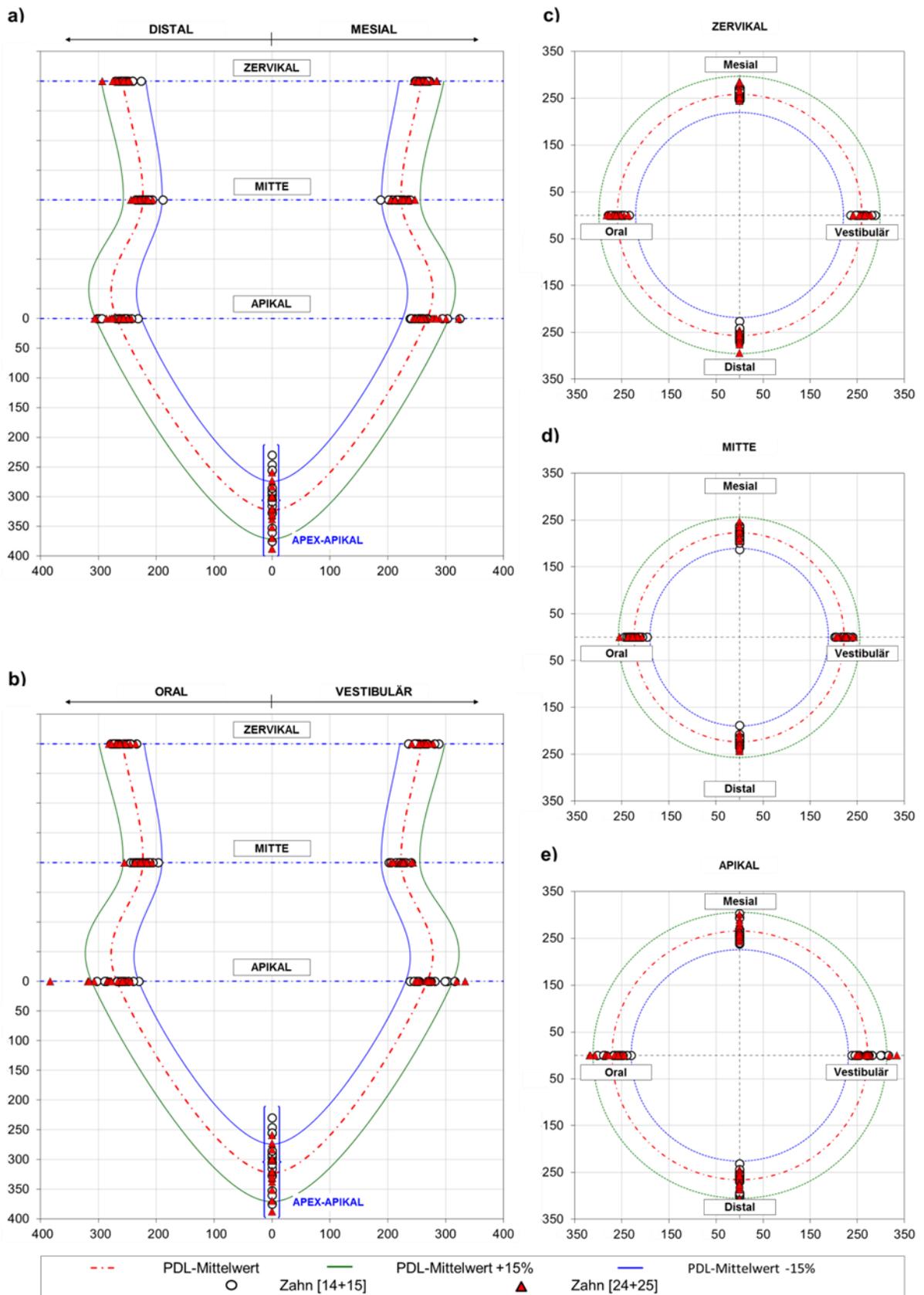


Abbildung 26: Breite des PDLs (in μm) der Zähne [14+24+15+25], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

Zahngruppe [34+44+35+45]

Für die Vermessung und Analyse der Prämolaren des UK [34+44+35+45] standen insgesamt 25 DVT-Aufnahmen zur Verfügung. Die Messreihe umfasst hierbei insgesamt 314 Einzelmessungen, die sich ihrerseits wiederum aus 76 Messungen männlicher und 238 Messungen weiblicher Zähne zusammensetzen. Was die Anzahl der untersuchten Zähne angeht, so entfielen neun Zähne auf den Zahn [34], sechs Zähne auf den Zahn [35], sechs Zähne auf den Zahn [44] sowie vier Zähne auf den Zahn [45]. Die abschließenden Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 51 in Form von arithmetischen Mittelwerten des gemessenen PDLs sowie deren Abhängigkeit von den Parametern Messposition, Messebene, Lebensalter und Geschlecht des Patienten zusammengefasst.

Tabelle 51: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [34+44+35+45] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [μm] der Zahnpaarung [34+44+35+45]											
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	1	4	258	4	4	215	3	4	278	24	1	258	
	AK2	4	16	248	6	15	209	6	15	248	8	4	307	24
	AK3	1	4	240	2	4	213	0	4	255	13	1	359	
	Gesamt	6	24	248	8	23	211	5	23	255	16	6	307	37
Frauen	AK1	4	16	261	7	16	220	13	16	267	19	4	311	57
	AK2	5	18	252	11	19	209	9	20	259	11	5	294	58
	AK3	12	44	247	12	46	212	9	48	253	13	12	283	31
	Gesamt	19	70	251	13	73	213	11	76	257	15	19	286	38
Gesamt	AK1	5	20	261	7	20	219	11	20	270	20	5	301	55
	AK2	9	34	250	9	34	209	8	35	254	11	9	300	44
	AK3	13	48	246	12	50	212	9	52	253	13	13	289	36
	Gesamt	25	94	250	12	96	213	10	99	257	16	25	291	38

Tabelle 52 präsentiert die im Vergleich hierzu erzielten adäquaten Berechnungsergebnisse aus den Vermessungen der beiden untergeordneten Zahnpaarungen [34+44] und [35+45]. Wie anhand der beiden Tabellen zu ersehen ist, unterscheiden sich die errechneten PDL-Mittelwerte der übergeordneten Zahngruppe [34+44+35+45] mit den berechneten Zahlenwerten (Zervikal 250 μm , Mitte 213 μm , Apikal 257 μm) nur sehr marginal (<2 % von den in Tabelle 52 präsentierten arithmetischen PDL-Mittelwerten der Zahnpaare [34+44] und [35+45]).

Tabelle 52: Gegenüberstellung der mittleren PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zahnpaarungen [34+44] und [35+45] in den vier Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal- (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	PDL-Breite [μm] der Zahnpaarung [34+44]								PDL-Breite [μm] der Zahnpaarung [35+45]							
		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		-Apex-Ap.-		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		-Apex-Ap.-	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Männer	AK1									258	4	215	3	278	24	258	
	AK2	247	7	208	6	249	9	297	31	249	6	209	6	248	7	316	21
	AK3									240	2	213	0	255	13	359	
	Gesamt	247	7	208	6	249	9	297	31	249	8	211	5	258	19	312	43
Frauen	AK1	260	8	217	13	262	15	329	55	265	2	230	6	285	20	259	
	AK2	250	11	207	9	258	12	302	64	262	6	220	4	263	8	261	
	AK3	246	14	210	9	252	14	279	37	249	10	215	9	254	12	291	15
	Gesamt	249	14	211	11	256	14	288	44	254	11	219	10	260	17	280	20
Gesamt	AK1	260	8	217	13	262	15	329	55	261	5	222	10	281	21	258	1
	AK2	249	10	207	8	255	11	300	51	254	9	213	7	253	10	298	35
	AK3	246	14	210	9	252	14	279	37	247	9	215	8	254	12	304	33
	Gesamt	249	13	211	10	255	14	289	42	252	10	216	9	259	17	293	33

Aufgrund der geringen Abweichungen zwischen den korrespondierenden PDL-Messdaten der beiden Zahngruppen kann statistisch der Nachweis erbracht werden, dass die beiden Zahnpaare im Rahmen der weiteren Betrachtungen zu einer gemeinsamen Zahngruppe zusammengefasst werden können (Tabelle 53).

Tabelle 53: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [34+44], [35+45] und der Zahngruppe [34+44+35+45] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; S, Signifikanz)

Zahnpaarung / Zahnebene	Mittlere PDL-Breite [μm]								Signifikanzen ^b		
	[34+44]			[35+45]			[34+44+35+45]		MW _A vs MW _C	MW _B vs MW _C	
	N	MW _A	S ^a	N	MW _B	S ^a	N	MW _C			S ^a
-Zervikal-	56	249	0,9589	38	252	0,9046	94	250	0,9847	0,5468	0,4356
-Mitte-	57	211	0,6011	39	216	0,6665	96	213	0,4319	0,1702	0,0780
-Apikal-	60	255	0,6427	39	259	0,9547	99	257	0,9128	0,6301	0,5215

a = Kruskal-Wallis / b = Kruskal-Wallis Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Hinsichtlich der Ausprägung der PDL-Breite entlang der Zahnwurzel zeigt sich auch bei den UK-Prämolaren eine signifikante Einschnürung von ca. 37-44 μm im Bereich des Widerstandszentrums des Zahnes und die daraus resultierende sanduhrförmige Charakteristik des PDLs (Tabelle 54; Abbildung 27).

Tabelle 54: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [34+44+35+45] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [34+44+35+45] Zervikal-Mitte	94 / 96	250 / 213	< 0,0001
ZAHN [34+44+35+45] Mitte-Apikal	96 / 99	213 / 257	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

In den drei horizontalen Messebenen ist analog zu den Prämolaren des Oberkiefers ebenfalls ein auf den Koordinatenursprung bezogenes, radialsymmetrisches Verhalten des PDLs zu beobachten. Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten waren in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [34+44+35+45] statistisch nicht signifikant ($94 < N < 99$; $0,4319 < \text{Signifikanz}^a < 0,9847$) (Tabelle 53, Zahnpaarung [34+44+35+45]).

Bezüglich der Messwertstreuung ist anzumerken, dass sich mit Ausnahme der Werte für Apex-Apikal (76 %) nahezu 100 % aller in den horizontalen Ebenen gemessenen Messpunkte in dem für sie jeweils relevanten Streuband von ± 15 % des arithmetischen Ebenenmittelwertes bewegen. Ein Einfluss des Lebensalters auf die Größe des PDLs kann aufgrund der Konstellation der zur Verfügung stehenden Daten nicht eindeutig festgestellt werden. Während bei den weiblichen Probanden eine signifikante Reduktion der PDL-Breite in Folge zunehmenden Alters in allen drei Ebenen festzustellen ist (Tabelle 55), zeigt sich bei den männlichen Probanden lediglich in der zervikalen Messebene eine signifikante Reduktion der PDL-Breite. In den Messebenen -Mitte- und -Apikal- hingegen ist ein nichtlineares, statistisch nicht signifikantes Verhalten des PDLs zu beobachten (Tabelle 56).

Tabelle 55: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [34+44+35+45] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

Zahnpaarung [34+44+35+45] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	16	261	18	252	44	247	0,0171	0,0687	< 0,0001
-Mitte-	16	220	19	209	46	212	0,0106	0,2902	0,0426
-Apikal-	16	267	20	259	48	253	0,1755	0,1000	0,0025

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Tabelle 56: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [34+44+35+45] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [34+44+35+45] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	4	258	16	248	4	240	0,0119	0,0119	0,0003
-Mitte-	4	215	15	209	4	213	0,0356	0,3360	0,3251
-Apikal-	4	278	15	248	4	255	0,0359	0,3369	0,3260

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Die Unterschiede in den Messwerten infolge der unterschiedlichen Geschlechtszugehörigkeit sind in den drei horizontalen Messebenen -Zervikal-, -Mitte- und -Apikal- nicht signifikant ausgeprägt (Tabelle 57).

Tabelle 57: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [34+44+35+45] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [34+44+35+45] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	70	251	24	248	0,3512
-Mitte-	73	213	23	211	0,3978
-Apikal-	76	257	23	255	0,2344

a = Mann-Whitney-U-Test

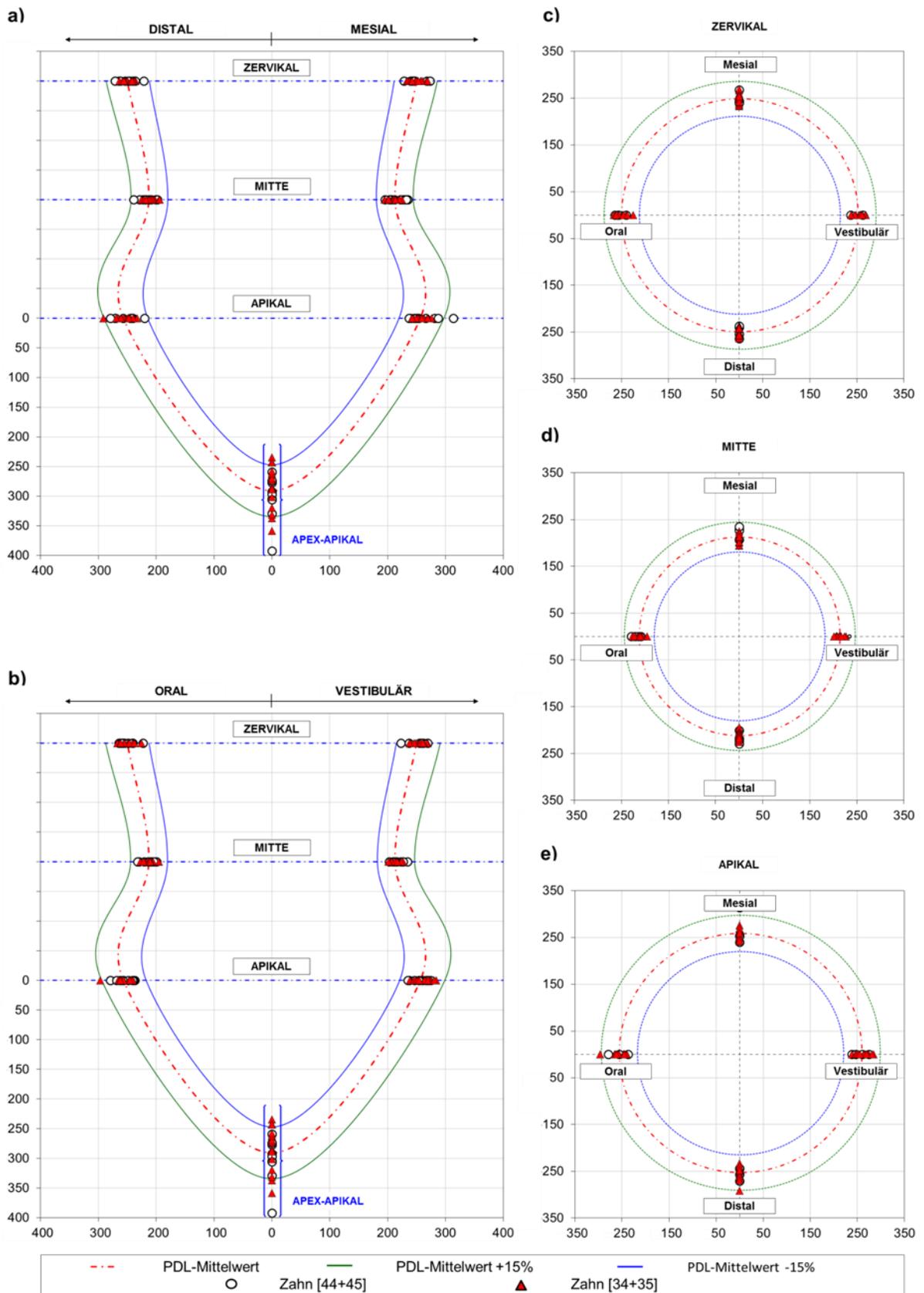


Abbildung 27: Breite des PDLs (in µm) der Zähne [34+44+35+45], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

5.4 Molaren

Die Zahngruppe der Molaren umfasst im Oberkiefer die Zähne 16 und 17 der ersten Quadranten und 26, 27 des zweiten Quadranten. Im Unterkiefer besteht sie aus den Zähnen 36, 37, 46 und 47.

Zahngruppe [16+26+17+27]

Aus dem Bereich der Molaren-Zahngruppe [16+26+17+27] wurden im Verlauf von 590 Messungen insgesamt 21 Zähne vermessen, wobei sich die Gruppe der untersuchten Zähne aus sechs Zähnen des Zahntyps [16], vier Zähnen des Zahntyps [17], fünf Zähnen des Zahntyps [26] sowie sechs Zähnen des Zahntyps [27], zusammensetzte. Eine detaillierte Aufschlüsselung der durchgeführten Messungen und der errechneten PDL-Mittelwerte, hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der jeweils gewählten Messposition, Messebene, Probandengruppe und Altersklasse zeigt Tabelle 58. Wie aus der Tabelle 58 zu ersehen ist, unterscheiden sich die errechneten PDL-Mittelwerte der übergeordneten Zahngruppe [16+26+17+27] in den Messebenen -Zervikal- (263 µm), -Mitte- (228 µm) und -Apikal- (268 µm) nur sehr geringfügig (<2 % von den jeweils in Tabelle 59 präsentierten arithmetischen PDL-Mittelwerten der Zahnpaare [16+26] und [17+27]).

Tabelle 58: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [16+26+17+27] in den Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal-, -Furk- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [16+26+17+27]														
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-			-Furk-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	2	8	271	5	23	223	7	22	264	10	6	317	58	2	372	64
	AK2	2	8	266	15	23	233	6	18	270	21	3	332	32	2	291	66
	AK3	2	8	265	14	24	230	15	23	274	20	6	330	31	2	347	28
	Gesamt	6	24	267	12	70	229	11	63	269	18	15	325	42	6	337	57
Frauen	AK1	3	11	274	8	33	232	10	27	272	14	6	313	40	2	356	58
	AK2	12	48	259	10	125	227	7	118	267	20	31	315	47	11	358	61
	AK3																
	Gesamt	15	59	261	11	158	228	8	145	267	19	37	315	45	13	357	58
Gesamt	AK1	5	19	273	7	56	229	10	49	268	13	12	315	47	4	364	51
	AK2	14	56	260	11	148	228	7	136	267	20	34	317	45	13	348	64
	AK3	2	8	265	14	24	230	15	23	274	20	6	330	31	2	347	28
	Gesamt	21	83	263	11	228	228	9	208	268	18	52	318	44	19	351	57

Tabelle 59: Gegenüberstellung der mittleren PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zahnpaarungen [16+26] und [17+27] in den Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal-, -Furk- (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [16+26]										PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [17+27]										
		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		-Apex-Ap.-		-Furk-		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		-Apex-Ap.-		-Furk-		
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	
Männer	AK1	273	4	226	5	268	11	298	36	417	269	6	220	7	260	8	335	77	326			
	AK2	270	20	230	5	277	24	332	32	245	261	7	235	7	258	5			338			
	AK3	257	7	220	6	275	27	320	28	327	274	14	241	14	273	11	341	37	367			
	Gesamt	267	13	226	7	273	22	317	32	330	268	11	232	13	265	11	338	54	344	21		
Frauen	AK1	272	9	231	8	268	10	303	43	315	277	3	235	13	280	17	332	40	396			
	AK2	255	9	226	7	266	16	315	61	329	262	10	228	7	267	23	315	32	382	66		
	AK3																					
	Gesamt	259	11	227	8	267	14	312	57	327	264	11	229	8	268	22	317	32	384	60		
Gesamt	AK1	272	7	229	7	268	10	301	37	366	273	6	228	13	268	16	334	58	361	50		
	AK2	258	12	227	7	268	18	318	57	315	262	9	229	7	266	22	315	32	376	62		
	AK3	257	7	220	6	275	27	320	28	327	274	14	241	14	273	11	341	37	367			
	Gesamt	261	12	227	7	269	17	314	49	328	265	11	230	10	267	20	322	38	372	54		

Aufgrund dieser Messergebnisse kann u. a. auch statistisch der Nachweis erbracht werden, dass die vier Oberkiefer-Molaren im Rahmen der weiteren Betrachtungen zu einer gemeinsamen Zahngruppe zusammengefasst werden können (Tabelle 60)

Tabelle 60: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [16+26], [17+27] und der Zahngruppe [16+26+17+27] (N, Anzahl Messungen; MW Mittelwert; S, Signifikanz)

Zahnpaarung / Zahnebene	Mittlere PDL-Breite [µm]									Signifikanzen ^b	
	[16+26]			[17+27]			[16+26+17+27]			MW _A vs MW _C	MW _B vs MW _C
	N	MW _A	S ^a	N	MW _B	S ^a	N	MW _C	S ^a		
-Zervikal-	43	261	0,7826	40	265	0,5794	83	263	0,6315	0,2951	0,2720
-Mitte-	113	227	0,3379	115	230	0,9704	228	228	0,7474	0,2008	0,2060
-Apikal-	108	269	0,2809	100	267	0,4106	208	268	0,2867	0,4797	0,4569

a = Kruskal-Wallis / b = Kruskal-Wallis Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Was die Formgebung des PDLs entlang der Wurzellängsachse angeht, so zeigt sich auch bei den OK-Molaren eine statistisch signifikante Reduktion des PDLs von ca. 35-40 µm im Bereich der Messebene -Mitte- (Abbildung 28, Tabelle 61).

Tabelle 61: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [16+26+17+27] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [µm]	
ZAHN [16+26+17+27] Zervikal-Mitte	83 / 228	263 / 228	< 0,0001
ZAHN [16+26+17+27] Mitte-Apikal	228 / 208	228 / 268	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

In den drei horizontalen Messebenen ist jeweils ein auf den Koordinatenursprung bezogenes, radialsymmetrisches Verhalten des PDLs zu beobachten. Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten sind in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [16+26+17+27] statistisch nicht signifikant ($83 < N < 228$; $0,2867 < \text{Signifikanz}^a < 0,7474$) (Tabelle 60, Zahnpaarung [16+26+17+27]).

Bezüglich der Messwertstreuung ist anzumerken, dass sich mit Ausnahme der Werte für Apex-Apikal (79 %) nahezu 100 % aller in den horizontalen Ebenen gemessenen Messpunkte in dem für sie jeweils relevanten Streuband von ± 15 % und ~ 95 % der Werte in einem relevanten Streubereich von ca. ± 10 % des arithmetischen Ebenenmittelwertes bewegen.

Ein Einfluss des Lebensalters auf die Größe des PDLs kann aufgrund der Konstellation der zur Verfügung stehenden Daten nicht eindeutig festgestellt werden. Grund hierfür ist zum einen der Umstand, dass bei den weiblichen Patienten in der Altersklasse 3 keine Aufnahmen zur Verfügung standen (Tabelle 62), und zum anderen, dass bei den PDL-Daten der männlichen Patienten weder ein eindeutiges, noch lineares und signifikantes Verhalten in Abhängigkeit vom Alter zu beobachten ist (Tabelle 63).

Tabelle 62: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [16+26+17+27] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [16+26+17+27] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	11	274	48	259	0	-	< 0,0001	-	-
-Mitte-	33	232	125	227	0	-	0,0035	-	-
-Apikal-	27	272	118	267	0	-	0,0210	-	-

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,05)

Tabelle 63: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [16+26+17+27] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [16+26+17+27] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	8	271	8	266	8	265	0,1072	0,9424	0,1224
-Mitte-	23	223	23	233	24	230	0,0001	0,0745	0,0209
-Apikal-	22	264	18	270	23	274	0,6459	0,0846	0,0225

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Ein statistisch signifikanter Einfluss der Geschlechtszugehörigkeit auf die Größe des PDLs ist nicht festzustellen (Tabelle 64).

Tabelle 64: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [16+17+26+27] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [16+26+17+27] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	59	261	24	267	0,0668
-Mitte-	158	228	70	229	0,9445
-Apikal-	145	267	63	269	0,3135

a = Mann-Whitney-U-Test

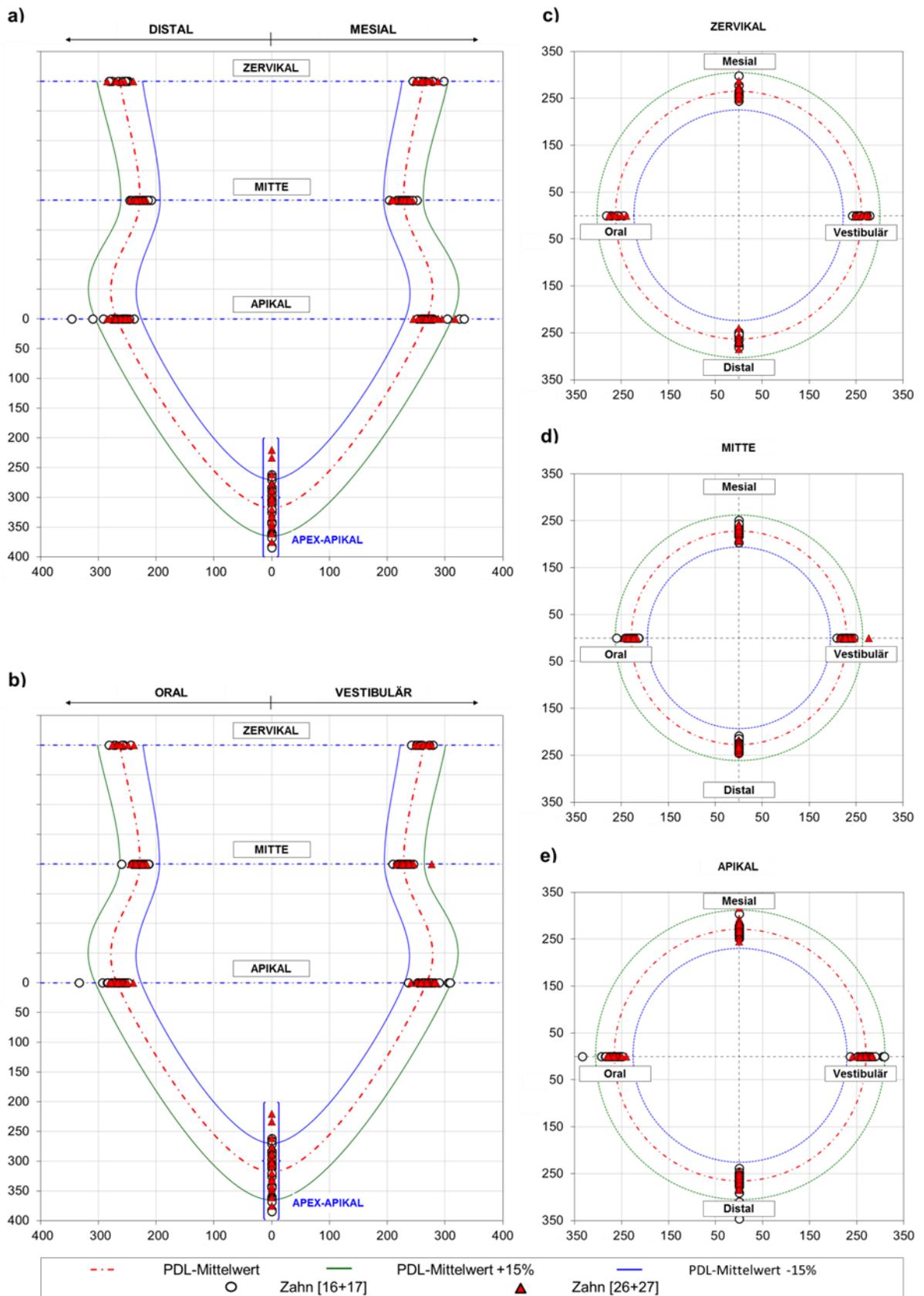


Abbildung 28: Breite des PDLs (in μm) der Zähne [16+26+17+27], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

Zahngruppe [36+46+37+47]

Für die Vermessung der Molaren Zahngruppe [36+46+37+47] standen der Studie insgesamt neun DVT-Aufnahmen zur Verfügung. Darunter fielen jeweils eine Aufnahme auf die Zähne [46] und [47], drei Aufnahmen auf den Zahn [36] sowie vier Aufnahmen auf den Zahn [37]. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Messreihe 200 Messungen durchgeführt. Eine Übersicht der durchgeführten Messungen und der berechneten arithmetischen PDL-Mittelwerte in Abhängigkeit von Messposition/Messebene der patientenspezifischen Parameter wie Lebensalter und Geschlecht findet sich in Tabelle 65. Wie aus Tabelle 65, bzw. Tabelle 66 zu ersehen ist, unterscheiden sich die errechneten PDL-Mittelwerte der übergeordneten Zahngruppe [36+46+37+47] in den Messebenen -Zervikal- (254 µm), -Mitte- (212 µm) und -Apikal- (256 µm) nur sehr geringfügig (<2 % von den jeweils in Tabelle 66 präsentierten arithmetischen PDL-Mittelwerten der Zahnpaarungen [36+46] und [37+47]).

Tabelle 65: Geschlechtsspezifische mittlere PDL-Breiten und deren Standardabweichungen an den Zähnen [36+46+37+47] in den Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal-, -Furk- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	Zähne Anzahl	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [36+46+37+47]														
			-Zervikal-			-Mitte-			-Apikal-			-Apex-Apikal-			-Furk-		
			N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD	N	MW	SD
Männer	AK1	1	3	265	11	8	211	5	8	260	15	2	255	10	1	343	
	AK2	3	11	252	6	24	219	7	23	256	11	6	288	44	3	347	13
	AK3																
	Gesamt	4	14	255	9	32	217	7	31	257	12	8	280	41	4	346	11
Frauen	AK1																
	AK2	3	11	250	7	24	204	6	22	256	10	6	280	34	3	279	40
	AK3	2	8	256	5	15	214	5	16	254	12	4	271	36	2	332	150
	Gesamt	5	19	253	6	39	208	7	38	255	11	10	277	33	5	300	85
Gesamt	AK1	1	3	265	11	8	211	5	8	260	15	2	255	10	1	343	
	AK2	6	22	251	6	48	212	10	45	256	10	12	284	38	6	313	46
	AK3	2	8	256	5	15	214	5	16	254	12	4	271	36	2	332	150
	Gesamt	9	33	254	7	71	212	9	69	256	11	18	278	35	9	320	65

Tabelle 66: Gegenüberstellung der mittleren PDL-Breiten (MW) und deren Standardabweichungen (SD) an den Zahnpaarungen [36+46] und [37+47] in den Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, und -Apex-Apikal-, -Furk- (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD Standardabweichung)

Geschlecht	Alters- klasse	PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [36+46]										PDL-Breite [µm] der Zahnpaarung [37+47]									
		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		-Apex-Ap.-		-Furk-		-Zervikal-		-Mitte-		-Apikal-		-Apex-Ap.-		-Furk-	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Männer	AK1	265	11	211	5	260	15	255	10	343											
	AK2	249	5	213	5	254	12	251	15	350	254	5	223	4	257	10	307	42	345	17	
	AK3																				
	Gesamt	256	12	212	5	257	13	253	10	347	5	254	5	223	4	257	10	307	42	345	17
Frauen	AK1																				
	AK2	256	8	202	5	251	7	268	3	248	247	3	206	6	258	10	286	42	294	43	
	AK3	256	6	212	6	252	14	247	11	227	255	3	217	3	257	12	295	37	438		
	Gesamt	256	6	207	7	251	11	257	14	238	15	250	5	209	7	258	10	289	37	342	89
Gesamt	AK1	265	11	211	5	260	15	255	10	343											
	AK2	252	7	207	7	252	10	259	13	299	72	250	5	214	10	258	10	296	40	319	40
	AK3	256	6	212	6	252	14	247	11	227	255	3	217	3	257	12	295	37	438		
	Gesamt	256	9	209	7	254	12	255	12	292	64	252	5	215	9	258	10	296	38	343	63

Wie schon bei den OK-Molaren kann auch bei den UK-Molaren aufgrund der gewonnenen Messergebnisse und der geringen Abweichungen zwischen den korrespondierenden PDL-Messdaten der untergeordneten Zahnpaarungen [36+46] und [37+47] statistisch der Nachweis erbracht werden, dass beide Zahnpaare im Rahmen der weiteren Betrachtungen übergeordnet in einer gemeinsamen Zahngruppe zusammengefasst werden können (Tabelle 67).

Tabelle 67: Berechnete Signifikanzen der Zahnebenen -Zervikal-, -Mesial-, -Apikal- der Zähne [36+46], [37+47] und der Zahngruppe [36+46+372+47] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; S, Signifikanz)

Zahnpaarung / Zahnebene	Mittlere PDL-Breite [µm]									Signifikanzen ^b	
	[36+46]			[37+47]			[36+46+37+47]			MW _A vs MW _C	MW _B vs MW _C
	N	MW _A	S ^a	N	MW _B	S ^a	N	MW _C	S ^a		
-Zervikal-	15	256	0,8446	18	252	0,2728	33	254	0,4531	0,3053	0,3635
-Mitte-	31	209	0,3565	40	215	0,9996	71	212	0,9963	0,1005	0,1651
-Apikal-	32	254	0,7114	37	258	0,8189	69	256	0,0802	0,4404	0,4836

a = Kruskal-Wallis / b = Kruskal-Wallis Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,0167)

Hinsichtlich der Ausprägung der PDL-Breite entlang der Zahnwurzel zeigt sich auch bei den UK-Molaren eine signifikante Einschnürung im Bereich des Widerstandszentrums des Zahnes und der damit verbundenen sanduhrförmigen Charakteristik des PDLs (Tabelle 68).

Tabelle 68: Berechnete Signifikanzen der Einschnürung der PDL-Breite für die Zahnebenen Zervikal-Mitte, Mitte-Apikal der Zahnpaarung [36+46+37+47] (MW, Mittelwert)

Zahnpaarung / -ebene	Messungen	PDL-Breite	Signifikanz ^a
	N1 / N2	MW [μm]	
ZAHN [36+46+37+47] Zervikal-Mitte	33 / 71	254 / 212	< 0,0001
ZAHN [36+46+37+47] Mitte-Apikal	71 / 69	212 / 256	< 0,0001

a = Mann-Whitney-U-Test

Es zeigt sich auch bei den Zähnen der Zahngruppe [36+46+37+47] eine deutlich ausgeprägte Einschnürung des PDLs im Bereich des Widerstandszentrums des Zahnes (Messebene -Mitte-). Der für diesen Bereich berechnete arithmetische Mittelwert des PDLs liegt mit einem Zahlenwert von ca. 212 μm deutlich (42-44 μm) unterhalb der Zahlenwerte, die für die Zervikal- (254 μm), bzw. Apikal-Ebene (256 μm) berechnet wurden (Abbildung 29).

Was die Formgebung des PDLs entlang des Wurzelumfanges angeht, so zeigen die Polar-diagramme der drei horizontalen Messebenen deutlich ein auf den Koordinatenursprung bezogenes, radialsymmetrisches Verhalten der PDL-Mittelwerte (Abbildung 29). Die festgestellten Abweichungen zwischen den korrespondierenden Messdaten waren in allen horizontalen Messebenen der Zahnpaarung [36+46+37+47] statistisch nicht signifikant ($33 < N < 71$; $0,0802 < \text{Signifikanz}^a < 0,9963$) (Tabelle 67, Zahnpaarung [36+46+37+47]). Bezüglich der Messwertstreuung ist anzumerken, dass sich mit Ausnahme der Werte für Apex-Apikal (83 %) nahezu 100 % aller in den horizontalen Ebenen gemessenen Messpunkte in dem für sie jeweils relevanten Streuband von ± 15 % des arithmetischen Ebenenmittelwertes bewegen. Für eine Mindestmesswertabdeckung von 95 % würde sich im Mittel der Streubereich für die drei horizontalen Messebenen auf ca. ± 8 % reduzieren.

Ein signifikanter Einfluss des Lebensalters auf die PDL-Breite ist sowohl bei den weiblichen Probanden (siehe Tabelle 69), als auch bei den männlichen Probanden zu beobachten (siehe Tabelle 70)

Tabelle 69: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [36+46+37+47] der weiblichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [36+46+37+47] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	0	-	11	250	8	256	-	0,0620	-
-Mitte-	0	-	24	204	15	214	-	< 0,0001	-
-Apikal-	0	-	22	256	16	254	-	0,8527	-

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,05)

Tabelle 70: Einfluss (Signifikanz) des Alters auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [36+46+37+47] der männlichen Probanden (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [36+46+37+47] Zahnebene	PDL-Breite [µm]						Signifikanzen ^a		
	AK1		AK2		AK3		AK1-AK2	AK2-AK3	AK1-AK3
	N	MW	N	MW	N	MW			
-Zervikal-	3	265	11	252	0	-	0,0363	-	-
-Mitte-	8	211	24	219	0	-	0,0089	-	-
-Apikal-	8	260	23	256	0	-	0,6649	-	-

a = Kruskal-Wallis / Post-hoc-Test (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau: 0,05)

In Bezug auf die Abhängigkeit der PDL-Breite vom Geschlecht der untersuchten Probanden zeigt sich in der Ebene -Mitte- ein statistisch signifikanter Unterschied in der Größe der gemessenen PDL-Breiten (Tabelle 71).

Tabelle 71: Einfluss des Geschlechts (Signifikanz) auf die Größe der PDL-Breite der Zahnpaarung [36+46+37+47] (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

ZAHN [36+46+37+47] Zahnebene	PDL-Breite [µm]				Signifikanz ^a
	Frauen		Männer		
	N	MW	N	MW	
-Zervikal-	19	253	14	255	0,4773
-Mitte-	39	208	32	217	< 0,0001
-Apikal-	38	255	31	257	0,4729

a = Mann-Whitney-U-Test

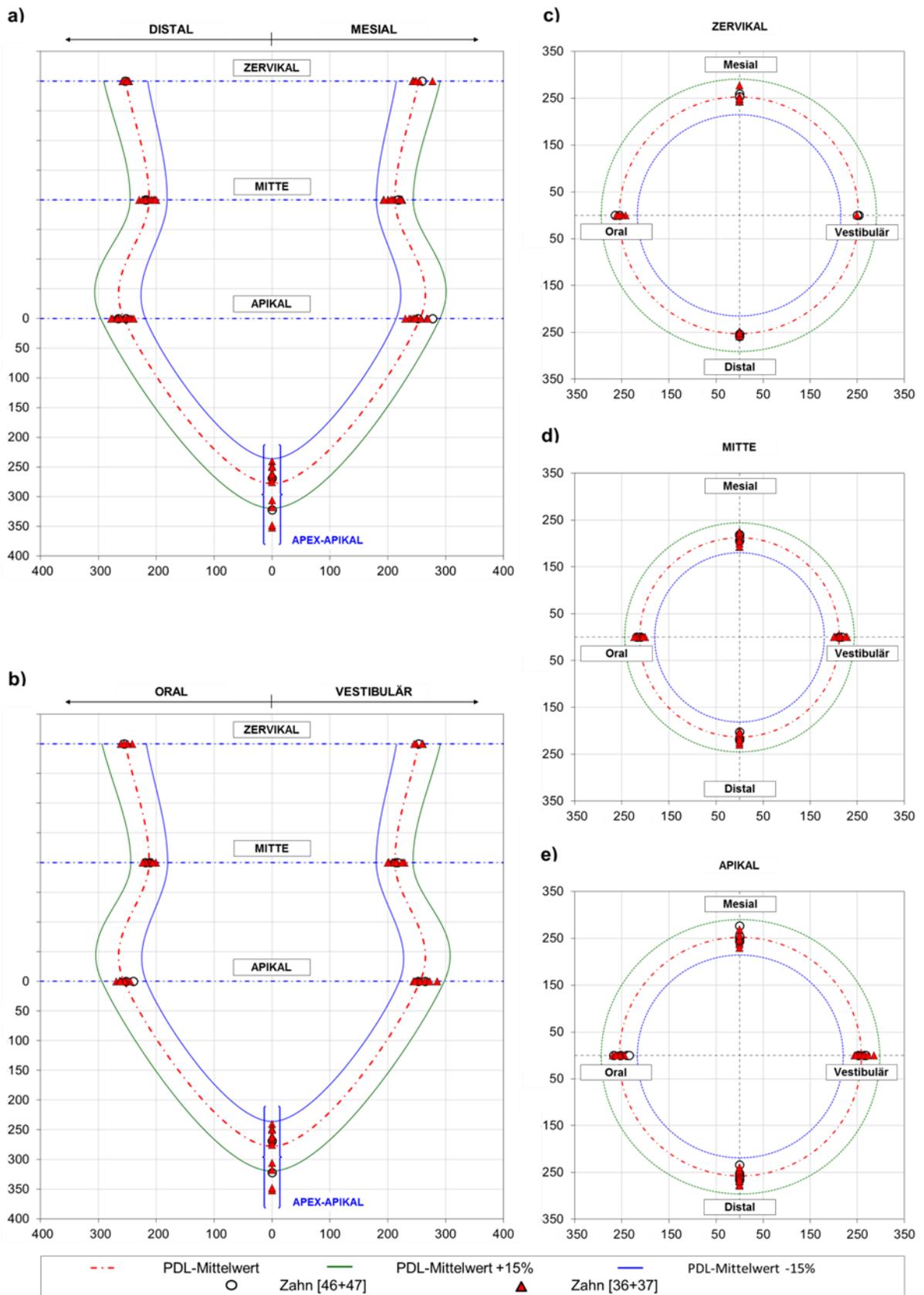


Abbildung 29: Breite des PDLs (in µm) der Zähne [36+46+37+47], dargestellt im Sanduhrdiagramm für die Ebenen a) mesio-distal und b) oro-vestibulär sowie im Polardiagramm für die Messebenen c) -Zervikal-, d) -Mitte- und e) -Apikal-

5.5 Betrachtung des PDLs in Abhängigkeit unterschiedlicher Kriterien

Das folgende Kapitel erläutert die Abhängigkeit der Breite des PDLs in Abhängigkeit von Lebensalter, Geschlecht, Zahngruppe sowie dem Vergleich der PDL-Breite von OK zu UK.

5.5.1 PDL-Breite in Relation zum Lebensalter der Patienten

Bei einer Betrachtung der PDL-Breite aller Patienten über die Altersklassen hinweg lassen sich nur sehr geringe, zum Teil gegenläufige Tendenzen feststellen (Tabelle 72, Abbildung 30). Während im Oberkiefer bei den Zahngruppen der Prämolaren, Inzisivi [11+21] und Inzisivi [12+22] eine geringfügige, nichtlineare Verkleinerung des PDLs mit zunehmendem Lebensalter zu beobachten ist (größte Differenz zwischen AK 1 und AK3 von max. 8 μm), kann im Gegensatz hierzu bei der Zahngruppe der Oberkiefer-Molaren und der Canini nur eine sehr geringe, nahezu vernachlässigbare Zunahme des PDLs mit zunehmendem Lebensalter festgestellt werden (max. 3 μm). Im Vergleich zu den Zahngruppen des Oberkiefers ist bei den Zahngruppen des Unterkiefers, mit Ausnahme der Molaren, durchwegs eine Verkleinerung des PDLs in der Größenordnung von 11 μm bis zu 14 μm mit fortschreitendem Lebensalter zu beobachten (Abbildung 30).

Tabelle 72: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und deren Standardabweichungen der Zahngruppen des OK und UK in Abhängigkeit der Altersklasse (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Untersuchte Zahngruppen	Anzahl PDL-Messung	PDL-Breite [μm]															
		(mesial, distal, oral, vestibulär)						(incl. apex apikal, furk)									
		AK(Gesamt)		AK1		AK2		AK3		AK(Gesamt)		AK1		AK2		AK3	
MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD		
Molaren OK :	590	250	24	251	23	249	23	254	27	259	38	260	37	258	38	264	38
Prämolaren OK :	521	250	25	254	25	245	23	248	28	255	34	259	33	252	34	255	38
Canini OK :	444	250	25	251	25	249	25	251	24	255	31	257	32	253	30	257	31
Inzisivi [11+21]	252	249	25	253	25	241	25	246	24	254	34	260	38	242	27	250	29
Inzisivi [12+22]	347	244	25	246	26	240	23	244	23	250	35	252	38	244	27	249	33
Molaren UK :	200	238	23	240	28	237	23	239	22	245	34	246	34	244	33	246	38
Prämolaren UK :	314	240	23	250	26	238	23	237	21	244	28	254	32	243	30	241	27
Canini UK :	233	241	24	248	22	245	26	237	23	245	29	254	31	248	29	241	27
Inzisivi UK :	247	232	25	243	24	240	22	229	25	238	33	248	29	245	29	234	33

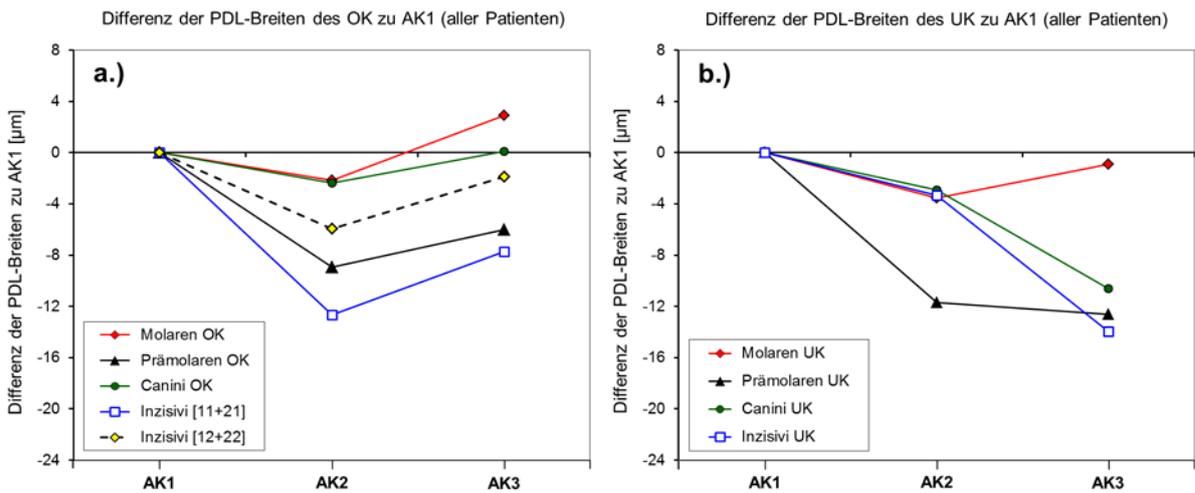


Abbildung 30: PDL-Breite in Abhängigkeit des Lebensalters der weiblichen- und männlichen Patienten a) im OK und b) im UK

Unterteilt man die PDL-Messwerte jeweils noch in die Untergruppen der männlichen und weiblichen Patienten, so zeigt sich, dass bei den weiblichen Probanden die Tendenz zur Verkleinerung des PDLs bei allen Zahngruppen sowohl im UK als auch im OK deutlich ausgeprägter ist als bei den männlichen Probanden (Abbildung 31).

Die größten Veränderungen/Reduktionen des PDLs infolge des höheren Lebensalters weisen die am weiblichen Unterkiefer vermessenen Inzisivi auf. Hier beträgt der Rückgang des PDLs bei Zunahme des Alters von AK1 zu AK3 ca. 19 μm . Bei Vergleich der am OK und UK durchgeführten Messungen ist zu erkennen, dass im UK diese Tendenz etwas deutlicher ausgeprägt ist als im OK (Tabelle 73).

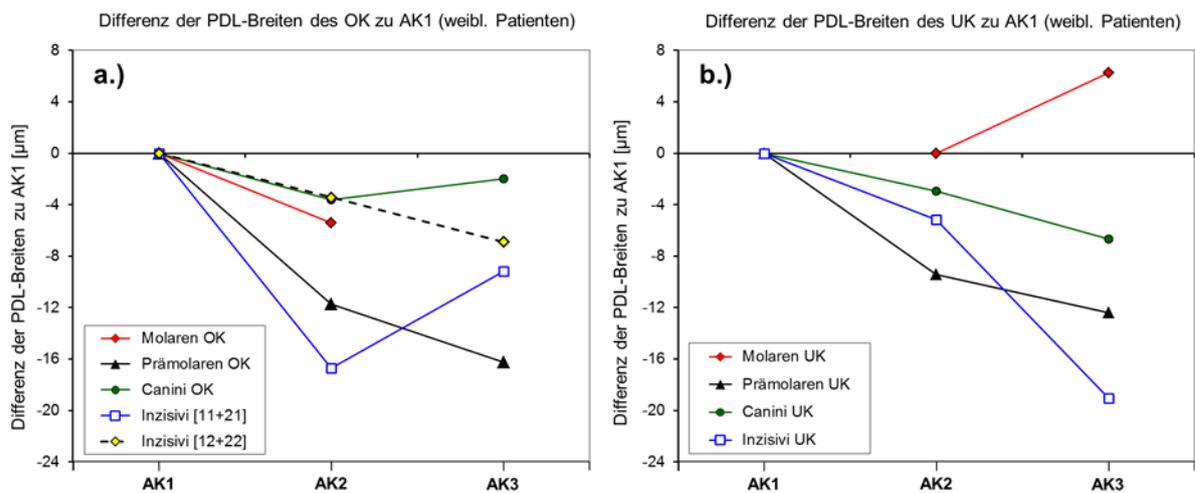


Abbildung 31: PDL-Breite in Abhängigkeit des Lebensalters der weiblichen Patienten a) im OK und b) im UK

Tabelle 73: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und deren Standardabweichungen der Zahngruppen des OK und UK in Abhängigkeit der Altersklasse der weiblichen Patienten (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Untersuchte Zahngruppen	Anzahl PDL-Messung	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)						PDL-Breite [μm] (incl. apex apikal, furk)									
		AK(Gesamt)		AK1		AK2		AK3		AK(Gesamt)		AK1		AK2		AK3	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Molaren OK:	412	249	23	254	23	248	23			259	38	261	33	258	39		
Prämolaren OK:	271	249	25	256	26	244	22	240	25	254	31	261	32	249	29	242	26
Canini OK:	274	251	25	252	25	249	26	250	25	256	32	258	34	253	30	255	30
Inzisivi [11+21]	137	250	26	256	27	239	26	247	20	256	37	263	41	241	28	254	32
Inzisivi [12+22]	204	244	26	246	28	243	23	239	22	251	38	254	42	248	29	243	31
Molaren UK:	111	236	24			233	26	239	22	242	34			239	31	246	38
Prämolaren UK:	238	241	23	250	25	240	25	237	22	244	28	254	32	245	31	241	26
Canini UK:	152	241	24	246	23	243	25	239	23	245	28	251	30	246	27	243	27
Inzisivi UK:	135	229	26	243	24	238	22	224	26	233	30	248	29	241	24	227	28

Bei den männlichen Probanden ist hingegen keine Gesetzmäßigkeit in Abhängigkeit des Alters festzustellen (siehe Abbildung 32). Hier nimmt zum Teil der PDL über das Alter hinweg auch wieder zu. Am deutlichsten zeigt sich dies mit einer Zunahme des PDLs von bis zu 7 μm bei der Zahngruppe der OK-Molaren (Tabelle 74).

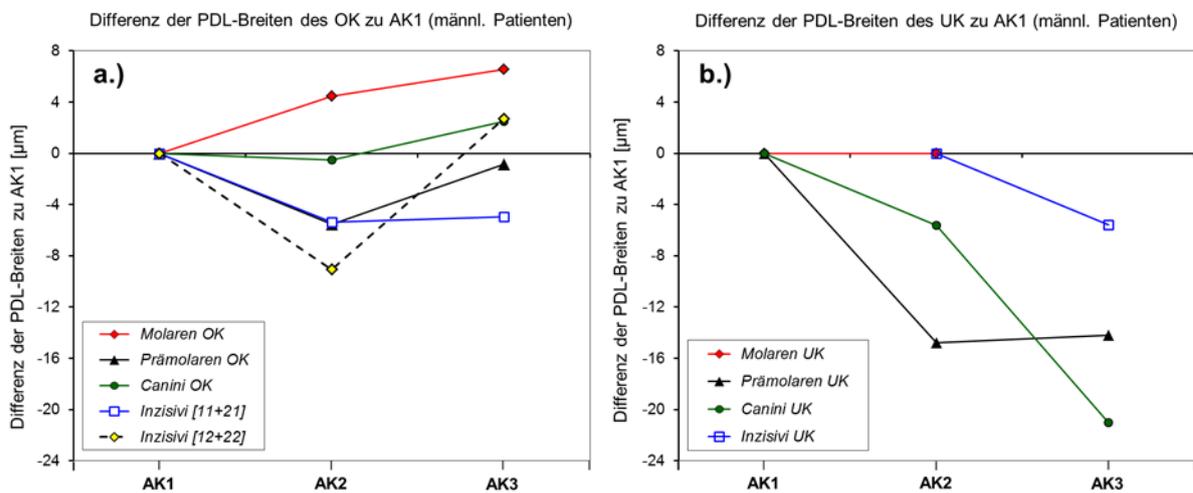


Abbildung 32: PDL-Breite in Abhängigkeit des Lebensalters der männlichen Patienten a) im OK und b) im UK

Tabelle 74: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und deren Standardabweichungen der Zahngruppen des OK und UK in Abhängigkeit der Altersklasse der männlichen Patienten (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Untersuchte Zahngruppen	Anzahl PDL-Messung	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)						PDL-Breite [μm] (incl. apex apikal, furk)									
		AK(Gesamt)		AK1		AK2		AK3		AK(Gesamt)		AK1		AK2		AK3	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Molaren OK :	178	251	24	247	23	252	23	254	27	260	37	258	41	258	32	264	38
Prämolaren OK :	250	250	25	252	24	247	23	252	29	257	38	258	35	255	40	260	41
Canini OK :	170	250	23	249	24	249	22	252	24	255	30	254	29	253	29	259	32
Inzisivi [11+21] :	115	247	24	250	23	245	24	245	26	252	30	257	33	245	23	248	28
Inzisivi [12+22] :	143	244	24	245	24	236	22	248	24	247	30	249	30	239	23	254	35
Molaren UK :	89	240	22	240	28	240	19			248	33	246	34	249	33		
Prämolaren UK :	76	238	22	250	31	235	20	236	20	243	30	251	29	241	28	245	39
Canini UK :	81	240	25	253	22	247	28	232	22	245	32	261	34	252	33	237	28
Inzisivi UK :	112	237	23			241	22	235	23	244	35			248	32	243	37

5.5.2 PDL-Breite im Vergleich OK zu UK

Vergleicht man übergeordnet die jeweils aus den Messwerten der fünf Zahngruppen berechneten PDL-Mittelwerte des OK- und UK miteinander, so ist festzustellen, dass im Vergleich zum UK der mittlere PDL im OK über alle Messebenen hinweg, d. h. sowohl in den drei horizontalen, als auch in der vertikalen Zahnebene deutlich stärker ausgeprägt ist (Tabelle 75). Gleiches gilt auch für den Fall, dass lediglich die Daten der horizontalen Messebenen (-Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-) berücksichtigt werden. Im Vergleich der Mittelwerte von Ober- und Unterkiefer beträgt die mittlere PDL-Differenz zwischen OK und UK ca. 11 μm . Die größte Differenz ist in diesem Zusammenhang bei der Zahngruppe der Inzisivi [11+21], festzustellen, bei der die Abweichung ca. 21 μm beträgt. Bei Analyse der Messergebnisse unter dem Aspekt des Einflusses des Lebensalters der Probanden auf die Größe des PDLs von OK- und UK, ist tendenziell festzustellen, dass sich mit zunehmendem Alter die Differenz zwischen den gemessenen PDL-Werten von OK zu UK ebenfalls vergrößert. Während der in der Altersklasse AK1 am OK berechnete Mittelwert um ca. 4 μm über dem Wert des UK liegt, beträgt die Differenz zum UK in der AK3 bereits 14 μm (Tabelle 75).

Tabelle 75: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und deren Standardabweichungen des OK und UK in Abhängigkeit der Altersklasse (incl. der zweiwurzeligen Prämolaren) (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Untersuchte Zahngruppen	Anzahl PDL-Messungen	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)								PDL-Breite [μm] (apex-apikal, furk)							
		AK(Ges.)		AK1		AK2		AK3		AK(Ges.)		AK1		AK2		AK3	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Oberkiefer	2258	248	26	251	26	246	25	249	26	322	58	325	62	320	58	323	42
Unterkiefer	994	238	24	247	25	239	23	235	23	293	43	303	43	295	38	290	45

Bei individueller Betrachtung der drei Zahngruppen des OK und ihrer jeweiligen Antagonisten im UK erweisen sich die Unterschiede in der PDL-Breite von OK und UK der horizontalen Messebenen in allen Fällen durchwegs als signifikant ($p < 0.0001$). Hierbei ist anzumerken, dass die Position der Messebene mit der größten Abweichung von Zahngruppe zu Zahngruppe variiert (Tabelle 76).

Bei der Zahngruppe der **Molaren** zeigt sich die größte Differenz in den Mittelwerten der PDL-Breite von OK und UK in der Messebene -Mitte-. Die mittlere PDL-Breite des OK liegt hierbei um ca. $16 \mu\text{m}$ (7 %) über dem Mittelwert des UK. Unter Einbeziehung der Messwerte aus allen drei Ebenen verringert sich der Unterschied in der PDL-Breite des OK und UK auf ca. $12 \mu\text{m}$ (4,9 %). Bei der Zahngruppe der **Prämolaren** befindet sich die Ebene des größten Unterschiedes zwischen OK und UK in der Messebene -Apikal-. Die Differenz beträgt hierbei ca. $12 \mu\text{m}$ (4,3 %). Unter Einbeziehung der Messergebnisse aus allen drei Ebenen reduziert sich diese Differenz wiederum geringfügig auf $10 \mu\text{m}$ (3,9 %).

Auch bei der Zahngruppe der **Canini** ist festzustellen, dass die PDL-Breite im OK größer ist als im UK. Hier befindet sich die größte Abweichung mit ca. $14 \mu\text{m}$ (5,2 %) in der Zervikal-Ebene.

Zu Beginn der Ergebnisbetrachtungen der Inzisivi-Zahngruppen muss nochmals daran erinnert werden, dass aufgrund der anatomischen Unterschiede zwischen den Zähnen [11+21] und [12+22] zwei getrennte Zahnpaarungen gebildet werden mussten. Bei der Gegenüberstellung der Messdaten des OK und UK wurde daher getrennt voneinander jeweils nur eine Zahnpaarung des OK mit der aus vier Zähnen bestehenden Zahngruppe des UK ins Verhältnis gesetzt. Für die Zahnpaarung **Inzisivi [11+21]** zeigt sich die größte Differenz in der PDL-Breite zwischen OK und UK mit einem Wert von ca. $21 \mu\text{m}$ (8,1 %) in der Zervikal-Messebene.

Unter Einbeziehung der Messdaten aus allen drei Ebenen ergibt sich eine reduzierte Differenz von ca. $16 \mu\text{m}$ (6,5 %). Was die Zahnpaarung **Inzisivi [12+22]** angeht, so ist die größte

PDL-Differenz zwischen OK und UK mit einem Wert von ca. 13 μm (5 %) ebenfalls in der Zervikal-Messebene zu beobachten. Unter Einbeziehung der Messdaten aus allen drei Messebenen verringert sich die Differenz zwischen OK und UK nur marginal auf ca. 12 μm (4,8 %). Eine detaillierte Gegenüberstellung der Zähne des OK und UK aller vermessenen Patienten ist in den Tabellen 88/1 und 88/2 im Anhang aufgeführt.

Tabelle 76: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und Standardabweichungen der horizontalen Messebenen des OK und UK (excl. der zweiwurzeligen Prämolaren) (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Untersuchte Zahngruppen	Zahn-messebene	Oberkiefer			Unterkiefer			Differenz [OK-UK] [μm]	OK zu UK
		Anzahl Mess.	MW [μm]	SD [μm]	Anzahl Mess.	MW [μm]	SD [μm]		Signifikanz ^a
Molaren:	-Zervikal-	83	263	11	33	254	7	9	< 0,0001
	-Mitte-	228	228	9	71	212	9	16	< 0,0001
	-Apikal-	208	268	18	69	256	11	12	< 0,0001
Prämolaren:	-Zervikal-	160	259	11	94	250	12	9	< 0,0001
	-Mitte-	163	223	11	96	213	10	10	< 0,0001
	-Apikal-	157	268	22	99	257	16	12	< 0,0001
Canini:	-Zervikal-	132	261	13	72	248	9	14	< 0,0001
	-Mitte-	135	223	13	66	212	11	11	< 0,0001
	-Apikal-	141	266	20	76	259	19	7	0,0023
Inzisivi: (*) [11+21]	-Zervikal-	77	257	11	68	236	14	21	< 0,0001
	-Mitte-	80	222	12	71	205	12	17	< 0,0001
	-Apikal-	75	268	22	87	252	19	16	< 0,0001
Inzisivi: (*) [12+22]	-Zervikal-	112	250	13	68	236	14	13	< 0,0001
	-Mitte-	99	216	15	71	205	12	11	< 0,0001
	-Apikal-	109	264	18	87	252	19	12	< 0,0001

(*) Bei den PDL-Werten der Unterkiefer-Inzisivi handelt es sich um die Messwerte der Zahngruppe [31+41+32+42] ; ^a = Mann-Whitney-U-Test

5.5.3 PDL-Breite in Abhängigkeit des Geschlechts

Horizontale Messebenen:

Was die Abhängigkeit der PDL-Breite (Gesamt-Mittelwert) von der Geschlechtszugehörigkeit der Probanden angeht, so ist sowohl in den drei horizontalen Messebenen der fünf Zahngruppen des OK (siehe Tabelle 77) als auch in den horizontalen Messebenen des UK (siehe Tabelle 78) nahezu kein Einfluss auf die Spaltbreite festzustellen. Im Durchschnitt liegt die aus den arithmetischen Mittelwerten der drei Messebenen gebildete Differenz bei 0,1% (0,3 μm) im OK, bei 0,5 % (1,2 μm) im UK. Die größte Differenz in den Gesamtmittelwerten der männlichen und weiblichen Probanden wurde im OK mit 6 μm (männlich > weiblich) in der Zervikal-Ebene der Molaren bzw. im UK mit 9,1 μm (männlich > weiblich) in der Messebene -Mitte- der Molaren gemessen.

Vertikale Messebene:

Im Vergleich zu den oben angeführten Gesamtmittelwerten der horizontalen Messebenen zeigen die korrespondierenden Gesamtmittelwerte der vertikalen Ebene, insbesondere was den UK betrifft, deutlich höhere Zahlenwerte. Im Durchschnitt liegt die aus den arithmetischen Mittelwerten der vertikalen Messebene gebildete Differenz bei ca. 1,1 % (-3,4 μm) im OK bzw. 8,1 % (25 μm) im UK. Die größte Differenz in den Gesamtmittelwerten der männlichen und weiblichen Probanden wurde im OK bei der Gruppe der Inzisivi [12+22] apex-apikal mit 30,5 μm (männlich < weiblich), im UK bei den Molaren mit 45,7 μm (männlich > weiblich) furkal sowie mit 41,5 μm (männlich > weiblich) apex-apikal bei der Gruppe der Inzisivi des UK gemessen.

Tabelle 77: Geschlechtsspezifischer Vergleich der mittleren PDL-Breiten und Standardabweichungen der horizontalen- und vertikalen Messebenen des OK (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Untersuchte Zahngruppen	Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Oberkiefer N	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)		Differenz [Män.-Frau.] [μm]	Differenz (*) [Män.-Frau.] [%]		
			Männer				Frauen	
			MW	SD			MW	SD
Molaren:	-Zervikal-	83	267	12	261	11	6	2,3%
	-Mitte-	228	229	11	228	8	1	0,3%
	-Apikal-	208	269	18	267	19	2	0,7%
	Apex-Apikal	52	325	42	315	45	10	3,2%
Prämolaren:	-Zervikal-	160	258	9	259	13	-2	-0,6%
	-Mitte-	163	224	9	223	12	1	0,5%
	-Apikal-	157	270	23	267	22	4	1,4%
	Apex-Apikal	41	337	64	310	37	27	8,1%
Canini:	-Zervikal-	132	263	11	260	14	3	1,2%
	-Mitte-	135	222	12	224	13	-2	-0,8%
	-Apikal-	141	264	15	267	22	-3	-1,2%
	Apex-Apikal	36	309	36	317	39	-8	-2,6%
Inzisivi: [11+21]	-Zervikal-	77	256	9	258	12	-1	-0,5%
	-Mitte-	80	220	10	224	14	-4	-1,8%
	-Apikal-	75	268	17	269	26	-1	-0,5%
	Apex-Apikal	20	307	43	323	70	-17	-5,5%
Inzisivi: [12+22]	-Zervikal-	112	249	12	250	14	0	-0,2%
	-Mitte-	99	216	13	216	16	-1	-0,3%
	-Apikal-	109	263	17	264	19	-2	-0,6%
	Apex-Apikal	27	297	51	327	64	-31	-10,3%

(*) Die Prozentangaben beziehen sich stets auf die PDL-Breite der männlichen Patienten

Tabelle 78: Geschlechtsspezifischer Vergleich der mittleren PDL-Breiten und Standardabweichungen der horizontalen- und vertikalen Messebenen des UK (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Untersuchte Zahngruppen	Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Unterkiefer	PDL-Breite [μm]		Differenz [Män.-Frau.] [μm]	Differenz (*) [Män.-Frau.] [%]
			(mesial, distal, oral, vestibulär)			
			Männer	Frauen		
		N	MW SD	MW SD		
Molaren:	-Zervikal-	33	255 9	253 6	2	0,9%
	-Mitte-	71	217 7	208 7	9	4,2%
	-Apikal-	69	257 12	255 11	2	0,8%
	Apex-Apikal	18	280 41	277 33	3	1,1%
	Furk	9	346 11	300 85	46	13,2%
Prämolaren:	-Zervikal-	94	248 8	251 13	-2	-0,8%
	-Mitte-	96	211 5	213 11	-3	-1,4%
	-Apikal-	99	255 16	257 15	-3	-1,1%
	Apex-Apikal	25	307 37	286 38	22	7,1%
Canini:	-Zervikal-	72	246 9	249 10	-3	-1,1%
	-Mitte-	66	212 11	212 12	1	0,3%
	-Apikal-	76	261 21	258 17	3	1,1%
	Apex-Apikal	19	311 33	288 34	23	7,4%
Inzisivi: [31+41+32+42]	-Zervikal-	68	241 6	232 18	8	3,4%
	-Mitte-	71	209 8	202 13	8	3,7%
	-Apikal-	87	257 16	248 21	9	3,4%
	Apex-Apikal	21	318 54	276 31	41	13,1%

(*) Die Prozentangaben beziehen sich stets auf die PDL-Breite der männlichen Patienten

5.5.4 PDL-Breiten der untersuchten Zahngruppen

Bei der Betrachtung der Messergebnisse der horizontalen Messebenen ist generell festzustellen, dass die im Oberkiefer gemessenen Werte der PDL-Breite durchwegs größer sind als jene die bei den zugehörigen Antagonisten im Unterkiefer bestimmt wurden. Die größte Differenz befindet sich hierbei, ungeachtet der Geschlechtszugehörigkeit, zwischen den beiden Zahnpaarungen Inzisivi [11+21] und Inzisivi [31+41+32+42] (Tabelle 79). Bei beiden Patientengruppen wurde die größte PDL-Differenz jeweils in der zervikalen Messebene ermittelt, wobei die Differenz bei den weiblichen Patienten 25 µm und bei den männlichen Patienten 16 µm betrug. Eine Aussage darüber inwieweit das Geschlecht einen Einfluss auf die Größe der PDL-Differenz zwischen OK und UK ausübt kann aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten (Tabelle 80) nicht getroffen werden.

Tabelle 79: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und Standardabweichungen der Zahngruppen des OK und UK (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

OBERKIEFER: PDL-Breite [µm] - alle Patienten										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [11+21]		Inzisivi: [12+22]		Canini: [13+23]		Prämolaren: [14+15+24+25]		Molaren: [16+17+26+27]	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
-Zervikal-	257	11	250	13	261	13	259	11	263	11
-Mitte-	222	12	216	15	223	13	223	11	228	9
-Apikal-	268	22	264	18	266	20	268	22	268	18
Apex-Apikal	316	59	316	61	314	37	323	53	318	44
Furk	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	351	57

UNTERKIEFER: PDL-Breite [µm] - alle Patienten										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [31+41+32+42]		Canini: [33+43]		Prämolaren: [34+44+35+45]		Molaren: [36+46+37+47]			
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
-Zervikal-	236	14			248	9	250	12	254	7
-Mitte-	205	12			212	11	213	10	212	9
-Apikal-	252	19			259	19	257	16	256	11
Apex-Apikal	296	47			295	34	291	38	278	35
Furk	n.z.	n.z.			n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	320	65

n.z. = nicht zutreffend

Tabelle 80: Differenzen der Zahngruppen des OK zu ihren Antagonisten im UK

Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Differenz: (PDL OK - PDL UK) - alle vermessene Patienten [µm]:									
	Inzisivi: [11+21] - [UK]		Inzisivi: [12+22] - [UK]		Canini: [OK - UK]		Prämolaren: [OK - UK]		Molaren: (*) [OK - UK]	
	[µm]	[%]	[µm]	[%]	[µm]	[%]	[µm]	[%]	[µm]	[%]
-Zervikal-	21	8,1%	13	5,4%	14	5,2%	9	3,3%	9	3,6%
-Mitte-	17	7,8%	11	5,1%	11	5,1%	10	4,6%	16	7,0%
-Apikal-	16	6,1%	12	4,5%	7	2,6%	12	4,3%	12	4,5%
Apex-Apikal	20	6,3%	20	6,4%	19	6,2%	32	9,9%	40	12,5%
Furk	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	30	8,7%

(*) Die Prozentangaben beziehen sich stets auf die PDL-Breite des Oberkiefers; n.z. = nicht zutreffend

Eine detaillierte Aufteilung der Unterschiede der einzelnen Zahngruppen mit Unterteilung nach Geschlechtern ist im Anhang aufgeführt (Tabellen 84-87).

6 Diskussion

6.1 Diskussion von Material und Methode

Im Gegensatz zu den bereits bekannten Studien von Coolidge (1937) und Klein (1928) wurden in der hier vorliegenden Studie ausschließlich retrospektive DVT-Aufnahmen aus der gemeinsamen Röntgendatenbank der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie und der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU München zur Vermessung des Parodontalspaltes herangezogen .

Um eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Patienten bzw. der zu untersuchenden Daten in punkto Lebensalter, Geschlecht sowie eventuell vorliegender parodontaler Vorerkrankungen zu erhalten, wäre es wünschenswert gewesen, nach vorangegangener, gezielter Auswahl der Patienten die DVT-Aufnahmen anzufertigen. Dies ist jedoch aufgrund der unverhältnismäßig hohen Strahlenbelastung aus ethischen Gründen gemäß der gültigen Strahlenschutzverordnung (Bundeszahnärztekammer 2011) abzulehnen.

Bildqualität

Hinsichtlich der zur Verfügung stehenden DVT-Aufnahmen ist anzumerken, dass diese Aufnahmen, wie bereits erwähnt, nicht in Verbindung mit dieser Studie erstellt wurden und somit Schwankungen in der Bildqualität, wie sie unter anderem aufgrund von Personalwechsel und den damit einhergehenden Abweichungen in der Vorgehensweise, z. B. Positionierung der Patienten während der Aufnahme, Auswahl des Aufnahmebereichs und der Aufnahmeparameter, unumgänglich sind. Aufnahmen, deren Qualität nicht den gestellten Anforderungen entsprach und DVTs, bei welchen ein Verdacht auf Bewegungsartefakte und sonstige negative Effekte vorlag, wurden nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wurden in dieser Studie nur Aufnahmen vermessen, die mit einer zum Zeitpunkt der Aufnahmen bestmöglichen Auflösung von 90 µm aufgezeichnet wurden.

Messmethodik

Bei der Einstellung der Messebene und bei der Justierung der einzelnen Messposition eröffnen sich zwei gravierende Probleme, die besonders hervorzuheben sind. Dies ist zum einen die Thematik der Parallaxenverschiebung, zum anderen die Schwierigkeit der Festlegung einer exakt

reproduzierbaren Positionierung der horizontalen Messebenen sowie den jeweils auf ihr befindlichen vier axialen Messpunkten.

Um die sich hieraus möglicherweise ergebenden Messfehler weitestgehend auszuschließen oder gering zu halten, wurde, wie bereits in Kapitel 4.4.3 erwähnt, im Rahmen der Einarbeitung festgelegt, dass die Messungen ausschließlich in Teamarbeit von denselben Personen durchgeführt werden. Durch dieses Vorgehen konnte sichergestellt werden, dass bereits vor Beginn der eigentlichen Messung die Einstellungen der Messebenen und Messpunkte durch eine zweite fachkundige Person kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert wurden.

6.2 Vergleich der Messergebnisse und -methodik mit anderen Studien

Vergleicht man die im Rahmen dieser Studie ermittelten PDL-Mittelwerte mit den Ergebnissen früherer Arbeiten, so muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den PDL-Mittelwerten älterer Studien ausschließlich um Ergebnisse aus Messungen von anatomischen Proben handelt (Coolidge 1937; Klein 1928). Bedingt durch die limitierten technischen Möglichkeiten des DVT-Verfahrens ergeben sich im Vergleich zu früheren Messungen gewisse Einschränkungen hinsichtlich der Analyse- und Interpretationsmöglichkeiten der Messergebnisse. Ursache hierfür ist zum einen die max. zur Verfügung stehende Auflösung von 90 µm und zum anderen das eingeschränkte „Field of View (FOV)“ der DVT-Aufnahmen. Aufgrund des verhältnismäßig kleinen Bildausschnittes ist es z. B. nicht möglich, den kompletten Zahnstatus eines Patienten, das heißt der Nachbar- und Gegenbezahnung zu bestimmen. Rückschlüsse auf die funktionelle Belastung der Zähne können somit im Gegensatz zu den Arbeiten von Jozat (1933) zitiert nach Coolidge, Klein (1928) und Keller (1931) nicht gezogen werden. Bedingt durch das Arbeiten mit anatomischen Proben war es ihnen u. a. möglich, Messungen anhand des kompletten Schädels der Patienten durchzuführen.

So ergaben z. B. die Messungen von Klein (1928), dass Zähne mit Nachbarbezahnung und unter starker Kaubelastung den größten PDL aufwiesen, wohingegen Zähne, die nicht oder nur sehr gering belastet wurden, den kleinsten PDL zeigten (Tabelle 81).

Tabelle 81: Mittlere PDL-Breite nach Klein (1928) in Abhängigkeit von Alter, funktioneller Beanspruchung und vermessener Ebene bzw. Lokalisation im Ober- bzw. Unterkiefer (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

Durchschnittlich gemessene PDL-Breiten [μm] nach Klein (1928)			
Kategorie	Subkategorie	N	MW
Alter	20-25 Jahre		230
	40-50 Jahre		250
Funktionell stark beanspruchte Zähne	Ohne Nachbarbezaahnung		280
	Ein Nachbarzahn		260
	Nachbarzähne auf beiden Seiten		240
Ohne funktionelle Beanspruchung			200
Vermessene Ebene	Zervikal	260	280
	Mitte	220	260
	Apikal	220	240
Oberkiefer	Alveolarrand	98	369,5
	Mitte	104	179,0
	Gegend der Wurzelspitze	85	219,5
Unterkiefer	Alveolarrand	162	411,0
	Mitte	174	167,9
	Gegend der Wurzelspitze	139	201,0

6.2.1 Betrachtung des PDLs in Relation zum Lebensalter

Betrachtet man die Breite des PDLs in Abhängigkeit des Lebensalters des Patienten, so zeigen die durchgeführten Messungen, dass der PDL, mit Ausnahme der Canini und Molaren des Oberkiefers, mit zunehmendem Alter tendenziell kleiner wird (Tabelle 72). In der Literatur finden sich zu diesem Thema widersprüchliche Angaben. Mehrere Autoren (Black (1887), Bodecker (1926), Häupl und Lang (1927), Lenhossek (1922) zitiert nach Klein, Noyes (1921)) stellten fest, dass die Dicke des Parodontalspaltes mit zunehmendem Alter abnimmt und führten dies auf unterschiedliche Ursachen zurück. Noyes (1921) begründete dies unter anderem damit, dass es durch die Apposition von Knochen an der Alveole und Zementapposition an der Zahnoberfläche zu einer Verkleinerung des PDL-Spaltes kommt (Bodecker 1926; Noyes 1921). Jozat (1933) und Klein (1928) hingegen beobachteten, dass der PDL mit zunehmendem Alter wieder zunimmt. Eine Übersicht der Messergebnisse anderer Studien zeigt Tabelle 82. Eine eindeutige Antwort bezüglich der Abhängigkeit des PDLs vom Lebensalter des Patienten kann daher auch anhand der hier vorliegenden Studie nicht gegeben werden. Aus den Messergebnissen lässt sich lediglich die Tendenz einer Verkleinerung des PDLs über das Alter hinweg ableiten.

Tabelle 82: Altersabhängige mittlere PDL-Breite verschiedener Autoren (Coolidge (1937), Jozat (1933) zitiert nach Coolidge und Klein (1928)) im Vergleich zu dieser Studie. Angegeben sind der Mittelwert bzw. der Mittelwert (Standardabweichung)

Lebensalter	Durchschnittlich gemessene PDL-Breiten [μm] (SD)			
	Coolidge (1937)	Jozat (1933)	Klein (1928)	Diese Studie
10 - 30 Jahre				256 (35)
11 - 16 Jahre	210			
20 - 25 Jahre			230	
25 - 27 Jahre		290		
30 - 50 Jahre				251 (33)
32 - 50 Jahre	180			
37 - 44 Jahre		310		
40 - 50 Jahre			250	
50 - 80 Jahre				245 (33)
51 - 87 Jahre	150			
60 - 79 Jahre		370		

6.2.2 Vergleich Oberkiefer zu Unterkiefer

Bei Betrachtung der berechneten PDL-Mittelwerte des OK und UK ist festzustellen, dass im Allgemeinen der im Oberkiefer anzutreffende Paradontalspalt im Vergleich zum Unterkiefer größer ist. Die größte Differenz zeigt sich hierbei mit 21 μm bei der Zahngruppe der Inzisivi [11+21]. Ähnliche Beobachtungen machte unter anderem auch Weski (1922) zitiert nach Klein, der bei seinen Untersuchungen Unterschiede von bis zu 30-50 μm zwischen Oberkiefer und Unterkiefer feststellen konnte. Klein (1928) hingegen konnte im Rahmen seiner Studien keine Gesetzmäßigkeit(en) hinsichtlich des Größenunterschiedes des PDLs in Abhängigkeit von Ober- und Unterkiefer erkennen (siehe Tabelle 83). Vielmehr zeigten seine Untersuchungen auf, dass zum einen der im Bereich des Alveolarrandes gemessene PDL im direkten Vergleich von Ober- und Unterkiefer um bis zu 41,5 μm im Unterkiefer größer ist und andererseits sich die Situation in der mittleren und apikalen Ebene exakt umgekehrt proportional verhält. Nach Klein (1928) nimmt die Größe des PDLs im Unterkiefer mit zunehmendem Lebensalter um rund ein Sechstel der ursprünglichen Größe zu, wohingegen sich im Oberkiefer keine Veränderungen in Abhängigkeit vom Lebensalter erkennen lassen.

Tabelle 83: Durchschnittswerte der PDL-Breite am Alveolarrand, in der Mitte und in der Wurzelspitzengegend im Ober- und Unterkiefer nach (Klein 1928) (N, Anzahl Messungen; MW, Mittelwert)

Kiefer	Durchschnittswerte der PDL-Breite [μm] nach Klein (1928)					
	Alveolarrand		Mitte		Wurzel-Spitzengegend	
	N	MW	N	MW	N	MW
Oberkiefer:	98	369,5	104	179,0	85	219,5
Unterkiefer:	162	411,0	174	167,9	139	201,0

Wie schon bei der Untersuchung zu möglichen Auswirkungen des Lebensalters auf die Größe des PDLs festzustellen ist, finden sich, auch was den Einfluss der Zahnposition (Oberkiefer/Unterkiefer) auf die Größe des PDLs angeht, unterschiedliche, zum Teil widersprüchliche Aussagen in der gängigen Fachliteratur, die auch durch die Ergebnisse der hier vorliegenden Untersuchungen nicht in Einklang gebracht werden können.

6.2.3 Einfluss des Geschlechtes auf die Größe des PDLs

Auch unter Einbeziehung der Faktoren Lebensalter und Zahnposition lassen die hier vorliegenden Ergebnisse keine signifikanten Unterschiede oder Zusammenhänge zwischen der Größe des PDLs und dem Geschlecht erkennen. Da in den bislang bekannten Studien keine Untersuchungen hierüber angestellt wurden, ist ein Vergleich zu Ergebnissen früherer Studien leider nicht möglich.

6.2.4 Sanduhrförmiger Verlauf des PDLs

Klein (1928) postuliert in seiner Studie, dass der PDL am Alveolarrand mit $390 \mu\text{m}$ am größten und mit $170 \mu\text{m}$ in der Wurzelmitte am kleinsten ist. Am Apex beträgt der PDL nach Aussage von Klein (1928) $210 \mu\text{m}$. Klein (1928) wie auch Kronfeld (1931) weisen in ihren Studien unabhängig voneinander nach, dass der PDL stets einen „sanduhrförmigen“ Verlauf aufweist. Dies ist dadurch zu erklären, dass der PDL im Bereich des Widerstandszentrums des Zahnes, welches sich ausgehend vom Alveolarrand in etwa bei 40 %-44 % der Wurzellänge befindet, den kleinsten Wert annimmt (Poppe et al. 2002). Der hierdurch hervorgerufene sanduhrförmige Verlauf des PDLs zeigt sich ohne Ausnahme auch bei allen durchgeführten Messungen dieser Studie, wodurch die aktuellen Untersuchungen auch durch die Ergebnisse früherer Studien bestätigt werden.

6.2.5 Vergleich einzelner Messpositionen

Im Gegensatz zu den von Klein (1928) durchgeführten Messungen, aus denen hervorgeht, dass der PDL am Alveolarrand mit 390 μm den größten Wert annimmt, zeigen die Messungen dieser Studie die größten PDL-Werte am Apex, sowohl in der Ebene -Apikal- (334 μm) als auch am Apex-Apikal (456 μm).

Gestützt werden die vorliegenden Messungen hierbei sowohl von den Erkenntnissen von Steiniger (2010) als auch durch die Angaben aus dem Buch „Anatomie des menschlichen Gebisses“ von Mühlreiter (1928) (bearbeitet von Cohen). Mühlreiter (1928) führt den breiteren PDL am Apex auf die starke, ringförmige Anhäufung von Bindegewebe um den Apex zurück. Steiniger (2010) stellt fest, dass der PDL am Apex breiter wird, um so bei Belastung ein initiales Kippen des Zahnes zu ermöglichen.

Bei tiefergehender Betrachtung lassen sich die Unterschiede zwischen der hier vorliegenden Studie und den von Klein (1928) getroffenen Aussagen unter anderem auch auf die von ihm gewählte, unterschiedliche Messmethodik zurückführen.

Klein (1928) ermittelte die Messwerte in der von ihm durchgeführten Untersuchung anhand anatomischer Proben in mesio-distaler Richtung, wobei direkt vom Alveolarrand zum Zahn hin gemessen wurde. In der hier durchgeführten Studie wird hingegen auch der girlandenförmige Verlauf des Alveolarknochens berücksichtigt, wobei der Alveolarrand in oro-vestibulärer Richtung (Abbildung 33b) deutlich tiefer liegt als in mesio-distaler Richtung (Abbildung 33a). Darüber hinaus wurde die in dieser Studie definierte zervikale Messebene so festgelegt, dass der Zahn in der Transversalebene betrachtet von allen Seiten im Knochen gefasst ist. Hierdurch verschieben sich die Messpositionen mesial und distal in der Zervikal-Ebene nach apikal, wodurch sich die kleineren Werte und somit die Diskrepanz in den PDL-Werten erklären lässt. Wie in Abbildung 33 zu erkennen ist, ist der PDL mesio-distal, deutlich kleiner als auf Höhe der vestibulären Lamelle.

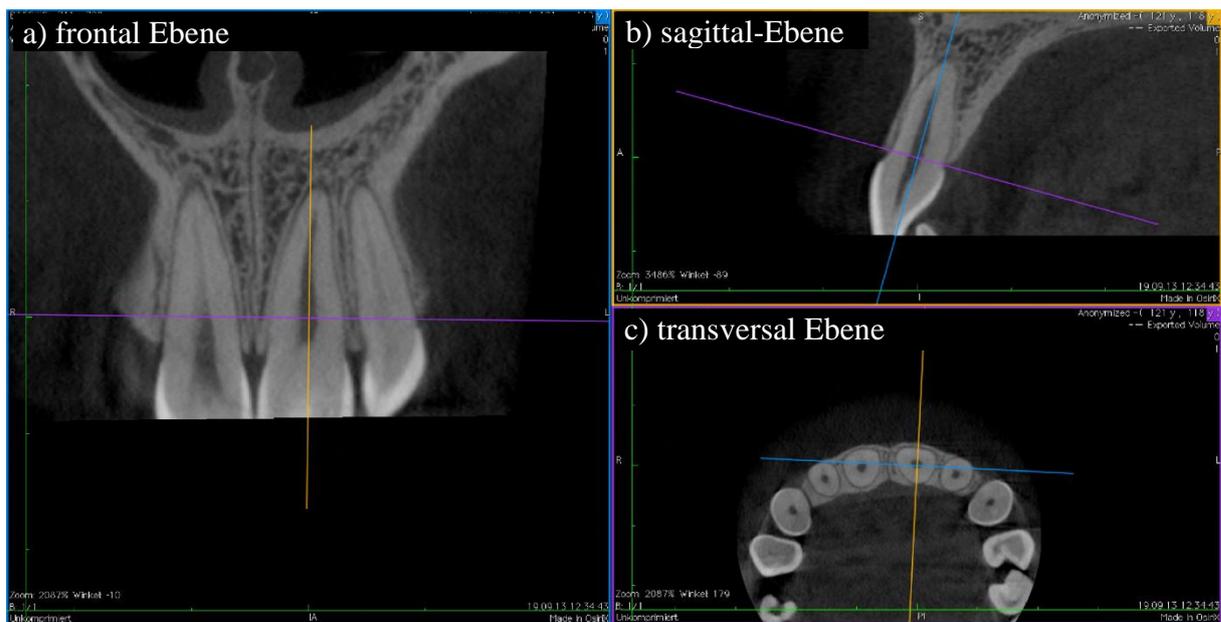


Abbildung 33: Auszug OsiriX, Abbildung des Zahnes 11 in der a) frontalen Ebene, b) sagittal-Ebene, c) transversal-Ebene

6.2.6 Radialsymmetrische Verteilung der Messwerte in den Messebenen

Bereits erste Auswertungen der Messergebnisse ließen erkennen, dass sich die jeweils in den vier Achsen (mesial, distal, oral, vestibulär) der gleichen Zahnebene gemessenen PDL-Breiten stets in nahezu gleichem Abstand und somit radialsymmetrisch um den Zahn anordnen. Gestützt durch die Ergebnisse der hierzu durchgeführten statistischen Tests war es daher möglich, aus den vier Achswerten einer Ebene jeweils einen gemeinsamen sogenannten Ebenenmittelwert zu bilden.

Auch Klein (1928) verglich in seiner Studie die PDL-Messwerte einander gegenüberliegender Achsen und kam dabei zu dem Ergebnis, dass die gemessenen Unterschiede so gering sind, dass ihnen keine größere Bedeutung beizumessen sei. Im Rahmen seiner Untersuchungen betrachtete Klein (1928) auch das Verhalten des PDLs in oro-vestibulärer Achsrichtung. Die anhand von 15 Zähnen durchgeführten Messungen erbrachten folgende, unterschiedliche Ergebnisse: Während die im Oberkiefer in vestibulärer Achsrichtung gemessenen PDL-Breiten (270 μm) durchschnittlich über den in oraler Achsrichtung gemessenen Werten lagen (240 μm), zeigte sich im Unterkiefer eine entgegengesetzte Tendenz. Hier lagen die in oraler Achsrichtung gemessenen PDL-Breiten mit ca. 220 μm leicht über den in vestibulärer Achsrichtung gemessenen Werten von 210 μm (Klein 1928). Somit kann die in dieser Studie getroffene Annahme,

dass eine Zusammenfassung der vier Achswerte zu einem gemeinsamen sogenannten Ebenenmittelwert möglich und zulässig ist, bekräftigt werden.

6.3 Unterschied zwischen DVT und anatomischen Präparaten

Durch *in-vivo*-Messungen ist es unter anderem auch möglich, die Problematik von Fixationsartefakten wie z. B. der Rissbildung (Klein 1928) zu umgehen, welche die Messung an einzelnen Stellen des Objektes unmöglich machen würde. Gleiches gilt im Übrigen auch für die Denaturierung und somit auch bezüglich der Veränderung der Morphologie der Präparate (Holberg et al. 2014). In diesem besonderen Fall wird ein anatomischer Spalt vermessen, welcher unter einem hydrostatischen Druck steht und in einer anatomischen Probe nicht wiedergespiegelt werden kann.

Eine weitere Problematik der Vermessung des PDLs unter Zuhilfenahme anatomischer Proben besteht darin, dass die anatomischen Proben vor der Vermessung zersägt werden müssen, wodurch sich unter anderem die folgenden Nachteile ergeben: Zum einen ist, wie Coolidge (1937) und Klein (1928) in ihren Studien feststellten, eine Vermessung nur an Zentralschnitten möglich, zum anderen kann dieser Schritt nicht mehr rückgängig gemacht werden, wodurch die Probe im Falle einer falschen Schnittführung unter Umständen nahezu unbrauchbar wird. Darüber hinaus ist es überaus aufwendig, an ein und demselben anatomischen Präparat nicht nur in der mesio-distalen-, sondern zusätzlich in der oro-vestibulären Schnittebene Messungen durchzuführen. Dies erklärt auch, weshalb in der Studie von Coolidge (1937) nur an 23 Zähnen sowohl in der mesio-distalen als auch in der oro-vestibulären Ebene Messungen durchgeführt wurden.

Bei Messungen anhand von DVT-Aufnahmen ist eine Beurteilung des PDLs in nahezu jeder gewünschten Achse und Ebene möglich. Somit ist es möglich, auch auf Variationen in der Zahnanatomie einzugehen und die Messachsen und Ebenen genau auf den jeweils zu vermessenden Zahn abzustimmen. Hinzu kommt, dass anhand nur eines Datensatzes eine weitaus größere Anzahl an Messwerten generiert werden kann als dies z. B. bei anatomischen Präparaten möglich wäre. Zusätzlich können Fehler bei der Festlegung der gewünschten Achse jederzeit korrigiert werden.

Ein Nachteil, der aus der großen Vielfalt an Einstellungsmöglichkeiten bei der Messung anhand von DVT-Aufnahmen resultiert, ist, dass es überaus zeitaufwendig ist, eine vormals

eingestellte Messposition erneut exakt anzufahren. Dieser Umstand führte bei der hier vorliegenden Untersuchung zu dem Beschluss, dass die Messungen von zwei Personen gleichzeitig durchgeführt wurden. Somit erfolgte eine Beurteilung der gewählten Messebene und Messpositionen stets durch zwei Personen, wodurch behandler-spezifische Eigenheiten weitestgehend kompensiert werden konnten.

6.4 Bedeutung der Messergebnisse für die Kieferorthopädie

Im Rahmen werkstoffkundlicher Untersuchungen bezüglich der Materialeigenschaften neuartiger Legierungen, der Berechnung der bei der kieferorthopädischen Zahnbewegung wirkenden Kräfte (Ammar et al. 2011; Cattaneo et al. 2009; Jones et al. 2001) und bei Untersuchungen bezüglich des Einflusses der kieferorthopädischen Apparaturen auf Zähne und Zahnhalteapparat werden zumeist FE-Modelle der Zähne und der ihnen umliegenden Strukturen erstellt (Holberg et al. 2014). Mit Hilfe dieser Modelle ist es möglich, selbst hochkomplexe Vorgänge zu berechnen und diese im Anschluss daran grafisch darzustellen. Besondere Bedeutung kommt hierbei der möglichst detailgetreuen digitalen Rekonstruktion des Versuchsaufbaues und der anatomischen Situation zu.

Viele Studien, die unter Zuhilfenahme von komplexen FE-Modellen die Kraftentwicklung innerhalb des Stomatognathen-Systems berechnen, rekonstruieren den PDL als einen homogenen Spalt (Ammar et al. 2011; Holberg et al. 2014). Sie greifen hierbei entweder auf die aus der Literatur bekannten Messwerte zurück oder übernehmen die Messwerte der in der jeweiligen Studie erfassten Probanden bzw. anatomischen Proben.

Um die Ergebnisse unterschiedlicher Studien aussagekräftig vergleichen zu können, ist es daher überaus wichtig, dass sowohl für die Modellierung als auch für die Simulation einheitliche Protokolle entwickelt werden (Ammar et al. 2011). Dem PDL kommt hierbei erneut eine bedeutsame Rolle zu, da er einer der Hauptmediatoren kieferorthopädischer Zahnbewegungen ist und somit besonders detailgetreu dargestellt werden sollte (Jones et al. 2001).

7 Zusammenfassung

In dieser Studie wurde die Breite des menschlichen Parodontalspaltes retrospektiv anhand von DVT-Aufnahmen aus der gemeinsamen Röntgendatenbank der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie und der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU München vermessen. Hierbei wurden bei jedem Zahn in drei Messebenen an je vier Positionen sowie in der Vertikalen ein apikaler Messwert und bei Molaren ein Furkations-Wert ermittelt. Im Anschluss an die positive Überprüfung der Messwerte mittels statistischer Testverfahren wurden im Oberkiefer die Zähne des ersten und des zweiten Quadranten sowie im Unterkiefer die Zähne des dritten und vierten Quadranten zusammengelegt. In einem zweiten Schritt wurden jeweils Zahngruppen innerhalb des Ober- und Unterkiefers gebildet. Die Zahngruppe der Molaren umfasst im Oberkiefer die Zähne [16], [26], [17], [27], und im Unterkiefer die Zähne [36], [46], [37], [47]. Die Gruppe der Prämolaren wird im Oberkiefer gebildet aus den Zähnen [14], [24], [15], [25] und im Unterkiefer aus den Zähnen [34], [44], [35], [45]. Hierbei wurden jedoch nur die einwurzeligen Prämolaren in die Auswertung einbezogen. Die Zähne [13], [23] bilden die Gruppe der Canini im Oberkiefer, die Zähne [33] und [43] die des Unterkiefers. Bei den Inzisivi im Oberkiefer wurden aufgrund der deutlichen anatomischen Unterschiede zwischen den Zähnen [12], [22] und [11], [21] zwei voneinander getrennte Gruppen der Oberkiefer-Inzisivi gebildet. Da im Gegensatz hierzu ihre Antagonisten im Unterkiefer nur sehr geringe anatomische Unterschiede aufweisen, war es möglich, die Zähne [31], [41], [32] und [42] in einer Zahngruppe zusammenzufassen.

Für die Zahngruppe der Zähne [11+21] ergaben die Messungen in der zervikalen Ebene eine mittlere PDL-Breite von 257 μm , in der Messebene -Mitte- eine PDL-Breite von 222 μm und in der apikalen Ebene eine mittlere PDL-Breite von 268 μm . Bei der Zahngruppe der Zähne [12+22] wurde für die zervikale Ebene eine mittlere PDL-Breite von 250 μm , für die Messebene -Mitte- eine PDL-Breite von 216 μm und für die apikale Ebene eine mittlere PDL-Breite von 264 μm ermittelt.

Die UK-Inzisivi wiesen in der zervikalen Ebene einen PDL-Wert von 236 μm , in der mittleren Ebene von 205 μm und in der apikalen-Ebene von 252 μm auf. Bei den OK-Canini wurden im Mittel folgende PDL-Breiten berechnet: in der zervikalen Ebene 261 μm , in der mittlere-

ren Messebene 223 μm sowie 266 μm in der apikalen. Für die Eckzähne des Unterkiefers ergaben die Messungen in der zervikalen Ebene einen PDL-Wert von 248 μm , in der mittleren Ebene einen Wert von 212 μm und in der apikalen Messebene einen PDL-Wert von 259 μm .

Bei der Zahngruppe der Prämolaren im Oberkiefer ergaben sich folgende PDL-Mittelwerte: 259 μm in der zervikalen Ebene, 223 μm in der mittleren Ebene und 268 μm in der apikalen Ebene. Die UK-Prämolaren wiesen in der zervikalen Ebene einen PDL-Wert von 250 μm , in der mittleren Ebene von 213 μm und in der apikalen Ebene von 257 μm auf.

Bei der Gruppe der OK-Molaren ergab sich in der zervikalen Ebene ein PDL-Wert von 263 μm , für die mittlere Messebene ein Wert von 228 μm sowie für die apikale Messebene ein PDL-Wert von 268 μm . Demgegenüber wurde für die zervikale Ebene der Unterkiefer-Molaren ein PDL-Wert von 254 μm , für die Messebene -Mitte- ein PDL-Wert von 212 μm und für die apikale Ebene ein Wert von 256 μm berechnet.

Die hier vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sowohl das Lebensalter als auch das Geschlecht keinen Einfluss auf die Breite des PDLs zu haben scheint. Demgegenüber lässt sich jedoch feststellen, dass der Oberkiefer im Vergleich zum Unterkiefer, unabhängig von Alter und Geschlecht, durchwegs größere PDL-Mittelwerte aufweist. Der bereits aus der Literatur bekannte sanduhrförmige Verlauf des PDLs ist auch in der hier vorliegenden Studie bei allen Zahngruppen, unbeeinflusst von Alter und Geschlecht, wiederzufinden.

Bei Betrachtung der einzelnen Zahngruppen ist festzustellen, dass sich mit Ausnahme der Unterkiefer-Inzisivi keine signifikanten Unterschiede in den PDL-Breiten der einzelnen Zahngruppen ergeben. Im Vergleich zu den übrigen Zahngruppen sind die mittleren PDL-Werte der Zahngruppe Inzisivi in der zervikalen Ebene um bis zu 17 μm , in der mittleren Messebene um bis zu 8 μm und in der apikalen Messebene um bis zu 7 μm kleiner.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Aufnahmen sowie deren Auswertung lassen sich, bedingt durch die nur sehr geringen Unterschiede in den Spaltbreiten, keine eindeutigen Rückschlüsse auf mögliche Zusammenhänge von PDL-Breite, Lebensalter und Geschlecht ziehen. Eine Änderung des Parodontalspalts bedingt durch pathologische Prozesse wie z. B. parodontale Erkrankung muss hingegen noch weiter untersucht werden.

8 Anhang

Tabelle 84: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und Standardabweichungen des OK und UK der männlichen Patienten in den Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal-, -Furk- (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

OBERKIEFER: PDL-Breite [µm] - alle männlichen Patienten										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [11+21]		Inzisivi: [12+22]		Canini: [13+23]		Prämolaren: [14+15+24+25]		Molaren: [16+17+26+27]	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
	-Zervikal-	256	9	249	12	263	11	258	9	267
-Mitte-	220	10	216	13	222	12	224	9	229	11
-Apikal-	268	17	263	17	264	15	270	23	269	18
Apex-Apikal	307	43	297	51	309	36	337	64	325	42
Furk	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	337	57

UNTERKIEFER: PDL-Breite [µm] - alle männlichen Patienten										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [31+41+32+42]				Canini: [33+43]		Prämolaren: [34+44+35+45]		Molaren: [36+46+37+47]	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
	-Zervikal-	241	6			246	9	248	8	255
-Mitte-	209	8			212	11	211	5	217	7
-Apikal-	257	16			261	21	255	16	257	12
Apex-Apikal	318	54			311	33	307	37	280	41
Furk	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	346	11

n.z. = nicht zutreffend

Tabelle 85: Differenzen der mittleren PDL-Breiten der Zahngruppen des OK zu UK aller männlichen Probanden

Differenz der Mittelwerte (PDL OK - PDL UK) - aller männlichen Patienten [µm]:										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [11+21] - [UK]		Inzisivi: [12+22] - [UK]		Canini: [OK - UK]		Prämolaren: [OK - UK]		Molaren: (*) [OK - UK]	
	[µm]	[%]	[µm]	[%]	[µm]	[%]	[µm]	[%]	[µm]	[%]
	-Zervikal-	16	6,1%	9	3,5%	17	6,5%	9	3,6%	12
-Mitte-	11	5,0%	7	3,0%	10	4,4%	13	5,9%	11	5,0%
-Apikal-	11	4,1%	6	2,3%	3	1,2%	16	5,8%	12	4,5%
Apex-Apikal	-11	-3,6%	-21	-7,0%	-1	-0,4%	29	8,7%	45	14,0%
Furk	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	-9	-2,7%

(*) Die Prozentangaben beziehen sich stets auf die PDL-Breite des Oberkiefers; n.z. = nicht zutreffend

Tabelle 86: Vergleich der mittleren PDL-Breiten und Standardabweichungen des OK und UK der weiblichen Probanden in den Messebenen -Zervikal-, -Mitte-, -Apikal-, -Apex-Apikal-, -Furk- (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

OBERKIEFER: PDL-Breite [μm] - alle weiblichen Patienten										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [11+21]		Inzisivi: [12+22]		Canini: [13+23]		Prämolaren: [14+15+24+25]		Molaren: [16+17+26+27]	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
-Zervikal-	258	12	250	14	260	14	259	13	261	11
-Mitte-	224	14	216	16	224	13	223	12	228	8
-Apikal-	269	26	264	19	267	22	267	22	267	19
Apex-Apikal	323	70	327	64	317	39	310	37	315	45
Furk	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	357	58

UNTERKIEFER: PDL-Breite [μm] - alle weiblichen Patienten										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [31+41+32+42]		Canini: [33+43]		Prämolaren: [34+44+35+45]		Molaren: [36+46+37+47]			
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
-Zervikal-	232	18			249	10	251	13	253	6
-Mitte-	202	13			212	12	213	11	208	7
-Apikal-	248	21			258	17	257	15	255	11
Apex-Apikal	276	31			288	34	286	38	277	33
Furk	n.z.	n.z.			n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	300	85

n.z. = nicht zutreffend

Tabelle 87: Differenz der mittleren PDL-Breiten der Zahngruppen des OK und UK aller weiblichen Patienten

Differenz der Mittelwerte (PDL OK - PDL UK) - aller weiblichen Patienten [μm]:										
Zahnmessebene (horizontal/vertikal)	Inzisivi: [11+21] - [UK]		Inzisivi: [12+22] - [UK]		Canini: [OK - UK]		Prämolaren: [OK - UK]		Molaren: (*) [OK - UK]	
	[μm]	[%]	[μm]	[%]	[μm]	[%]	[μm]	[%]	[μm]	[%]
-Zervikal-	25	9,8%	17	7,0%	11	4,4%	9	3,4%	9	3,3%
-Mitte-	23	10,2%	15	6,9%	12	5,5%	9	4,1%	20	8,7%
-Apikal-	21	7,8%	16	6,2%	9	3,4%	9	3,5%	12	4,6%
Apex-Apikal	47	14,6%	51	15,7%	30	9,4%	24	7,7%	38	12,1%
Furk	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	57	16,0%

(*) Die Prozentangaben beziehen sich stets auf die PDL-Breite des Oberkiefers; n.z. = nicht zutreffend

Tabelle 88/1: Gegenüberstellung der Zähne des OK und UK aller vermessenen Patienten (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Zahnebene	ZAHN	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)						ZAHN	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)						Differenz [OK-UK]		
		Gesamt		Männer		Frauen			Gesamt		Männer		Frauen		Gesamt	Männer	Frauen
		MW	SD	MW	SD	MW	SD		MW	SD	MW	SD	MW	SD	[μm]	[μm]	[μm]
-Zervikal-	[17]	261	12			261	12	[47]	255,43	3			255	3	6		6
-Mitte-		228	10			228	10		216,54	3			217	3	11		11
-Apikal-		270	27			270	27		257,05	12			257	12	13		13
Apex-Apikal		314	34			314	34		295,45	37			295	37	18		18
Furk		373	41			373	41		438,20				438		-65		-65
-Zervikal-	[16]	262	13	264	15	261	11	[46]	256,48	6			256	6	5		4
-Mitte-		227	9	225	7	228	9		211,79	6			212	6	15		16
-Apikal-		271	21	276	25	268	18		251,70	14			252	14	19		16
Apex-Apikal		334	49	326	28	339	60		246,75	11			247	11	87		92
Furk		320	57	286	58	343	54		226,60				227		93		116
-Zervikal-	[15]	254	14	255	11	253	15	[45]	250,43	12			250	12	4		3
-Mitte-		220	14	225	10	217	15		219,68	11			220	11	0		-3
-Apikal-		271	25	290	20	260	21		259,18	20			259	20	11		1
Apex-Apikal		298	45	323	58	282	33		288,08	20			288	20	10		-6
-Zervikal-	[14]	257	9	259	8	256	10	[44]	248,30	15	251	5	248	17	9	8	9
-Mitte-		220	9	225	8	219	9		212,67	12	207	6	214	12	8	18	5
-Apikal-		261	17	263	14	260	18		255,35	17	250	11	256	18	6	13	4
Apex-Apikal		316	54	317	102	316	30		309,02	46	275		316	48	7	42	0
-Zervikal-	[13]	262	12	264	10	262	13	[43]	247,29	11	245	8	249	12	15	18	13
-Mitte-		223	10	220	10	224	10		214,61	11	211	12	217	9	8	10	7
-Apikal-		267	20	267	20	267	21		258,25	12	257	11	259	13	9	9	8
Apex-Apikal		321	39	304	34	330	40		293,42	32	296	29	292	36	28	8	38
-Zervikal-	[12]	248	14	250	13	246	15	[42]	238,96	15	241	6	237	19	9	9	9
-Mitte-		210	15	212	14	209	16		208,65	10	208	8	209	11	2	5	0
-Apikal-		263	19	261	16	265	21		248,54	15	255	14	244	16	15	7	20
Apex-Apikal		323	47	305	52	334	43		297,78	51	314	71	287	34	26	-10	47
-Zervikal-	[11]	258	11	257	10	258	13	[41]	233,70	16	241	6	225	21	24	16	33
-Mitte-		224	13	223	10	225	16		203,69	14	213	11	197	13	20	10	28
-Apikal-		271	24	266	16	275	29		256,33	12	257	13	255	11	15	9	19
Apex-Apikal		316	62	303	62	324	66		281,30	15	285	17	278	19	35	19	46

Tabelle 88/2: Gegenüberstellung der Zähne des OK und UK aller vermessenen Patienten (MW, Mittelwert; SD, Standardabweichung)

Zahnebene	ZAHN	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)						ZAHN	PDL-Breite [μm] (mesial, distal, oral, vestibulär)						Differenz [OK-UK]		
		Gesamt		Männer		Frauen			Gesamt		Männer		Frauen		Gesamt	Männer	Frauen
		MW	SD	MW	SD	MW	SD		MW	SD	MW	SD	MW	SD	[μm]	[μm]	[μm]
-Zervikal-	[27]	268	8	268	11	268	6	[37]	250	5	254	5	247	3	17	14	21
-Mitte-		231	10	232	13	231	6		214	10	223	4	206	6	17	9	25
-Apikal-		265	12	265	11	266	14		258	10	257	10	258	10	7	8	7
Apex-Apikal		327	40	338	54	320	30		296	40	307	42	286	42	31	31	34
Furk		371	65	344	21	399	89		319	40	345	17	294	43	52	-1	105
-Zervikal-	[26]	260	12	273	4	257	11	[36]	256	10	256	12	256	8	4	17	1
-Mitte-		227	5	226	5	227	6		209	7	212	5	202	5	18	14	25
-Apikal-		266	11	268	11	266	11		255	12	257	13	251	7	11	11	15
Apex-Apikal		289	38	298	36	286	41		258	11	253	10	268	3	31	45	18
Furk		337	57	417		310	24		314	57	347	5	248		23	70	62
-Zervikal-	[25]	261	10	259	9	266	10	[35]	253	9	249	8	261	6	8	10	6
-Mitte-		226	10	224	11	231	8		213	5	211	5	216	5	12	12	14
-Apikal-		268	17	267	18	269	15		259	16	258	19	263	5	8	10	6
Apex-Apikal		319	40	312	35	343	63		297	41	312	43	265	6	22	0	78
-Zervikal-	[24]	261	11	258	8	264	12	[34]	249	11	244	7	250	12	12	14	14
-Mitte-		225	10	223	7	227	12		209	9	210	6	209	10	15	13	17
-Apikal-		273	26	269	27	277	24		255	12	247	7	256	12	18	22	21
Apex-Apikal		344	59	376	65	313	34		276	35	320		271	34	68	56	43
-Zervikal-	[23]	260	14	263	12	258	15	[33]	248	8	247	10	249	8	12	16	9
-Mitte-		223	15	223	13	223	17		209	11	214	10	206	11	15	9	18
-Apikal-		265	19	262	9	267	24		260	24	268	34	257	20	5	-6	10
Apex-Apikal		307	35	313	39	302	33		296	39	341	10	284	34	11	-27	18
-Zervikal-	[22]	251	12	248	12	254	12	[32]	234	9	239	7	227	8	18	10	27
-Mitte-		223	12	220	11	225	12		200	13	209	10	190	5	23	11	35
-Apikal-		264	18	265	18	264	18		256	21	268	17	245	20	8	-3	19
Apex-Apikal		308	74	289	55	320	85		310	75	368	49	253	34	-2	-78	67
-Zervikal-	[21]	256	10	256	7	257	11	[31]	234	13	242	7	227	14	23	14	30
-Mitte-		221	11	217	10	223	12		199	13	209	3	188	10	21	9	36
-Apikal-		266	20	269	19	263	22		252	29	249	16	255	39	14	19	8
Apex-Apikal		316	58	309	28	323	83		290	34	307	23	256		26	2	67



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

ETHIKKOMMISSION BEI DER LMU MÜNCHEN



Ethikkommission · Pettenkoferstr. 8 · 80336 München

Herrn
Dr. A. Boryor
Poliklinik f. Kieferorthopädie
Goethestr. 70
80336 München

Vorsitzender:
Prof. Dr. W. Eisenmenger
Telefon+49 (0)89 5160 - 5191
Telefax+49 (0)89 5160 - 5192
Ethikkommission@
med.uni-muenchen.de

www.ethikkommission.med.uni-muenchen.de

Postanschrift:
Pettenkoferstr. 8a
D-80336 München

Hausanschrift:
Pettenkoferstr. 8
D-80336 München

München, 23.04.2013 Hb /sc

Titel:	Bestimmung der Breite des Parodontalligaments anhand von digitalen Volumentomographien
Antragsteller:	Dr. A. Boryor, M. Berkel, A. Hausner
UE Nr	076-13

Sehr geehrter Herr Dr. Boryor,

haben Sie besten Dank für Ihr Schreiben vom 12.04.2013, mit dem Sie um eine Unbedenklichkeitserklärung für das o. g. Projekt bitten.

Sofern Sie Ihre Untersuchungen nur retrospektiv anhand von bereits vorhandenen Röntgenbildern durchführen, die irreversibel anonymisiert sind - d. h. dass auch die Bearbeiter dieser Analyse keinen Rückschluss auf die Daten der Befragten erhalten - bestehen keine ethisch- rechtlichen Bedenken gegen dieses Projekt.

Vorsorglich möchte ich darauf hinweisen, dass auch bei einer positiven Beurteilung Ihres Vorhabens die Verantwortung für die Durchführung des Projektes uneingeschränkt bei Ihnen und Ihren Mitarbeitern verbleibt.

Für Ihre Untersuchungen wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

Mit freundlichen Grüßen


Prof. Dr. W. Eisenmenger
Vorsitzender der Ethikkommission

Mitglieder der Kommission:
Prof. Dr. W. Eisenmenger (Vorsitzender), Prof. Dr. E. Held (stellv. Vorsitzender), Prof. Dr. G. Paumgartner (stellv. Vorsitzender), PD Dr. Th. Beinert, Prof. Dr. H. U. Gallwas, Prof. Dr. D. Kunze, Dr. V. Mönch, Prof. Dr. H. H. Müller, Prof. Dr. R. Penning, Prof. Dr. K. Hahn, Prof. Dr. K. Pfeifer, Dr. Ch. Zach

9 Literaturverzeichnis

- Ammar HH, Ngan P, Crout RJ, Mucino VH, Mukdadi OM (2011). Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*; 139(1):e59-71.
- Baxmann M (2007). Distalisation oberer erster Molaren mittels Headgear in Abhängigkeit des Durchbruchstadiums der zweiten Molaren -Experimentelle und numerische Untersuchungen. [Dissertation] Bonn: Medizinische Fakultät, Friedrich-Wilhelms-Universität.
- Bechara BB, Moore WS, McMahan CA, Noujeim M (2012). Metal artefact reduction with cone beam CT: an in vitro study. *Dentomaxillofac Radiol*; 41(3):248-53.
- Berkovitz BK (1990). The structure of the periodontal ligament: an update. *Eur J Orthod*; 12(1):51-76.
- Black GV (1887). A Study of the Periosteum and Peridental Membrane
- Bodecker CF (1926). Fundamentals of Dental Histology and Embryology. The Macmillan Company, New York.
- Bundeszahnärztekammer (2011). Röntgenverordnung - Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung – RöV). Berlin: Bundeszahnärztekammer.
- Carestream. CS 9300 System. URL: http://carestreamdental.com/de/de-DE/3dimaging/9300#Resource_Library:TechnicalSpecifications (letzter Zugriff: 01.05.2018).
- Cattaneo PM, Dalstra M, Melsen B (2009). Strains in periodontal ligament and alveolar bone associated with orthodontic tooth movement analyzed by finite element. *Orthod Craniofac Res*; 12(2):120-8.
- Cohnen M, Kemper J, Mobes O, Pawelzik J, Modder U (2002). Radiation dose in dental radiology. *Eur Radiol*; 12(3):634-7.
- Coolidge ED (1937). The Thickness of the Human Periodontal Membrane. *The Journal of the American Dental Association and The Dental Cosmos*; 24(8):1260-1270.
- DeShields RW (1969). A study of root resorption in treated Class II, Division I malocclusions. *Angle Orthod*; 39(4):231-45.
- Dula K, Mini R, van der Stelt PF, Buser D (2001). The radiographic assessment of implant patients: decision-making criteria. *Int J Oral Maxillofac Implants*; 16(1):80-9.
- Faltin RM, Arana-Chavez VE, Faltin K, Sander FG, Wichelhaus A (1998). Root resorptions in upper first premolars after application of continuous intrusive forces. Intra-individual study. *J Orofac Orthop*; 59(4):208-19.
- Farman AG (2005). ALARA still applies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*; 100(4):395-7.
- Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW (1984). Practical cone-beam algorithm. *J. Opt. Soc. Am. A*; 1(6):612-619.
- Goch I (2005). Vergleich metrischer Genauigkeit von Computertomographie, digitaler Volumentomographie und Orthopantomographie in der modernen Implantologie. [Dissertation] Düsseldorf: Medizinische Fakultät, Heinrich Heine Universität.
- Harry MR, Sims MR (1982). Root resorption in bicuspid intrusion. A scanning electron microscope study. *Angle Orthod*; 52(3):235-58.

- Häupl K, Lang FJ (1927). Die Marginale Parodontitis. Berlin: Meusser.
- He Y, Hasan I, Keilig L, Chen J, Pan Q, Huang Y, Bourauel C (2016). Combined implant-residual tooth supported prosthesis after tooth hemisection: A finite element analysis. *Ann Anat*; 206:96-103.
- Hellwig E, Klimek J, Attin T (2009). Einführung in die Zahnerhaltung. 5. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag.
- Holberg C, Rudzki-Janson I, Wichelhaus A, Winterhalder P (2014). Periodontal ligament strain induced by different orthodontic bracket removal techniques: nonlinear finite-element comparison study. *J Orofac Orthop*; 75(4):287-98.
- Jones ML, Hickman J, Middleton J, Knox J, Volp C (2001). A validated finite element method study of orthodontic tooth movement in the human subject. *J Orthod*; 28(1):29-38.
- Jozat R (1933). Ueber Veränderungen des Periodontiums durch Entlastung (Changes in the Periodontal Tissues Caused by Changes in Occlusion). *Deutsche Zahnärztl. Wchnschr.*; 36:115.
- Kahl-Nieke B (2010). Einführung in die Kieferorthopädie - Diagnostik, Behandlungsplanung, Therapie. 3. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag.
- Keller E (1931). Das Verhältnis der Zement und Periodontalspaltbreiten zur funktionellen Beanspruchung der Zähne. *Zeitschrift für Stomatologie*; 29:271-283.
- Klein A (1928). Systematische Untersuchungen über die Periodontalbreite (Systematic Investigations Concerning the Thickness of the Periodontal Membrane). *Zeitschrift für Stomatologie*; 26:417.
- Krishnan V, Davidovitch Z (2009). On a path to unfolding the biological mechanisms of orthodontic tooth movement. *J Dent Res*; 88(7):597-608.
- Kronfeld R (1931). Histologic study of the influence of function on the human periodontal membrane. *Journal of the American Dental Association*; 18(7):1242-1274.
- Kuroi J, Owman-Moll P, Lundgren D (1996). Time-related root resorption after application of a controlled continuous orthodontic force. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*; 110(3):303-10.
- Lenhossek M, in Scheff. (1922). J. Scheff: Handbuch d. Zahnheilk. Wien
- McFadden WM, Engstrom C, Engstrom H, Anholm JM (1989). A study of the relationship between incisor intrusion and root shortening. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*; 96(5):390-6.
- Miracle AC, Mukherji SK (2009). Conebeam CT of the head and neck, part 1: physical principles. *AJNR Am J Neuroradiol*; 30(6):1088-95.
- Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA (1998). A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *Eur Radiol*; 8(9):1558-64.
- Mühlreiter E (1928). Anatomie des menschlichen Gebisses Leipzig: Arthur Felix.
- Natali AN, Pavan PG, Carniel EL, Dorow C (2003). A transversally isotropic elasto-damage constitutive model for the periodontal ligament. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*; 6(5-6):329-36.
- Noyes FB (1921). A Textbook of Dental Histology and Embryology. Philadelphia: Lea & Febiger.
- Pauwels R, Stamatakis H, Bosmans H, Bogaerts R, Jacobs R, Horner K, Tsiklakis K (2013). Quantification of metal artifacts on cone beam computed tomography images. *Clin Oral Implants Res*; 24 Suppl A100:94-9.

- Poppe M, Bourauel C, Jager A (2002). Determination of the elasticity parameters of the human periodontal ligament and the location of the center of resistance of single-rooted teeth a study of autopsy specimens and their conversion into finite element models. *J Orofac Orthop*; 63(5):358-70.
- Proffit WR (2007). *Contemporary Orthodontics*. St.Louis, Missouri.
- Reitan K (1974). Initial tissue behavior during apical root resorption. *Angle Orthod*; 44(1):68-82.
- Rother UJ (2006). *Moderne bildgebende Diagnostik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde*. München: Elsevier.
- Scarfe WC, Farman AG, Sukovic P (2006). Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice. *J Can Dent Assoc*; 72(1):75-80.
- Scarfe WC, Farman AG (2008). What is cone-beam CT and how does it work? *Dent Clin North Am*; 52(4):707-30, v.
- Schulze R (2013). s2k-Leitlinie: Dentale digitale Volumentomographie. DGZMK-Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Version Nr. 9 vom 5. August 2013(AWMF-Registernummer 083-005).
- Sirona (2013). *Gebrauchsanweisung GALILEOS Compact*. GmbH SDS, Sirona Dental Systems GmbH.
- Steiniger B (2010). *Mikroskopische Anatomie der Zähne und des Parodonts*. Stuttgart: Georg Thieme.
- Suomalainen A, Pakbaznejad Esmaeili E, Robinson S (2015). Dentomaxillofacial imaging with panoramic views and cone beam CT. *Insights Imaging*; 6(1):1-16.
- Weski O (1922). Die chronische marginalen Entzündung des Alveolarfortsatzes mit besonderer Berücksichtigung der Alveolarpyorrhoe. *Vierteljahresschrift für Zahnheilkunde*:1-29.
- Wichelhaus A (2013). *Kieferorthopädie - Therapie ; Grundlegende Behandlungskonzepte*. [Farbatlanten der Zahnmedizin] Stuttgart, New York: Georg Thieme.
- Wills DJ, Picton DC, Davies WI (1972). An investigation of the viscoelastic properties of the periodontium in monkeys. *J Periodontal Res*; 7(1):42-51.
- Zöller JE (2007). *Digitale Volumentomografie in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Grundlagen - Diagnostik und Behandlungsplanung*. Berlin: Quintessenz.

10 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Wichelhaus für die Überlassung des Themas und die umfangreiche Betreuung.

Meinen Betreuern Herrn Dr. Sebastian Stapfner und Herrn Dr. Andrew Boryor für kollegiale Zusammenarbeit und die fachliche Unterstützung.

Meinem Kollegen Herrn Maximilian Berkel für die „Vier-Augen Messung“ und die zahlreichen fachlichen, hilfreichen Diskussionen während der Datenerhebung.

Meinem Vater Manfred Hausner für die Programmierung der Excel-Tabellen und der Hilfe bei der statistischen Auswertung.

Herrn Dr. Uwe Baumert für die Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen während der schriftlichen Ausfertigung.

Meiner Bekannten Denise Staudacher für die Hilfe bei der Anfertigung der Zeichnungen (Abbildungen 4, 10, 12, 14 und 15)

Meiner Freundin Sabine Mesinger für die Unterstützung zu jedem Zeitpunkt der Dissertation und das Verständnis für die investierte Zeit.

Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen der 87. Wissenschaftlichen Tagung der Deutschen Gesellschaft für Kieferorthopädie, 10.-13. September 2014, MOC München, als Kurzvortrag vorgestellt:

Hausner A, Berkel M, Boryor A, Wichelhaus A. 3D-Vermessung des Parodontalspaltes. [Vortrag] 87. Wissenschaftliche Tagung der Deutschen Gesellschaft für Kieferorthopädie, 10.-13. September 2014, MOC München.

Eidesstattliche Versicherung

Hausner Andre Oliver

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,
dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Vermessung des menschlichen Parodontalspaltes anhand von DVT-Aufnahmen

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 24.02.2019

Ort, Datum

Hausner Andre Oliver

Unterschrift Doktorandin/Doktorand