

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie
Der Westdeutschen Kieferklinik
Direktor: Univ.-Prof. Dr. D. Drescher
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Mikroskopische Analyse von Wurzelresorptionen nach initialer
orthodontischer Therapie

Dissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doktor der Zahnmedizin

Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Evelyn Patricia Pascale Schmid

2005

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Gez.: Univ.-Prof. Dr. W. Raab
Dekan

Referent: Prof. Dr. Drescher

Koreferent: Prof. Dr. Böcking

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	3
2. LITERATURÜBERSICHT	6
2.1 Biologie orthodontischer Zahnbewegungen	6
2.2 Festsitzende orthodontische Geräte	10
2.2.1 <i>Historischer Rückblick</i>	11
2.2.2 <i>Bestandteile festsitzender Apparaturen</i>	12
2.2.3 <i>Phasen der orthodontischen Zahnbewegung</i>	14
2.3 Spannungsverteilung im Desmodont	16
2.3.1 <i>Veränderungen auf zellulärem Niveau</i>	16
2.4 Wurzelresorptionen	19
2.4.1 <i>Messungen zum Wurzelresorptionsverhalten</i>	25
3. PROBLEMSTELLUNG	26
4. MATERIAL UND METHODE	27
4.1 Auswahl der Zähne	27
4.2 Versuchsaufbau	28
4.2.1 <i>Herstellung der histologischen Schnitte</i>	28
4.2.2 <i>Fixierung</i>	28
4.3 Präparatherstellung	28
4.4 Blockvorbereitung	30
4.4.1 <i>Präparation des Gewebeblockes</i>	30
4.4.2 <i>Färbung</i>	31
4.5 Lichtmikroskop	33
4.6 Versuchsablauf	34
4.6.1 <i>Messung der Resorptionsstellen</i>	34
4.7 Computergestützte Messung der Resorptionsstellen	35
4.8 Statistik	37
5. ERGEBNISSE	38
5.1 Patientenprofil und Untersuchungsgut	38

5.1.1	<i>Geschlechtsverteilung</i>	38
5.1.2	<i>Abstammung des Untersuchungsgutes</i>	38
5.2	Angaben zur statistischen Erhebung	39
5.2.1	<i>Lichtmikroskopische Messungen</i>	39
5.3	Lokalisation der Resorptionsstellen	40
5.3.1	<i>Lokalisation der Resorptionsstellen in Abhängigkeit vom Wurzelabschnitt</i>	40
5.3.2	<i>Lokalisation der Resorptionsstellen in Abhängigkeit der Wurzelflächen</i>	41
5.4	Metrische Erfassung der Resorptionsausdehnungen	44
5.4.1	<i>Längenmessung der Resorptionsstellen</i>	44
5.4.2	<i>Tiefenmessung der Resorptionsstellen</i>	45
5.5	Übersicht der Ergebnisse	73
6.	DISKUSSION	74
6.1	Diskussion der Literaturergebnisse im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen	74
6.1.1	<i>Topografische Erfassung der Resorptionsstellen</i>	75
6.1.2	<i>Resorptionsausmaß</i>	79
6.2	Diskussion der Versuchsmethodik	83
6.2.1	<i>Patientenprofil</i>	83
6.2.2	<i>Versuchsprofil</i>	83
6.3	Schlussfolgerungen	84
7.	ZUSAMMENFASSUNG	88
8.	LITERATURVERZEICHNIS	91
9.	LEBENS LAUF	103
10.	DANKSAGUNG	104

1. Einleitung

Zur Korrektur von Zahnfehlstellungen werden schon seit über 100 Jahren erfolgreich Behandlungen mit festsitzenden orthodontischen Apparaturen durchgeführt. Es gibt jedoch, wie in jeder medizinischen Fachdisziplin, auch in der Kieferorthopädie Risiken, die mit einer Behandlung einhergehen können.

Ein solches Risiko stellen die Wurzelresorptionen dar. Sie stehen als typische kieferorthopädische Nebenwirkung im Mittelpunkt vieler Diskussionen [2,15,21,26,35,38,44,55]. Dennoch ist bis heute ihre Ätiologie noch nicht vollständig geklärt.

In zahlreichen Studien wird nach den Risikofaktoren geforscht, die das Auftreten von Resorptionen begünstigen sollen. Fest steht, dass kieferorthopädische Kräfte lokale, vasale Kompressionen hervorrufen, die eine ischämisch bedingte Nekrose zur Folge haben können. Die dadurch gesteigerte Aktivität der Osteoklasten führt schließlich zu tief reichenden Resorptionen, die sich bis in das Dentin erstrecken können [10].

Nach Faltin et al. [15] werden die verschiedenen Faktoren, die für das Auftreten von Wurzelresorptionen ursächlich sind, in zwei Hauptgruppen eingeteilt:

Zur ersten Gruppe gehören die Faktoren der Behandlungsmechanik. Darunter versteht man die Art, Dauer und Größe der angewandten Kraft. Diese Komponenten sind beeinflussbar und können während der orthodontischen Therapie variiert werden.

Zur zweiten Gruppe zählen die biologischen Faktoren. Sie bestimmen die individuelle Reaktionslage des Patienten. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sie nicht aus den therapeutischen Behandlungsweisen hervorgehen, ihre Auswirkungen aber durch bestimmte Therapieverfahren verstärkt oder abgeschwächt werden können.

In der Literatur wird oftmals die Therapie mit festsitzenden orthodontischen Geräten als ursächlicher Faktor für die Entstehung von Wurzelresorptionen genannt [15,17,19].

Auch wenn diese Apparaturen nicht alleine für die pathologischen Wurzeloberflächenveränderungen verantwortlich gemacht werden können, sind sie dennoch dieser Gefahr unterworfen, da durch sie während der Zahnbewegung unphysiologische Kräfte innerhalb des Alveolarfortsatzes wirken.

Historischer Rückblick

Im Jahre 1856 berichtete Bates [74] zum ersten Mal über die Erscheinung von Wurzelresorptionen an permanenten Zähnen. Ottolengui führte bereits 1914 diese pathologischen Wurzeloberflächenveränderungen auf orthodontische Behandlungsmaßnahmen zurück [79]. Diese Annahme wurde 1928 durch Ketcham bestätigt, der mithilfe von Röntgenaufnahmen die Unterschiede der Wurzeloberfläche vor und nach der orthodontischen Behandlung dokumentierte [98,99]. In den folgenden Jahren wurde versucht, diese Problematik durch Weiterentwicklung der Apparaturen und durch Reduktion der applizierten Kraftgrößen zu lösen.

Optimierung der kieferorthopädischen Therapie

Die Frage, die sich hier stellt, ist: „Wie können Zähne ohne großen Gewebeschaden so schnell wie möglich bewegt werden?“

Nach Burstone ist eine optimale Kraft, die im Rahmen einer kieferorthopädischen Therapie auf Zähne wirkt, durch eine maximale zelluläre Antwort (Apposition und Resorption des entsprechenden Gewebes) und der gleichzeitigen Aufrechterhaltung der Gewebeintegrität charakterisiert [45].

Um dies zu erreichen, werden heute festsitzende Apparaturen mit dünneren und elastischeren Drähten verwendet, die das Risiko von Überlastungsschäden und Wurzelresorptionen reduzieren sollen. Dennoch lassen sich langfristig auch in diesen Fällen sowohl histologisch als auch röntgenologisch Wurzelresorptionen und Gewebereaktionen feststellen [15,26].

Daraus leitet sich die Forderung ab, dass die in der Medizin eingesetzten Behandlungselemente nicht nur in der Lage sein müssen einen guten Behandlungserfolg zu erzielen, sondern dass sie diesen auch möglichst komplikationslos, das heißt mit möglichst geringem Risiko erbringen sollten.

In der vorliegenden Arbeit wurden die pathologischen Wurzeloberflächenveränderungen histologisch analysiert und mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur verglichen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen unter dem Aspekt der Prävention bei der Weiterentwicklung kieferorthopädischer Behandlungstechniken hilfreich sein.

2. Literaturübersicht

In dem folgenden Kapitel werden die anatomischen, biologischen und physikalischen Faktoren beschrieben, die für die Genese von apikalen und lateralen Zahnwurzelresorptionen verantwortlich sind. Des Weiteren soll auf die Grundlagen und Zusammenhänge zwischen biologischen Strukturen und Biomechanik im Verlauf der orthodontischen Zahnbewegung eingegangen werden.

2.1 Biologie orthodontischer Zahnbewegungen

Das Ziel der Kieferorthopädie ist die Erkennung, Verhütung und Behandlung von Dysgnathien. Die Korrektur solcher Dysgnathien impliziert sehr häufig eine Stellungskorrektur dystopisch stehender Zähne. Hierbei beruht die Durchführbarkeit einer Stellungskorrektur auf der Anpassungsfähigkeit des Parodontiums auf bestimmte Reize.

Im Folgenden soll ein Einblick in die komplexen Vorgänge der therapeutischen Zahnbewegung gegeben werden, für welche die anatomischen Kenntnisse der parodontalen Anatomie unerlässlich sind.

Parodontium:

Das Parodontium, der Zahnhalteapparat, besteht aus verschiedenen Elementen, die - jeweils für sich - sehr wichtige Funktionen erfüllen. Zum Parodontium gehören:

1. marginales Attachment
2. Wurzelzement
3. Alveolarfortsatz
4. Gingivaepithel

Das Parodontium stellt das orthodontische Zielorgan dar. Es sorgt für eine ausreichende Ernährung und Stabilisierung des Zahnes.

Zwischen Alveolarknochen und Wurzelzement befindet sich das *Desmodont*, ein zell- und faserreiches Bindegewebe. Es geht kontinuierlich in das gingivale Bindegewebe über. Die Breite des Desmodontalspalt ist abhängig vom Funktionszustand des Zahnes und beträgt im Durchschnitt 0,1 - 0,2 mm. Dieser Spalt wird zum größten Teil von kollagenen Fasern und Fibroblasten ausgefüllt. Der restliche Anteil besteht aus Gefäßen, freien Zellen und Nerven.

Diese kollagenen Fasern werden als *Sharpeysche Fasern* bezeichnet und verlaufen vom Alveolarknochen zum Wurzelzement. Hinsichtlich ihrer Orientierung tragen sie zur Lagerung des Zahnes sowohl bei axial-intrudierenden und axial-extrudierenden als auch bei horizontalen Kräften bei. Das Gewebe im Desmodontalspalt ist stark vaskularisiert. Aufgrund der engen Lagebeziehung kann eine Kompression der Gefäße eine Zirkulationsstörung zur Folge haben, was zu einer Schädigung der parodontalen Strukturen und damit zu Wurzelresorptionen führen kann [1,46,49].

Die nervale Versorgung erfolgt über den Nervus trigeminus, der für das Schmerz- und Druckempfinden zuständig ist.

Der größte Anteil im desmodontalen Bindegewebe wird durch die Fibroblasten gebildet. Diese sind für den Faseraufbau zuständig.

Des Weiteren findet man dort undifferenzierte Zellen, die als Zemento-beziehungsweise Osteoprogenitorzellen bezeichnet werden. Sie stellen die Vorläuferzellen von Osteoblasten, Zementoblasten und Osteoklasten dar. Die Zementoblasten und Osteoblasten sind für die Produktion von Zement bzw. für die organischen Bestandteile der Knochenmatrix verantwortlich. Die pro Tag produzierte Osteoidschicht beträgt etwa 1-2 μm . Die Osteoklasten hingegen sorgen für den Knochenabbau. Sie befinden sich an der Knochenoberfläche in Resorptionsmulden, den sogenannten *Howshipschen Lakunen*, und resorbieren das umliegende Gewebe. Darüber hinaus findet man noch weitere Zellen, wie zum Beispiel Lymphozyten, Monozyten und Makrophagen, die für die immunologische Abwehr zuständig sind.

Das *Wurzelzement* bedeckt die Oberfläche der Zahnwurzel und dient als Befestigung für die desmodontalen Faserbündel. Seine Schichtdicke von durchschnittlich 0,3mm nimmt von zervikal nach apikal zu.

Die Zementozyten bilden den zellulären Anteil dieser Schicht und sind zuständig für die Synthese und Resorption der Grundsubstanz. Hinsichtlich seines Aufbaus und seiner Widerstandskraft unterscheidet man zelluläres von azellulärem Zement [25].

Der *Alveolarknochen* stellt einen weiteren Anteil des Parodonts dar. Er besteht aus mehreren Schichten. Die dem Knochen aufliegende Schicht wird als Periost bezeichnet. Darunter befindet sich eine dicke, kompakte Knochenschicht, die sogenannte Kompakta. Im Inneren des Knochens befindet sich das gefäßreiche Knochenmark (Spongiosa).

Das *gingivale Gewebe* hat Kontakt zur Mundhöhle. Es ist reich vaskularisiert und besteht sowohl aus kollagenen, als auch - zu einem kleinen Anteil - aus elastischen Fasern. Darüber hinaus schützt es die Zähne vor Infektionen, da das Saumepithel mit neutrophilen Granulozyten und Leukozyten infiltriert ist. Nach Redlich et al. [18] führen orthodontische Behandlungsmaßnahmen zu irreversible Veränderungen des gingivalen Gewebes. Diese geweblichen Veränderungen könnten mit ein Grund für Zahnwanderungen nach abgeschlossener orthodontischer Behandlung sein.

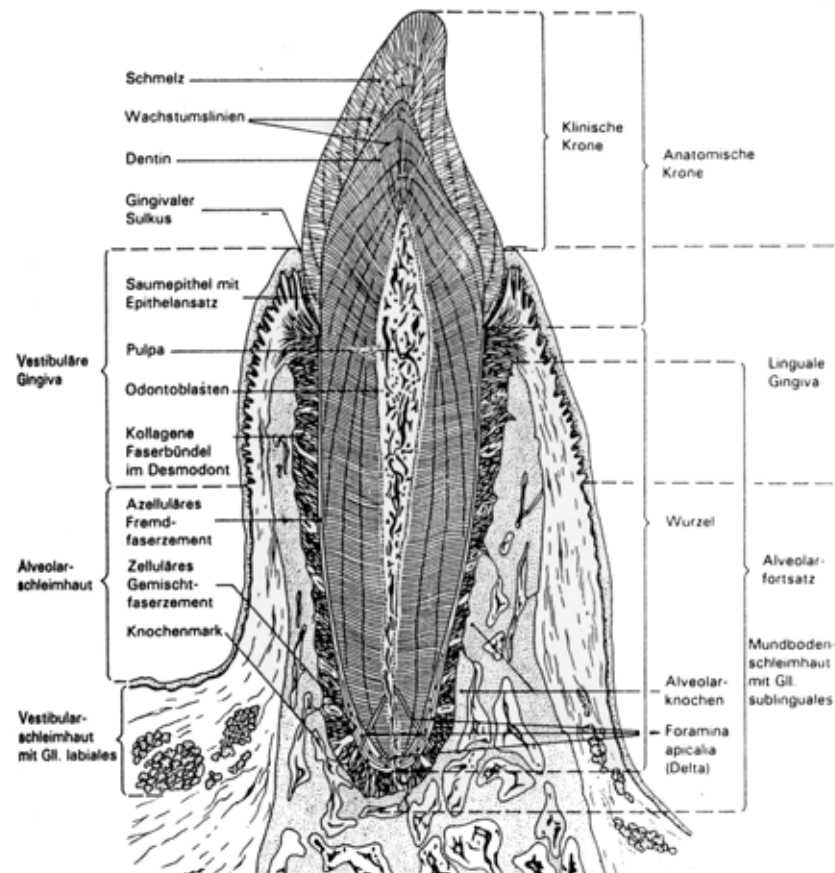


Abb.1: Schematische Darstellung des Parodontiums
(aus [71])

Biologische Grundlagen der Zahnbewegung :

Man unterscheidet drei Arten der Zahnbewegung:

Unter der *physiologischen Zahnbewegung* versteht man eine gewisse Eigenbeweglichkeit der Zähne. Diese Eigenbeweglichkeit der Zähne spielt zum Beispiel bei der Mastikation eine wichtige Rolle.

Bei der *physiologischen Zahnwanderung* handelt es sich um eine Stellungsänderung von Zähnen oder ganzer Zahngruppen, die infolge eines Zahnverlustes oder durch Attrition erfolgt. Man bezeichnet dies als einen kompensatorischen Lückenschluss.

Die *orthodontische Zahnbewegung* ähnelt der physiologischen Zahnwanderung. Im Gegensatz zu dieser wird sie mithilfe des applizierten Kräftesystems erzielt. Die Grundlage für dieses Vorgehen basiert auf biomechanischen Grundsätzen.

2.2 Festsitzende orthodontische Geräte

Wie bereits erwähnt, beruht die Wirkungsweise der festsitzenden Apparaturen auf biomechanischen Grundgesetzen. Der Einsatz von festsitzenden Geräten, den sogenannten Multiband-Apparaturen, ermöglicht in der kieferorthopädischen Behandlung, körperliche Zahnbewegungen durchzuführen. Sie umfassen einen großen therapeutischen Einsatzbereich und finden daher häufig Anwendung. Ihr Hauptindikationsgebiet stellt die körperliche Zahnbewegung, die Rotation gekippter Zähne sowie die Einordnung verlagelter Zähne dar [8,12,31].

Jedoch sind mit einer solchen Behandlung auch Risiken verbunden. So kann es trotz kontinuierlich geringer Kraftapplikation zu Wurzelresorptionen kommen [28], da die Kraftapplikation zu Veränderungen im Parodont führt. Im Desmodont kommt es auf Grund der applizierten Kräfte zur Ausbildung von Druck- und Zugzonen. Die Druckzonen sind durch einen Knochenabbau, die Zugzonen durch einen Knochenaufbau gekennzeichnet (Transformationsgesetz nach Wolff). Diese An- und Abbauvorgänge sind wichtig, damit eine Zahnwanderung überhaupt stattfinden kann.

2.2.1 Historischer Rückblick

Die erste festsitzende orthodontische Apparatur, der sogenannte E-Bogen (Expansions arch), wurde 1887 von dem amerikanischen Kieferorthopäden E.H. Angle entwickelt [60]. Bereits kurze Zeit später führte er das weiterentwickelte Ribbon-arch-System zur orthodontischen Behandlung in die Kieferorthopädie ein. Die Besonderheit bei diesem System bestand darin, dass erstmals Brackets zur Befestigung des Bogens am Zahn integriert wurden. Der Bogen wurde von inzisal eingeschoben und lag den Vestibulärflächen der Zähne mit der breiten Seite an. Im Jahre 1928 veröffentlichte Angle ein weiteres festsitzendes, orthodontisches Gerät, die sogenannte Edgwise-Technik, dessen Grundprinzip bis heute bestehen bleibt [60]. Diese Technik unterschied sich von der bisherigen insofern, als hierbei der rechteckige Bogen nicht mehr in einem hochkantigen, sondern in einem horizontal verlaufenden Bracketschlitz (Slot) eingeführt wurde und somit mit der Schmalseite der Vestibulärflächen der Zähne anlag.

In den folgenden Jahren erfolgte eine Weiterentwicklung der Grundideen von Angle. Das allgemeine Bestreben bestand darin, ein System zu entwickeln, welches möglichst wenig Risiken in sich birgt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden aufgrund der Verwendung von Drähten mit zu hoher Festigkeit bei der Mehrzahl der kieferorthopädisch behandelten Patienten Überlastungsschäden in Art von Wurzelresorptionen gefunden [64].

Bei den heutigen Techniken werden dünnere und elastischere Drähte verwendet, wodurch die Risiken minimiert werden sollen. Die Straight-wire-Technik, welche 1970 von Andrews entwickelt wurde, stellt eine der heute angewandten Techniken dar [62].

Das Prinzip dieser Technik beruht darauf, dass nicht mehr alle Informationen, die für die Korrektur von Zahnfehlstellungen notwendig sind, von Hand in den Drahtbogen gebogen werden müssen, wie es bei der Edgwise-Technik der Fall war, sondern dass die Biegungen erster, zweiter und dritter Ordnung weitgehend in den Brackets integriert sind. So werden zum Beispiel die Biegungen der 1. Ordnung durch die unterschiedliche Dicke der Bracketbasen ersetzt.

Der Vorteil dieser Technik besteht unter anderem darin, dass es beim Wechsel der Bögen zu keinem „Jiggig-Effekt“ mehr kommen kann. Der „Jiggling“-Effekt entsteht auf Grund von Differenzen der einzelnen Bögen untereinander und zählt somit zu den Hauptfaktoren für die Entstehung von Wurzelresorptionen. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass es beim Einsatz dieser Technik zu einer Verkürzung der einzelnen Behandlungssitzungen kommt.

2.2.2 Bestandteile festsitzender Apparaturen

Zur besseren Anschaulichkeit der Funktionsweise und dem Ablauf orthodontischer Behandlungen sollen hier kurz die grundsätzlichen Bestandteile kieferorthopädischer Apparaturen vorgestellt werden.

Jede kieferorthopädische Apparatur, unabhängig von dem verwendeten System, besteht aus Bändern, Attachments, Hilfselementen und Drähten.

Bänder

Unter Bändern versteht man vorgefertigte Metallringe aus 0,1mm starkem Chrom-Nickel-Stahl. Sie besitzen entsprechend dem jeweiligen Zahntyp angepasste Formen. Jedes Band besitzt ein sogenanntes Attachment, an welchem Übertragungselemente wie zum Beispiel Elastics befestigt werden können. Das Band mit seinem Attachment dient somit als Übertragungsmedium für die applizierte Kraft. Nach Diedrich et al. kann die Bandapplikation zur Entstehung von parodontalen Läsionen beitragen, da durch sie das subgingivale Ökosystem verändert wird [39].

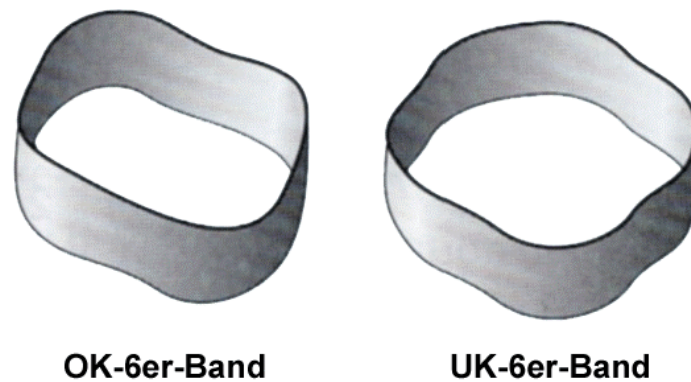


Abb.2 : Schematische Darstellung von kieferorthopädischen Bändern
(aus [80])

Brackets

Die Brackets stellen ebenfalls ein orthodontisches Attachment dar. Sie dienen zur Befestigung der Drähte und können aus unterschiedlichen Materialien wie zum Beispiel rostfreiem Stahl, Kunststoff, Keramik, Titan oder Gold bestehen.

Die Brackets werden mithilfe von Composite-Materialien auf die Oberfläche der Zähne (bukkal oder lingual) aufgeklebt. Der horizontale Schlitz, der sogenannte Slot, dient zur Aufnahme des Bogens. In dem Vertikalschlitz können Aufrichtfedern befestigt werden. Das Bracket besteht aus einer Basis, vier Flügeln, die zur Aufnahme von Ligaturen dienen, und einem Häkchen zur Befestigung von Gummizügen.

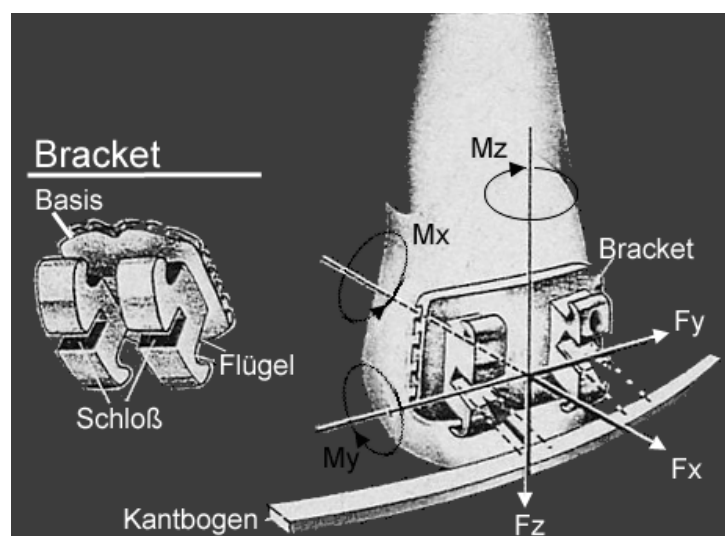


Abb.3: Das Kräftesystem im Bracket
(aus [34])

Hilfselemente

Unter Hilfselementen versteht man verschiedenartige Behelfe, die zusätzlich an die bereits befestigte Apparatur appliziert werden können, ohne dass der Bogen dafür entfernt werden muss. Elastics, Alastics sowie Zug- und Druckfedern fallen unter die Kategorie der Hilfselemente.

Drähte

Die kieferorthopädischen Drähte stellen aktive Elemente der festsitzenden orthodontischen Apparaturen dar. Sie sind in der Lage, Kräfte und Drehmomente auf die Zähne zu übertragen und vermögen diese dadurch zu bewegen. Zu den gebräuchlichen Drahtmaterialien in der orthodontischen Behandlung gehören Edelstahl-, Nickel-Titan-, Chrom-Kobalt- sowie Titan-Molybdän-Legierungen. Die Klassifizierung der Drähte erfolgt jedoch nicht nur nach Art ihrer Materialzusammensetzung, sondern auch nach ihrer Form und Stärke [3,33]. Gewöhnlich kommen superelastische Bögen zur Anwendung.

2.2.3 Phasen der orthodontischen Zahnbewegung

Nach *Reitan* wird die orthodontische Zahnbewegung in zwei Perioden unterteilt [69]. Die erste Periode gliedert sich hierbei in die sogenannte initiale und intermediäre Phase. Die Initialphase erstreckt sich über einen Zeitraum von etwa 5 Tagen nach Kraftapplikation. In dieser Phase wird eine hohe Bewegungsgeschwindigkeit der Zähne erzielt. Gleichzeitig erfolgt eine maximale Kompression in den desmodontalen Druckzonen, sowie eine Verformung des Alveolarknochens.

In der intermediären Phase kommt es zu einem vorübergehenden Stillstand der Zahnbewegung. Diese Phase dauert ungefähr zwei Wochen an. Der Bewegungsstillstand der Zähne resultiert aus einer Zirkulationsstörung, die durch den sogenannten „Hyalinisierungsprozess“ hervorgerufen wird. Die Hyalinisierung ist gekennzeichnet durch das Verschwinden der Bindegewebszellen und Osteoklasten und entspricht einer lokalen Nekrose.

Der physiologische Abbauprozess des Knochens kann nicht mehr stattfinden, da es zu einem gestörten Abtransport der Gewebebestandteile über die desmodontalen Gefäße kommt.

In der zweiten Periode, der sogenannten Konstanzphase, dominieren die Remodellationsprozesse. Während dieser Zeit läuft eine gleichmäßige Zahnbewegung ab. Im Idealfall wird eine Zahnbewegung von 2mm pro Monat erzielt.

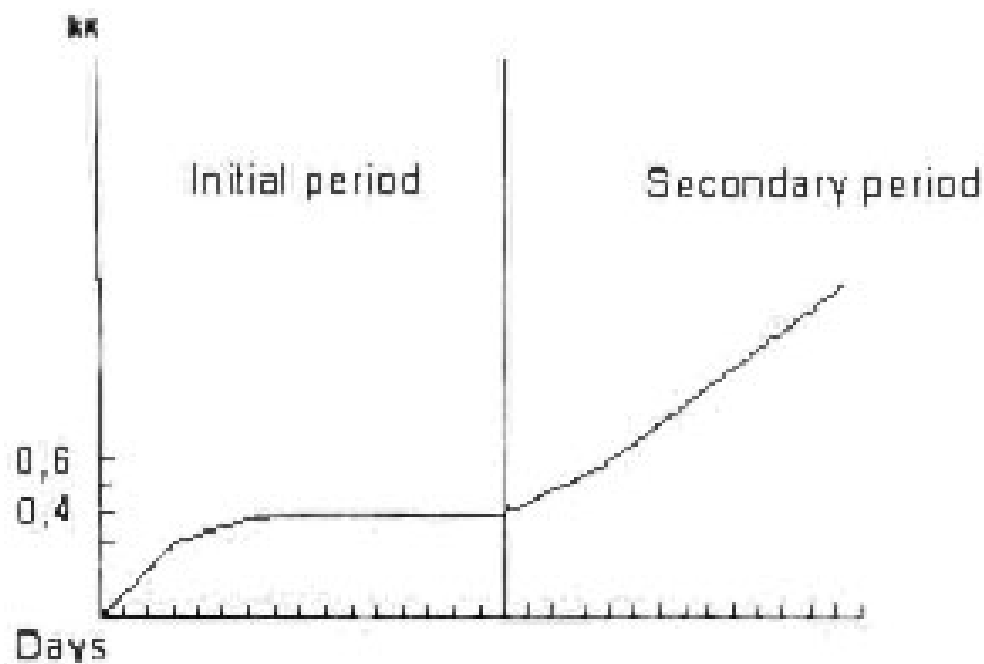


Abb. 4 : Perioden der orthodontischen Zahnbewegung (aus [69])

2.3 Spannungsverteilung im Desmodont

Die kieferorthopädisch angewandeten Kräfte induzieren in der initialen Phase der Kraftapplikation einen lokalen Prozess, der alle charakteristischen Entzündungsanzeichen beinhaltet: rubor (Rötung), calor (Hitze), dolor (Schmerz), tumor (Schwellung) und functio laesa (Funktionseinschränkung).

Bosshardt et al. stellte 1998 in seiner Studie die gewagte Behauptung auf, dass die Kieferorthopädie eine zahnmedizinische Fachdisziplin sei, welche die Vorgänge des Entzündungsprozesses zur Behebung von funktionalen und ästhetischen Problemen nutze. Der Entzündungsprozess, der elementar für die Zahnbewegung sei, stelle ebenfalls einen wesentlichen Faktor für das Auftreten von Wurzelresorptionen dar [106].

Bereits in den frühen 50iger Jahren berichtete unter anderem Reitan über die reversiblen und irreversiblen parodontalen Gewebeveränderungen während einer orthodontischen Therapie [6,7,9].

2.3.1 Veränderungen auf zellulärem Niveau

Durch die Ausübung therapeutisch wirksamer Kräfte treten im Desmodont und in den Markgeweben Zirkulationsveränderungen sowie Gewebeab- und Gewebearbeit auf. Es kommt somit zu einer Verschiebung des zellulären Gleichgewichtes [39,43].

Die Zirkulationsveränderungen kennzeichnen sich durch eine Hyperämie der Gefäße, eine Veränderung der Gefäßdurchlässigkeit, einen Anstieg der Exsudationsvorgänge sowie eine extravasale Flüssigkeitsansammlung. Die vermehrte Flüssigkeitsansammlung im Gewebe führt im Desmodont zu einer Auflockerung bzw. Auflösung der desmodontalen Fasern.

Infolge dieser Auflockerung wird eine Verlagerung des Zahnes ermöglicht, so dass der Parodontalspalt auf der einen Seite erweitert und auf der anderen Seite verengt wird. Hierbei liegt die Verengung in Richtung der angestrebten Zahnbewegung.

Im Bereich des verengten Parodontalspalt, in der sogenannten Druckzone, entstehen durch Erhöhung des Gewebedruckes optimale Bedingungen für einen osteoklastischen Abbau. Die Knochenfresszellen gelangen über die Blutbahn an den

Ort des Geschehens und beginnen dort Knochen, Zement und Fasern abzubauen. Das umliegende Gewebe weist nekrotische Bereiche auf [10].

Im erweiterten Parodontalspalt werden hingegen die Gewebsneubildungen, vor allem die Knochenbildung, begünstigt. Im Bereich der Zugzone kommt es zu einer Einwanderung von Osteoblasten. Die Vorgänge, bestehend aus Resorption und Apposition, führen zu einer Remodellation des Knochens.

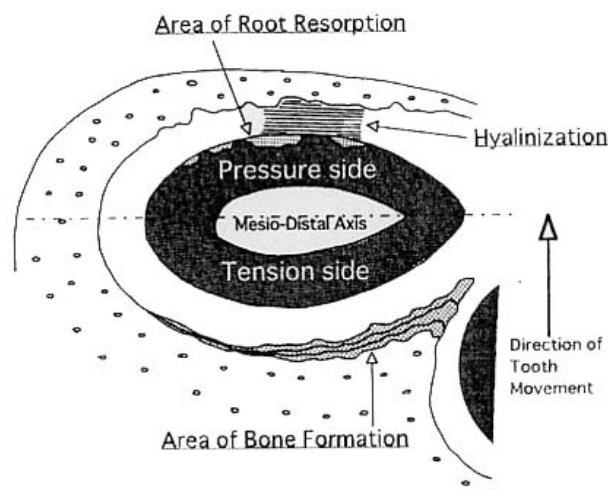


Abb. 5: Schematische Darstellung der Wurzelresorptionen (aus [75])

Die durch kieferorthopädische Kraftapplikation bedingte Flüssigkeitsbewegung im Gewebe, hat eine Änderung des Membranpotentials zur Folge. Das geänderte Membranpotential erhöht die Osteo- und Fibroblastenaktivität und führt zu Wechselwirkungen zwischen Zellmembran und ionischen Makromolekülen.

Zu den ionischen Makromolekülen gehören unter anderem die Proteoglykane. Sie werden durch die Druckapplikation aktiviert und rufen ihrerseits eine Zellaktivierung hervor. Die Stimulation der Proteoglykane bleibt über die Zeit der Druckapplikation erhalten, was die Wirkungsweise herausnehmbarer Geräte erklärt, selbst wenn die „gewünschte Tragezeit“ nicht erreicht wird.

Durch Dehnung des Parodontiums kommt es zur Reizung von Nervenfasern und somit zur Ausschüttung von Neuropeptiden. Diese Neuropeptide verfügen über einen vasodilatatorischen Effekt, wodurch es zur Einwanderung von Leukozyten kommt.

Sie setzen Zytokine frei, die undifferenzierte Zellen zur Proliferation anregen und zur Stimulation der Alveolarzellen führen. Die inflammatorischen Zytokine IL1- β (Interleukin) und IL-6 spielen eine wichtige Rolle bei der Knochenresorption [43].

Auf der Druckseite kommt es durch Induktion der Zytokine zur Osteoklasteneinwanderung und somit zum Knochenabbau. Das Desmodont reagiert darauf mit einer Entzündungsreaktion, was eine Freisetzung von Prostaglandinen und Leukotrienen zur Folge hat. Diese Entzündungsinduktoren steuern die lokale Entzündung und die Leukozytenaktivität. Brudvik und Rygh [107] stellten in ihrer Studie fest, dass es bei Wurzelresorptionen zur Elimination der hyalinen Zone kommt. Eine sehr wichtige Rolle scheinen hierbei undifferenzierte Odontoklasten oder Osteoklasten zu spielen. Sie werden durch das sterile nekrotische Gewebe, welches durch orthodontische Kraftapplikation hervorgerufen wird, angelockt. In Folge der Einwirkung mechanischer Stimuli kommt es innerhalb weniger Stunden zur Differenzierung der Zellen in Odontoklasten oder Osteoklasten [108].

Das Heranreifen und die Aktivität der Osteoklasten wird über das RANKL/RANK/Osteoprotegrin-System maßgeblich gesteuert.

Kofaktoren, wie der Tumor-Nekrose-Faktor alpha (TNF), die Interleukine IL-1, -6 und -17, das Prostaglandin E2 (PGE2) sowie die Parathyroid-hormone related peptide (PTHrp) führen zur Expression von RANKL¹ auf Fibroblasten und T-Lymphozyten. RANKL stimuliert durch Interaktion mit seinem Rezeptor RANK², der sich auf der Zelloberfläche von Osteoklastenvorläufern befindet, die Differenzierung zu reifen Osteoklasten [63,66].

Fukushima et al. [105] untersuchten in ihrer Studie, die Wirkung von RANKL in Hinsicht auf Wurzelresorptionen. Die Ergebnisse ihrer Arbeit zeigten, dass es nur im Falle von Wurzelresorptionen zur Expression von RANKL durch die Zellen des parodontalen Ligamentes kam. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich schließen, dass

¹ RANKL

² RANK

RANKL einen regulatorischen Einfluss auf die Osteoklastogenese und somit auf den Resorptionsprozess hat.

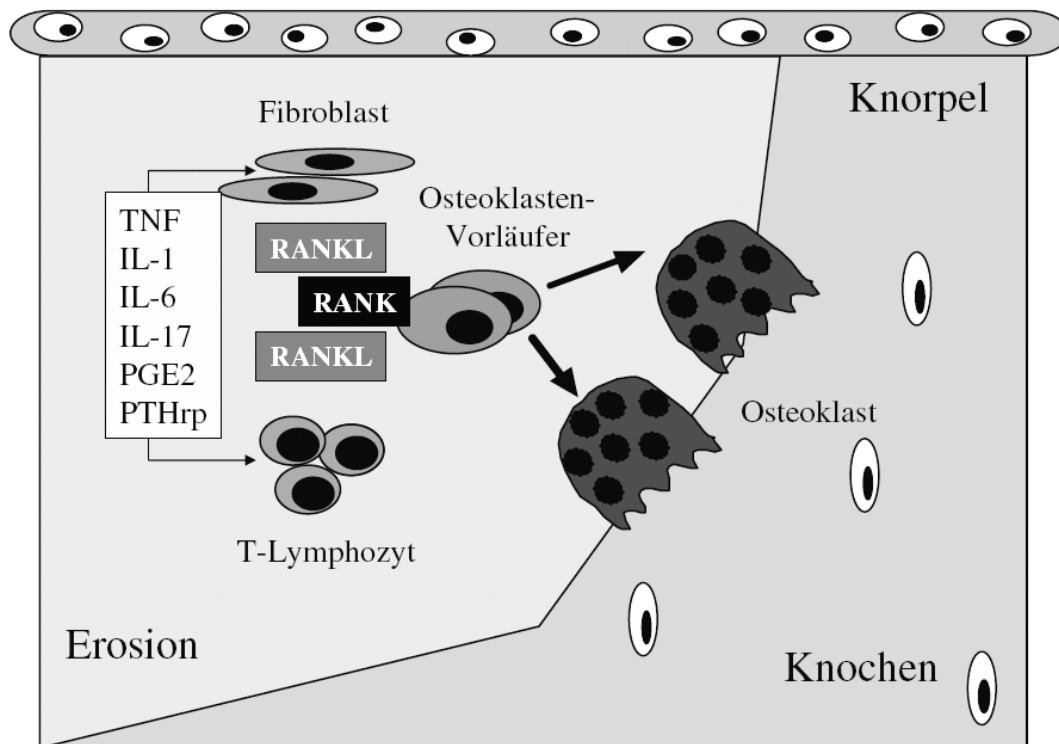


Abb. 6: Modell des Mechanismus der lokalen Knochenerosion

2.4 Wurzelresorptionen

Im Falle des Milchzahngebisses handelt es sich hierbei um einen physiologischen Vorgang. Nur wenn dieser komplikationsfrei abläuft, kann ein ungehinderter Durchbruch der bleibenden Zähne gewährleistet werden [82,101].

In allen anderen Fällen dient der Begriff Wurzelresorption zur Beschreibung eines pathologischen Prozesses.

Phillips [82] und Shafer et al. [100] erwähnen in ihren Studien verschiedene Faktoren, die zu Wurzelresorptionen an bleibenden Zähnen führen können. Oftmals entstehen Resorptionen der Zahnhartsubstanz aufgrund periapikaler oder parodontaler Entzündungserscheinungen. Weitere Ursachen können okklusale

Traumata, Zysten oder Tumore sowie individuelle Faktoren (u.a. Genetik, Medikamenteneinnahme) oder orthodontische Behandlungen sein.

In der kieferorthopädischen Behandlung stellen die Wurzelresorptionen eine gefürchtete Nebenwirkung dar. Sie treten meist innerhalb der ersten sechs Monate nach Therapiebeginn auf [28]. Die Resorptionen können sich sowohl apikal, an der Wurzelspitze, als auch lateral, an den Wurzelflächen, manifestieren [28,44].

Nach Brezniak et al. [104] unterscheidet man drei verschiedene Schweregrade von Wurzelresorptionen:

1. *Oberflächliche Resorptionen:*

In diesem Fall ist nur die oberflächliche Zementschicht angegriffen, welche sich später jedoch wieder vollständig regeneriert.

2. *Resorptionen im Dentin mit Reparatur:*

Die Resorptionen haben hierbei nicht nur zu einer Zerstörung des Zementes, sondern auch des oberflächlichen Dentins geführt. Die dadurch entstandenen Lakunen werden meist durch Zementanlagerung wieder repariert.

3. *Apikale Wurzelresorptionen:*

In diesem Fall ist keine Regeneration durch zementale Anlagerung zu erwarten, sondern es liegt ein irreversibler Verlust von Zahnhartsubstanz an der Wurzelspitze vor.

Bestimmte Faktoren wie zum Beispiel kleine, pipettenförmige Wurzeln [11,57], genetische Prädispositionen [54,102], Erkrankungen [48], vorausgegangene Zahntraumata [78,82] und das Alter des Patienten bei Therapiebeginn [78] können das Risiko für ihr Auftreten erhöhen. Linge und Linge [78] stellten in ihrer Studie fest, dass Patienten, die nach ihrem elften Lebensjahr mit der kieferorthopädischen Therapie begonnen hatten, anfälliger für Wurzelresorptionen waren, als Patienten, die ihr elftes Lebensjahr noch nicht erreicht hatten. Des weiteren scheinen Patienten mit langen Wurzeln häufiger von Wurzelresorptionen betroffen zu sein, als Patienten mit normaler Wurzellänge [11].

Aber auch therapiebedingte Faktoren wie die Therapiedauer [42], die Richtung der Zahnbewegung [30,32], zu große oder inkonstante Kräfte, das „Jiggling“, [11,51,73,77] und die für die Behandlung verwendeten Apparaturen [50,51] werden in der Literatur hinsichtlich ihrer möglichen schädigenden Wirkung diskutiert. Sowohl die Ergebnisse aus der Studie von Dermaut und De Munck [52] als auch die Ergebnisse aus der Studie von McFadden et al. [53] erbrachten einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Intrusion von Zähnen und dem Auftreten von Wurzelresorptionen.

Bei Wurzelresorptionen wird zwischen der indirekten und der direkten Knochenresorption unterschieden.

Die indirekten Knochenresorptionen treten häufig bei zu großen, unphysiologischen Kräften auf und sind durch einen unterminierenden Resorptionsprozess, der von den Knochenmarksräumen der Spongiosa ausgeht, gekennzeichnet [69,92]. Im Bereich der Druckzonenmaxima kommt es durch Erliegen des Blutflusses in den Arteriolen zu einer Nekrosebildung der desmodontalen Anteile. Die Folgen dieser lokalen ischämischen Reaktion sind Entzündungen, Schmerzen sowie die Bildung hyalinisierter Bereiche [17,61,83]. Die Hyalinisierung beinhaltet ein Verschwinden der Bindegewebszellen und Osteoklasten. Dieser Vorgang wird zum einen durch die Kompression des parodontalen Ligamentes, zum anderen durch zu hohe mechanische Spannungen hervorgerufen. Die daraus resultierende Nekrose stellt den induzierenden Reiz zur Knochenresorption dar. Sobald der unterminierende Resorptionsprozess das parodontale Ligament erreicht und die hyalinisierten Bereiche resorbiert hat, wird der Zahn aufgrund der geweiteten ligamentären Strukturen lockerer und beginnt zu wandern [69]. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt eine Knochenapposition auf der Zugseite.

Bei der direkten Knochenresorption geht der Resorptionsprozess direkt von der Lamina dura des Alveolarknochens aus. In den Druckzonen führt der Resorptionsprozess zu einem Gewebeabbau, in den Zugzonen zu einer Knochensubstanzanlagerung. Durch den Einfluss der kieferorthopädischen Kräfte kommt es bereits innerhalb der ersten Tage durch die Einwanderung von Osteoblasten im Bereich der Zugzonen zur Ausbildung eines Osteoidsaumes. Auf der Druckseite hingegen erfolgt durch die Einwanderung der Osteoklasten, die sich in den *Howshipschen* Lakunen befinden, ein Knochenabbau [40].

Eine effektive und schonende Zahnbewegung kann nur dann eintreten, wenn kleine Kräfte wirken. Diese sollten unterhalb des Kapillardrucks bei 0,2-0,3 N (20-30g) pro cm^2 Wurzeloberfläche liegen, sodass der Blutfluss im Parodontalspalt aufrechterhalten werden kann und die Osteoklasten an ihren Wirkort gelangen können. Eine Ischämie im Bereich der Druckzonen sollte deshalb unterbleiben [93]. Auf Grund dieser remodellierenden Prozesse kann die Bewegung der Zähne in Bereichen erfolgen, die ursprünglich außerhalb der natürlichen Alveolarfortsatzbegrenzungen lagen.

Melson et al. stellten in ihrer Studie die Hypothese auf, dass es sich bei der direkten Resorption um eine Aktivierung eines Remodellierungsprozesses handelt, wohingegen die indirekte Resorption die Reparatur eines Traumas darstellt [24].

Inwieweit eine direkte oder indirekte Knochenresorption stattfindet ist von der Spannung-/ Druckverteilung im parodontalen Ligament abhängig. Die Verteilung von Spannung und Druck in den ligamentären Strukturen wird durch die Kraftgröße, durch die Knochenoberfläche und durch die Krafrichtung beeinflusst [7,69,94].

Bei kippenden Bewegungen resultieren Druckmaxima insbesondere in den apikalen und marginalen Bereichen der Alveole, während translatorische Bewegungen entlang der Alveolenwand infolge einheitlicher Kraftapplikationen erzeugt werden [95].

Charakteristika der Wurzelresorptionsarten:

Die lateralen Wurzelresorptionen stellen sich histologisch als Resorptionslakunen an den Wurzeloberflächen dar. Im Gegensatz zu den apikalen Resorptionen sind sie jedoch reversibel und werden nach einigen Monaten wieder mit zellulär-fibrolärem Zement aufgefüllt [17,26,28]. Mehrere Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits zwei Wochen nach Abschluss der Kraftapplikation der Reparaturprozess mit der Bildung von initialem, azellulärem Zement beginnt. Die Ablagerung von zellulärem Zement erfolgt hingegen in einem fortgeschritteneren Stadium der Heilung [13].

Die apikalen Wurzelresorptionen sind sowohl histologisch als auch röntgenologisch erkennbar [15,26,27,28]. Es handelt sich hierbei um ein irreversibles Geschehen, welches jedoch auch bei nicht orthodontisch behandelten Patienten auftreten kann [4,5,59,61].

Bereits 1954 untersuchten Massler und Malone das Resorptionsverhalten sowohl an orthodontisch, als auch an nicht orthodontisch behandelten Zähnen. Die Resorptionserscheinungen betrafen bei den orthodontisch behandelten Patienten 90%, aber auch in 80% der nicht orthodontisch behandelten Kontrollpatienten ließen sich Wurzelresorptionen feststellen [37]. Die Tatsache, dass Patienten, die sich in orthodontischer Behandlung befinden, auf Wurzelresorptionen hin untersucht werden, ist mit dafür verantwortlich, dass die Prävalenz für Wurzelresorptionen bei ihnen höher ist, als bei der übrigen Population.

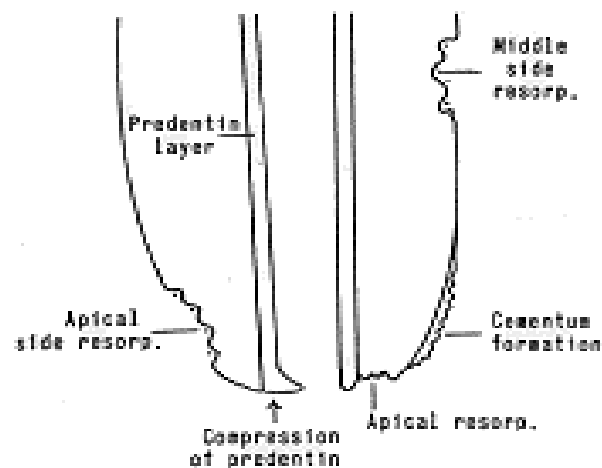


Abb. 7: Darstellung der Resorptionsstellen

(aus [17])

Die Gradierung von Wurzelresorptionen erfolgt nicht nur nach ihrem Schweregrad, sondern auch nach der Verkürzung ihrer Wurzellänge.

Grad 0 liegt vor, wenn keine Wurzelresorption stattgefunden hat. Die Morphologie der Wurzeloberfläche ist intakt und die apikale Begrenzung ist durchgehend.

Grad 1 verfügt über kleine apikale Erosionen, die aber noch zu keiner Verkürzung der Wurzellänge geführt haben.

Grad 2 beinhaltet eine schwache Verkürzung der Wurzellänge.

Grad 3 zeigt eine deutliche Veränderung der Wurzellänge. Dieser Grad ist erreicht, wenn etwa $\frac{1}{4}$ der ursprünglichen Wurzellänge abgebaut worden ist.

Grad 4 liegt vor, wenn die Hälfte der ursprünglichen Wurzellänge verlustig gegangen ist [17].

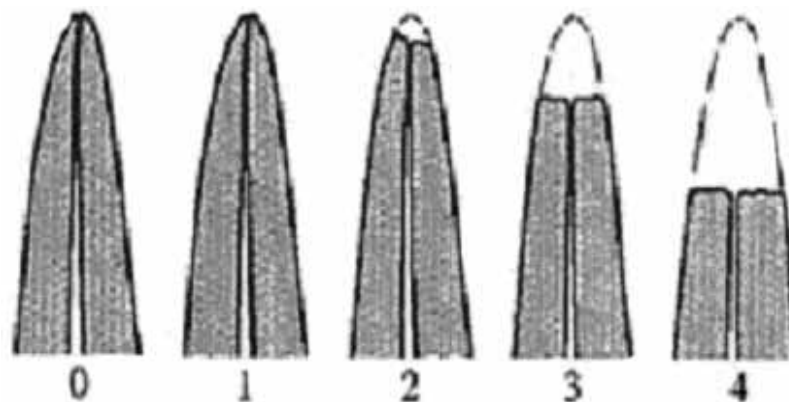


Abb. 8: Schematische Darstellung der Gradierung von Wurzelresorptionen (aus [20])

2.4.1 Messungen zum Wurzelresorptionsverhalten

Die Untersuchungen zum Wurzelresorptionsverhalten können in In-vivo- und in In-vitro-Untersuchungen erfolgen.

In-Vivo-Untersuchungen

Die In-vivo-Untersuchung erfolgte in dieser Studie an extrahierten Zähnen. Die Zahnentfernung erfolgt hierbei aus therapeutischen Gründen, oftmals aufgrund eines Platzmangels im jeweiligen Kiefer.

Durch die histologische Aufbereitung und anschließende mikroskopische Untersuchung ist es möglich, sowohl kleine apikale als auch laterale Abbauvorgänge darzustellen [58]. Zudem sind die Resorptionsstellen in mehreren Ebenen metrisch erfassbar und somit objektiver interpretierbar.

3. Problemstellung

Trotz zahlreicher Verbesserungen orthodontisch wirksamer Geräte, stellen auch heutzutage Zahnhartsubstanzdefekte, ausgehend von zu hohen Kräften, eine andauernde unterschwellige Gefahr dar. Insbesondere die steigende Anzahl kieferorthopädischer Behandlungen lassen die Thematik der schädigenden Wirkung ausgehend von orthodontischen Apparaturen hochaktuell werden. Jedoch konnten bis zum heutigen Zeitpunkt die kausalen Zusammenhänge zwischen Kraftapplikation und Wurzelresorption nicht vollständig beantwortet werden.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der histologischen Untersuchung pathologischer Wurzeloberflächenveränderungen nach initialer orthodontischer Behandlung. Hierfür wurden die zu untersuchenden Zähne für vier Wochen mit 14er Twistflex und 16er Sentalloy-Drähten legiert und anschließend nach ihrer Extraktion histologisch aufbereitet.

Die zu erwartenden Wurzeloberflächenveränderungen werfen eine Reihe von Fragen auf, die im Laufe dieser Studie zu klären sind. Hierbei gilt es folgende Fragen zu beantworten:

Inwieweit führt die Behandlung mit superelastischen Nivellierungsbögen, deren Kraftabgabe unterhalb des kapillaren Blutdrucks liegen soll, zur Bildung von Wurzelresorptionen? Reicht die Dauer der initialen Behandlungsphase zur Bildung resorptiver Veränderungen aus?

Da es sowohl im Sinne des Patienten als auch des Behandlers sein sollte, eine möglichst komplikationsarme Behandlung durchzuführen, bedarf es einer eingehenden Untersuchung der Risiken und Gefahren ausgehend von der orthodontischen Behandlung.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Folgen der kieferorthopädischen Therapie im Sinne von Hartsubstanzdefekten histologisch zu untersuchen.

4. Material und Methode

Um das Resorptionsverhalten von Zähnen bei Kraftapplikation zu erfassen, wurden diese, nach Einwilligung der Patienten, zunächst für vier Wochen orthodontisch behandelt. Die Behandlung erfolgte nach der von Andrews entwickelten Straight-wire-Technik [62]. Die Zähne wurden hierfür mit 14er Twistflex und 16er Sentalloy-Drähten bebändert und anschließend nach Ablauf der vier Wochen extrahiert.

Die in dieser Studie untersuchten Patienten befanden sich alle am Anfang ihrer kieferorthopädischen Behandlung. Ihnen gemeinsam war eine Zahnfehlstellung, die die Indikation für eine kieferorthopädische Behandlung stellte. Des Weiteren lag bei den Patienten ein erhöhter Platzmangel vor, der zwangsläufig die Extraktion der ersten Prämolaren im Rahmen der Therapie zur Folge hatte.

Nach Extraktion der Zähne wurden diese histologisch aufbereitet und anschließend lichtmikroskopisch auf Wurzeloberflächendefekte hin untersucht. Hierbei wurden die ermittelten Defekte sowohl nach ihrer Topografie, als auch nach ihren Längen- und Tiefenausdehnungen beurteilt.

4.1 Auswahl der Zähne

In der Studie wurden 26 erste Prämolaren untersucht. Die zu untersuchenden Zähne wurden konsekutiv in einem Zeitraum von mehreren Monaten in der kieferorthopädischen Abteilung der Universitätsklinik Düsseldorf sowie in der kieferorthopädischen Praxis von Herrn Dr. F. Kirsch in Bergheim gesammelt. Das Alter der Patienten lag zwischen 14 und 16 Jahren. Alle untersuchten Zähne wiesen weder Füllungen noch Kronen auf. Sie waren parodontal gesund, normal ausgebildet und zeichneten sich durch ein abgeschlossenes Wurzelwachstum aus. Um eine einheitliche Aussage über die Auswirkungen der Kraftapplikation machen zu können, erfolgte die Untersuchung in dieser Studie ausschließlich an Prämolaren. Von diesen stammten 12 von weiblichen und 5 von männlichen Probanden ab. Insgesamt wurden 17 Oberkiefer- und 9 Unterkieferprämolaren auf ihr Resorptionsverhalten hin überprüft.

4.2 Versuchsaufbau

4.2.1 Herstellung der histologischen Schnitte

Die histologische Aufbereitung der Zähne erfolgte in diesem Versuch mithilfe der Trenn-Dünnschliff-Technik nach Donath [76]. Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung von 70 µm dicken Schliffen, die zur histologischen Diagnostik von nicht schneidbaren Geweben dienen. Insgesamt wurden mittels horizontaler Schnittrichtung 321 apikokoronale Dünnschliffe der Zahnwurzeln angefertigt. Die Schnitte wurden in etwa 1mm-Abständen von der Wurzelspitze bis zum zervikalen Anteil des Zahnes nacheinander durchgeführt und anschließend auf eine durchschnittliche Dicke von 70µm abgeschliffen. Pro Zahn konnten somit in der Regel 12 Schnitte hergestellt werden. Nur bei Zähnen, die sich durch eine besonders lange Wurzel kennzeichneten, konnten 13 Schnitte pro Probe erreicht werden. Die Schnitte mit den Nummern 1-4 stellten den apikalen Wurzelanteil, die Schnitte 5-8 den mittleren und die Schnitte 9-12/13, den zervikalen Zahnwurzelanteil dar.

4.2.2 Fixierung

Nach Extraktion der Zähne wurden diese zunächst für mehrere Tage in 10%igem neutral gepufferten Formalin fixiert und anschließend mit fließendem Leitungswasser für 30 min gewässert.

4.3 Präparatherstellung

Um Dünnschliffsschnitte von Hartgeweben herstellen zu können, müssen diese zuerst dehydriert werden. Die zu untersuchenden Hartgewebsstücke wurden nach Abtrennung der Krone in ein Gazesäckchen verpackt und in einer aufsteigenden Alkoholreihe entwässert (70%, 90%, 96% und 100% Alkohol).

Die Entwässerungszeiten sind abhängig von der Präparatdicke und beliefen sich in der vorliegenden Arbeit auf 24 bis 28 Stunden. Anschließend erfolgte stufenweise die Kunststoffinfiltration mit einem Kunststoff-Alkohol-Gemisch. Die Kunststoffinfiltration der Präparate erfolgte in 5 Stufen. Hierbei zeichneten sich die einzelnen Stufen

durch eine fortlaufende, ansteigende Technovit- und eine absteigende Alkoholkonzentration aus.

Stufe	Technovit ¹	Alkohol
Nr. 1	30 %	70%
Nr. 2	70%	30%
Nr. 3	50%	50%
Nr. 4	100%	0%
Nr. 5	100%	0%

Die Verweildauer der Präparate betrug etwa 24 Stunden pro Stufe.

Einbettung und Polymerisation

Das kunststoffinfiltrierte Gewebe wurden in industriell vorgefertigte Einbettmulden gegeben. Zur Einbettung wurde der lichthärtende Kunststoff Technovit 7200VIC² verwendet. Nach Einbringen des Kunststoffes in die Einbettmulden erfolgte die Polymerisation des Kunststoffes unter Belichtung (Lampenlicht / Wellenbereich 400-500nm) für 24 Stunden.

¹ Fa. Kulzer, Wehrsheim

² Fa. Kulzer, Wehrsheim



Abb. 9: Exakt- Lichtpolymerisationsgerät¹
(aus [70])

4.4 Blockvorbereitung

Nach der Aushärtung des Kunststoffes wurde der Gewebekblock aus der Einbettform entfernt und mit Technovit 4000² auf einen Objektträger aufgebracht. Dabei war darauf zu achten, dass der Kleber auf der nicht histologisch zu untersuchenden Fläche appliziert wurde.

4.4.1 Präparation des Gewebekblockes

Der Gewebekblock wurde im Mikroschleifsystem angeschliffen, bis alle zu untersuchenden Gewebeabschnitte an der Oberfläche sichtbar waren. Anschließend wurde ein angerauter Objektträger auf die zu untersuchende Blockoberfläche geklebt. Hierfür wurde der Kleber Technovit 7210 VLC³ verwendet. Der Klebevorgang erfolgte mithilfe einer Präzisionsklebepresse, um eine gleichmäßige und dünne Klebeschicht zu erzielen. Die Polymerisation erfolgt unter Lichteinwirkung

¹ Fa. Kulzer, Wehrheim

² Fa. Kulzer, Wehrheim

³ Fa. Kulzer, Wehrheim

innerhalb von 10 min. Im Anschluss wurde die Stärke der Klebeschicht ermittelt, um eine einheitliche Gewebeschichtstärke bei allen Präparaten zu erhalten.

Mit dem Exakt-Mikro-Schleifsystem¹ erfolgte dann die Herstellung der Trennschnitte. Die Schnittdicke lag im Durchschnitt bei 100 μm . Mit dem Mikroschleifsystem wurden die Präparate auf eine durchschnittliche Dicke von etwa 70 μm abgeschliffen und anschließend mit Sandpapier poliert.



Abb. 10: Exakt-Mikro-Schleifsystem
(aus [70])

4.4.2 Färbung

Die Färbung der Präparate erfolgte mit einer Toluidinblau-Färbung. Die basische Toluidinfärbung eignet sich als Übersichtsfärbung. Sie zeichnet sich durch ihre Einfachheit und gute Standardisierung aus und bietet Differenzierungsmöglichkeiten durch metachromatische Farbeffekte. Mineralisierte Hartgewebe bleiben ungefärbt bis blassblau, Zellen, Zellkerne, Osteoidsäume, Kittlinien, Kollagenfasern färben sich blau und die Mastzellgranula rotviolett [39,65, 67].

¹ Fa. Kulzer, Wehrheim

Herstellung der Färbelösung:

Toluidine blue ¹	1g in 100ml Aqua dest. gelöst, 6 Teile
Natriumkarbonat ²	2,5g in 100ml Aqua dest. gelöst, 3 Teile
70% iger Ethylalkohol	1 Teil

Vorgehen :

1. Schliff abwischen mit Aceton-Alkohol (1:1)
2. 5 Min. bewegen in 30%igem H₂O₂
3. gut abspülen mit Leitungswasser
4. 15 Min. färben in Toluidinblau-Lösung
5. Abspülen mit Leitungswasser
6. Schliff trocknen und differenzieren mit Aceton-Alkohol

¹ Serva 36693

² Merck 636

4.5 Lichtmikroskop

Es wurde ein Lichtmikroskop des Typs Orthoplan¹ verwendet. Zur Darstellung der Oberflächentopographien und -morphologien wurden verschiedene Objektive benutzt (1/0.04; 10/0.30; 25/0.08).

Um die Wurzelresorptionsstellen metrisch und topografisch erfassen zu können wurden von jedem Präparatsschnitt Aufnahmen mit einer Digitalkamera² gemacht. Die für diese Arbeit gemachten Aufnahmen zur Darstellung der Oberflächentopographie wurden mit dem kleinsten Objektiv (1/0.04) erstellt. Die Aufnahmen, die zur Messung der Resorptionsdefekte genutzt wurden, wurden mit den Objektiven 10/0.30 und 25/0.08 gemacht.

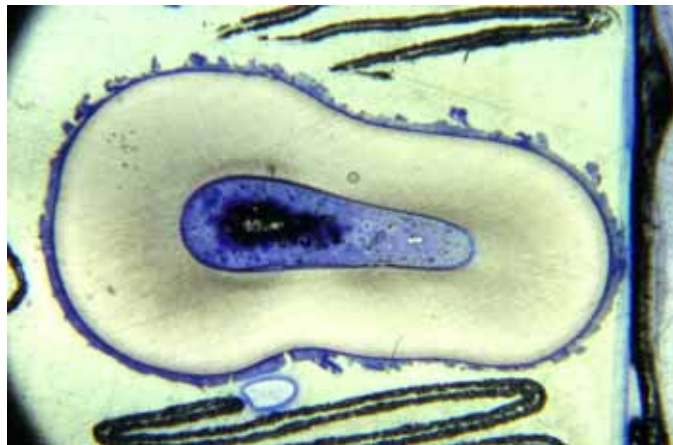


Abb. 11: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Zahnquerschnitts

¹ Orthoplan, Fa. Leitz, Wetzlar

² Nikon D1, Fa. Nikon, Neuss

4.6 Versuchsablauf

4.6.1 Messung der Resorptionsstellen

Objektmikrometer

Zur Bestimmung der Längen und Breiten der Wurzelresorptionen wurde ein Objektmikrometer¹ verwendet. Auf diesem befindet sich eine 1mm lange, aus 100 Teilstrichen bestehende Skala. In diesem Versuch erfolgte die Längen- und Tiefenmessung computergestützt an Hand digitaler Aufnahmen. Da das Objektmikrometer hierbei zur Kalibrierung der Messsoftware diente, wurden sowohl digitale Aufnahmen von den Resorptionsdefekten als auch von dem Objektmikrometer, mit den jeweiligen Objektiven 10/0.30 und 25/0.08, angefertigt. Anschließend wurden die Aufnahmen in einen Rechner eingelesen.



Abb. 12: Objektmikrometer

¹ Objektmikrometer (MBM 14100) Nikon, Neuss

4.7 Computergestützte Messung der Resorptionsstellen

Die Messung der Resorptionsstellen erfolgte computergestützt mit dem Programm Emazing Picture Measurement¹ [81]. Mit diesen in Visual Basic 6 Professional realisierten Programm ist es möglich, die Ausmaße der verschiedenen Resorptionsstellen an Hand digitaler Aufnahmen sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zu vermessen. Die digitalen Aufnahmen des Objektmikrometers dienten hierbei zur Kalibrierung der Messsoftware, um die Pixelanzahl in ein metrisches Maß umrechnen zu können. Die Aufnahmen wurden mit den Objektiven 10/0.30 und 25/0.08 gemacht. Entsprechend des verwendeten Objektivs wurde die zugehörige Kalibrierung benutzt. Die auf den Aufnahmen dargestellten Resorptionsstellen wurden am Computer soweit vergrößert, dass die Begrenzungen der Lakunen gut zu erkennen waren. Zur Messung der Resorptionslänge und Resorptionstiefe wurden auf jeder Seite der Resorptionslakune der äußerste Resorptionsrand markiert, sowie der tiefste Punkt der Lakune. Die zwei Punkte am Resorptionsrand wurden durch das Programm automatisch zu einer Geraden verbunden, welche die Resorptionslänge darstellt. Zur Berechnung der Resorptionstiefe wurde der tiefste Punkt der Resorptionslakune markiert. Die durch das Programm berechnete Länge des Lotes auf die Gerade stellt die Tiefe der Lakune dar.

¹ Emazing, Düsseldorf

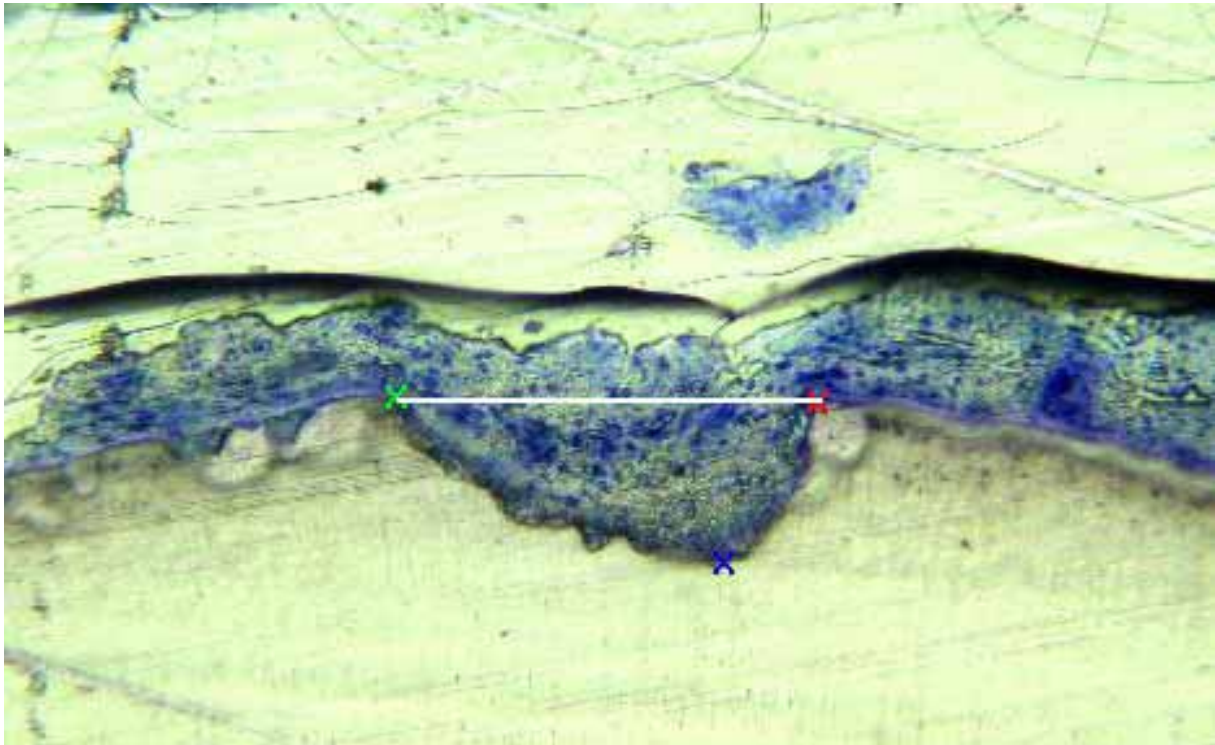


Abb. 13: Emazing Picture Measurement

In Abbildung 13 ist eine linsenförmige Resorptionsstelle dargestellt, die sich bis in das Dentin erstreckt und durch eine polyzyklische Oberfläche gekennzeichnet ist. Auf der Wurzeloberfläche befinden sich *Sharpeysche*-Fasern, die die darunter liegende Zementschicht bedecken. Diese erscheint als ein schmales, dunkles Band. Im unteren Anteil lagert sich eine etwas hellere Schicht, das Dentin, an. Innerhalb des Defektes befindet sich unreifes Bindegewebe mit Odontoklasten.

Die direkte Messung der zu untersuchenden Strukturen ist nicht möglich, da die digitalen Pixel (Picture elements) nicht dem metrischen System angehören. In diesem Versuch diente ein Objektmikrometer zur Kalibrierung des Messsoftware und ermöglichte somit die Umrechnung der Pixelanzahl auf metrische Werte (μm). Die Kalibrierung erfolgte in diesem Versuch, indem ein bekannter Maßstab auf dem Objektmikrometer unter gleichen Voraussetzungen fotografiert wurde wie das zu vermessende Objekt. Die hierbei ermittelte Pixelzahl dient als Umrechnungsfaktor.

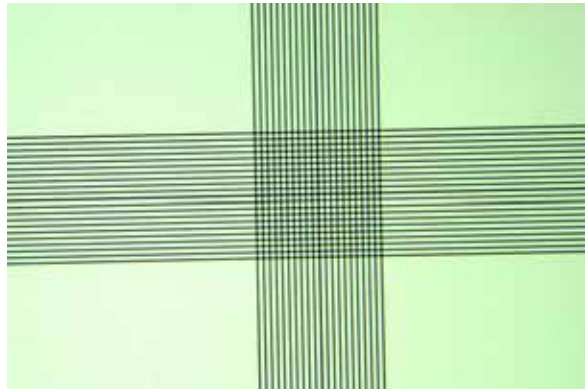


Abb. 14: Mikroskopische Darstellung des Objektmikrometers

4.8 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS 10.0.5¹ für Windows, und dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel², Version 2000. Es wurden simultan mehrere Proben mithilfe des Kruskal-Wallis-H-Test verglichen und anschließend paarweise Signifikanztests unter Verwendung des Mann-Whitney-U-Tests ausgeführt [112].

Der auf den Wilcoxon-Test für unabhängige Stichproben basierende Rangtest nach Mann und Whitney vergleicht die Verteilung zweier unabhängiger Stichproben. Diese müssen ebenfalls stets Ordinalskalenniveau besitzen.

Bei einem vorgegebenen Testniveau von 5% ist bei einem Signifikanzniveau p von unter 0,05 die Annahme von Unterschieden als akzeptabel anzusehen [113].

¹ SPSS Inc., Chicago, USA

² Microsoft, Redmond, USA

5. Ergebnisse

Allgemeiner Teil

5.1 Patientenprofil und Untersuchungsgut

5.1.1 *Geschlechtsverteilung*

Bei der vorliegenden Arbeit wurden von 17 Patienten insgesamt 26 Zähne hinsichtlich ihres Resorptionsverhaltens nach vierwöchiger Einwirkung eines orthodontischen Nivellierungsbogens untersucht. Die untersuchte Patientengruppe enthielt 12 weibliche und 5 männliche Patienten.

5.1.2 *Abstammung des Untersuchungsgutes*

Das Untersuchungsgut enthielt 17 Oberkiefer- und 9 Unterkieferzähne.

5.2 Angaben zur statistischen Erhebung

5.2.1 Lichtmikroskopische Messungen

Bei allen 26 untersuchten Prämolaren wurden in der lichtmikroskopischen Untersuchung deutliche lakunenartige Veränderungen der Wurzeloberflächenstruktur festgestellt. In der Literatur wird über einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Resorptionen an Zahnwurzeln und kieferorthopädischen Kräften, die oberhalb des kapillären Blutdruckes liegen, berichtet [83]. Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Ergebnisse könnten, trotz Anwendung superelastischer Drähte, ebenfalls auf einen solchen Zusammenhang hinweisen. Um einen guten Überblick der Oberfläche zu erhalten, wurden horizontale Schnitte angefertigt. Aus dieser Perspektive wird ersichtlich, dass sich die Lakunen bis in das Dentin hinein erstrecken. Die Wurzeloberfläche ist im histologischen Bild durch eine gewisse Rauigkeit gekennzeichnet, die sich innerhalb der einzelnen Vertiefungen und Erhebungen widerspiegelt.

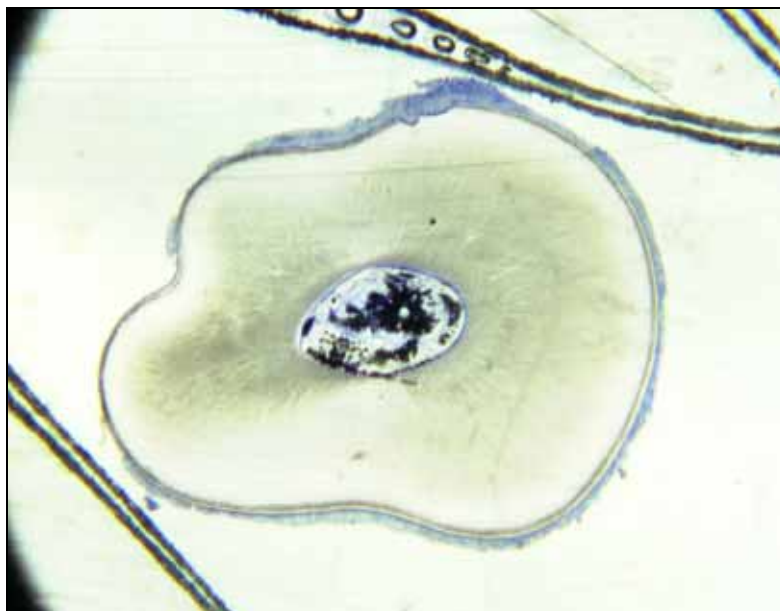


Abb. 15: Histologisches Präparat in der Aufsicht

In Abbildung 15 ist ein Wurzelquerschnitt abgebildet. Die Veränderungen der Probenoberfläche waren mithilfe der lichtmikroskopischen Untersuchung gut erfassbar. Um das Ausmaß der Resorptionsstellen dokumentieren zu können, wurden von den mikroskopisch dargestellten Präparaten digitale Aufnahmen mit einer 80 bzw. 200fachen optischen Vergrößerung und einer Auflösung von 2,6 Megapixel angefertigt. Die Bestimmung der Tiefe und der Länge der Resorptionsstellen an den Zähnen erfolgte anschließend durch ein computergestütztes Berechnungsverfahren.

Spezieller Teil

5.3 Lokalisation der Resorptionsstellen

5.3.1 Lokalisation der Resorptionsstellen in Abhängigkeit vom Wurzelabschnitt

Nach histologischer Aufbereitung erfolgte die lichtmikroskopische Untersuchung. Hierbei zeigten, wie bereits erwähnt, alle untersuchten Zähne resorptive Veränderungen der Wurzeloberfläche. Besonders auffällig war die unterschiedliche Resorptionsanfälligkeit in den verschiedenen Wurzelabschnitten. Der apikale Wurzelabschnitt wies die umfangreichsten, der mittlere Wurzelabschnitt die geringsten Resorptionen auf.

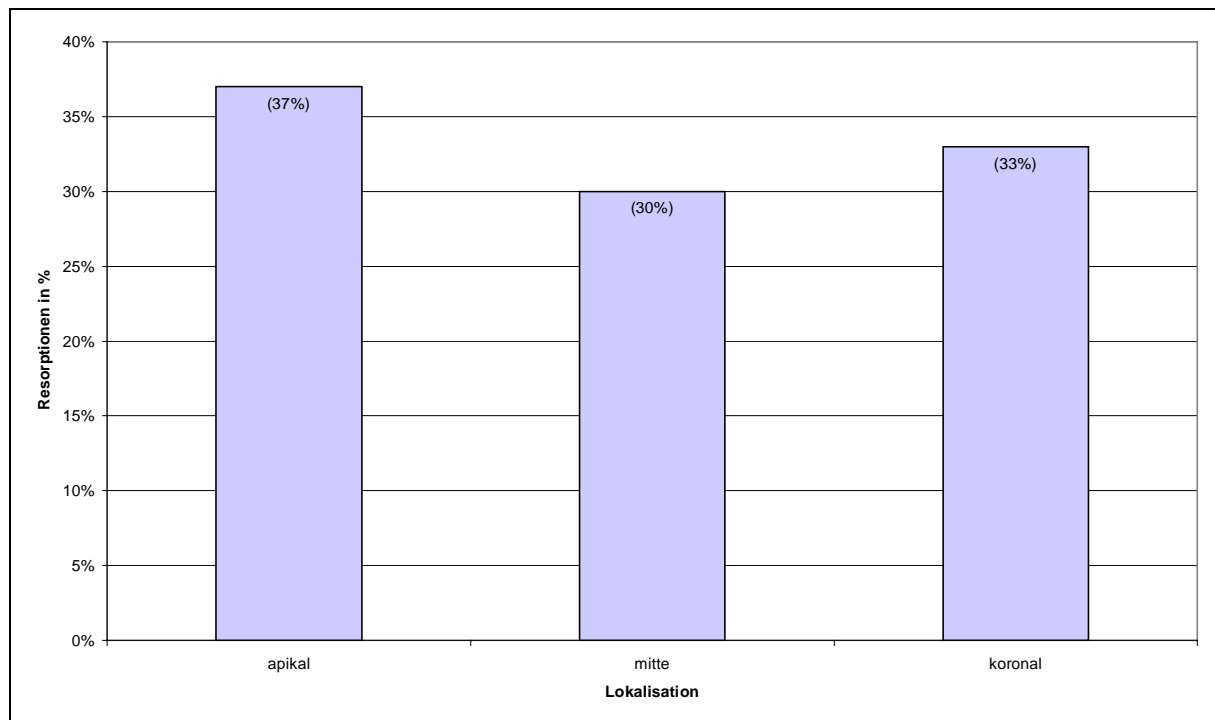


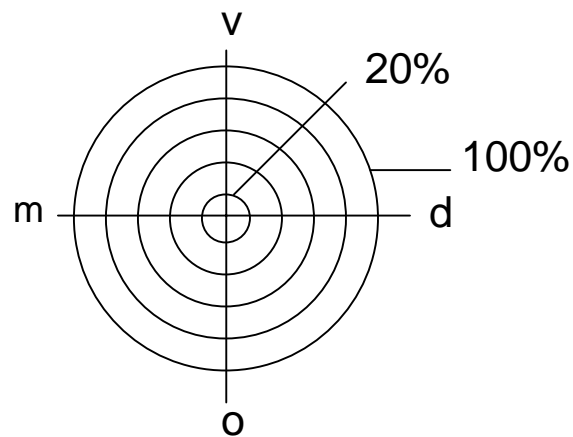
Abb. 17: Verteilung der Wurzelresorptionen nach Wurzelabschnitt

5.3.2 Lokalisation der Resorptionsstellen in Abhängigkeit der Wurzelflächen

Unter den gegebenen Versuchsbedingungen wurde neben der Ermittlung des absoluten Vorkommens von Resorptionsstellen in den jeweiligen Wurzelabschnitten ebenfalls das Resorptionsausmaß in Abhängigkeit ihrer Lokalisation an verschiedenen Wurzelpositionen untersucht.

Die Grafik soll in den nachfolgenden Bildern die quantitative Verteilung der Resorptionen an den verschiedenen Wurzelflächen veranschaulichen. Die Einteilung der Wurzel erfolgte hierfür in vier vertikale Wurzelflächen (mesial, distal, vestibulär, oral) und in drei horizontale Wurzelabschnitte (apikal, mitte, koronal). Die Balkenlänge im Diagramm entspricht der Verteilung der Resorptionen in Prozent entsprechend ihrer topographischen Lage im jeweiligen Wurzelabschnitt. Hierbei stellt der Radius eines Kreises 20% dar. Die Summe aller Balken ergibt für den

jeweiligen Wurzelabschnitt 100%. Der Übersicht halber wird in den folgenden Abbildungen auf dieses Kreisschema nur verwiesen.



m = mesiale Wurzelfläche
d = distale Wurzelfläche
v = vestibuläre Wurzelfläche
o = orale Wurzelfläche

Abb. 18: Schematische Darstellung zur topographischen Beschreibung der quantitativen Verteilung von Wurzelresorptionen in Prozent

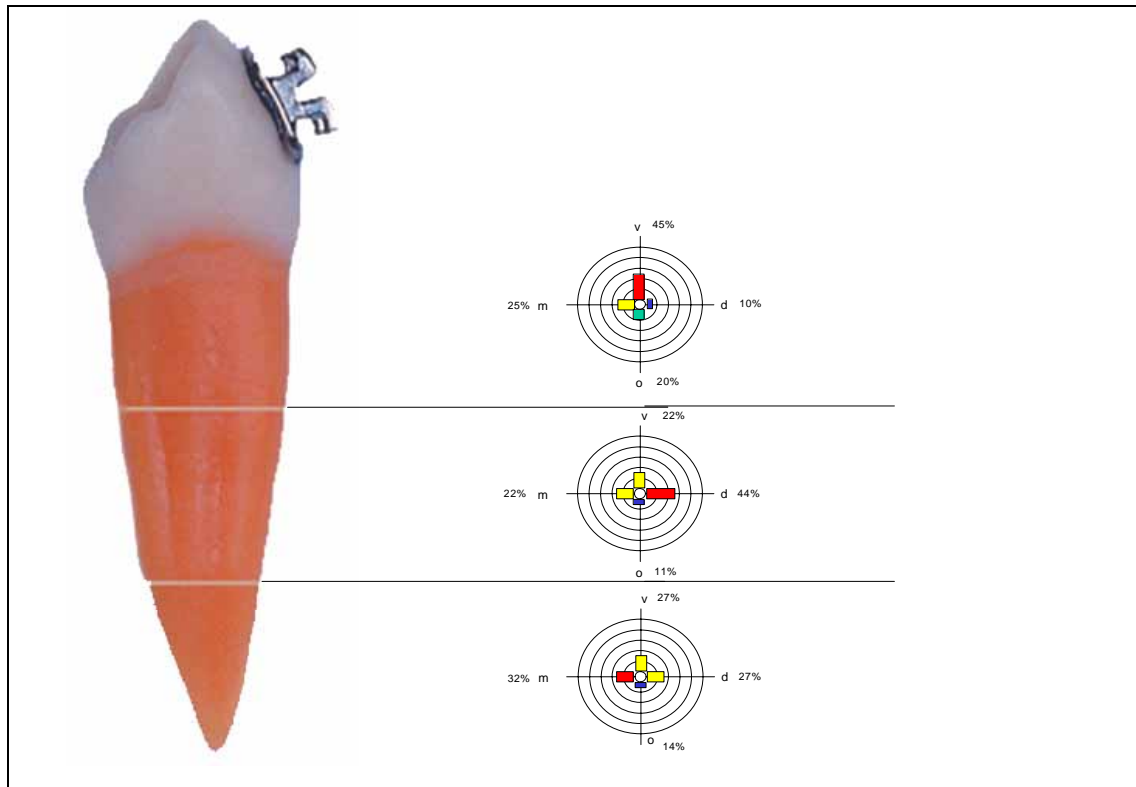


Abb. 19: Grafische Darstellung der quantitativen Verteilung der Wurzelresorptionen aller Zähne in Prozent nach ihrer vertikalen Lage (mesial, distal, vestibulär, oral) unterteilt in die drei horizontalen Abschnitte (apikal, mitte, koronal)

Aus Abbildung 19 geht hervor, dass der apikale Wurzelabschnitt, insbesondere im mesialen und vestibulären Anteil, resorptive Veränderungen der Wurzeloberfläche aufweist. Im mittleren Wurzelbereich hingegen treten diese vermehrt im distalen, im koronalen Wurzelanteil vorwiegend im vestibulären Teil der Wurzeloberfläche auf.

5.4 Metrische Erfassung der Resorptionsausdehnungen

5.4.1 Längenmessung der Resorptionsstellen

Die digitalen Aufnahmen der Wurzelquerschnitte ermöglichten eine metrische Erfassung der Oberflächenveränderungen mittels des Computerprogramms Amazing Picture Measurement. Nach Kalibrierung des Programms mithilfe eines Objektmikrometers ließen sich die jeweiligen Resorptionstiefen und Resorptionslängen durch punktuelle Markierung der Ränder der Resorptionslakunen berechnen. Als Maß für die Größe der Lakunen wurde ihre maximal gemessene Ausdehnung an der Oberfläche und in der Tiefe verwendet.

Die Abbildung 20 gibt die durchschnittliche Resorptionslänge für die jeweiligen Wurzelabschnitte wieder. Das mittlere Wurzel Drittel weist mit durchschnittlich $563\mu\text{m}$ die größte Resorptionslänge auf, das apikale Wurzel Drittel mit $362\mu\text{m}$ die geringste horizontale Ausdehnung. Die statistische Auswertung mit dem Programm SPSS nach dem Mann-Whitney-U-Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen der jeweils im apikalen und im mittleren Wurzelabschnitt gemessenen Resorptionslänge. Diesen signifikanten Unterschied wiesen ebenfalls die im apikalen und koronalen Wurzelabschnitt gemessenen Resorptionslängen auf. Vergleicht man die gemessenen Resorptionslängen im mittleren und koronalen Wurzelabschnitt, so ist zwar keine exakte Signifikanz darzustellen, einen tendenziellen Unterschied kann man jedoch erkennen.

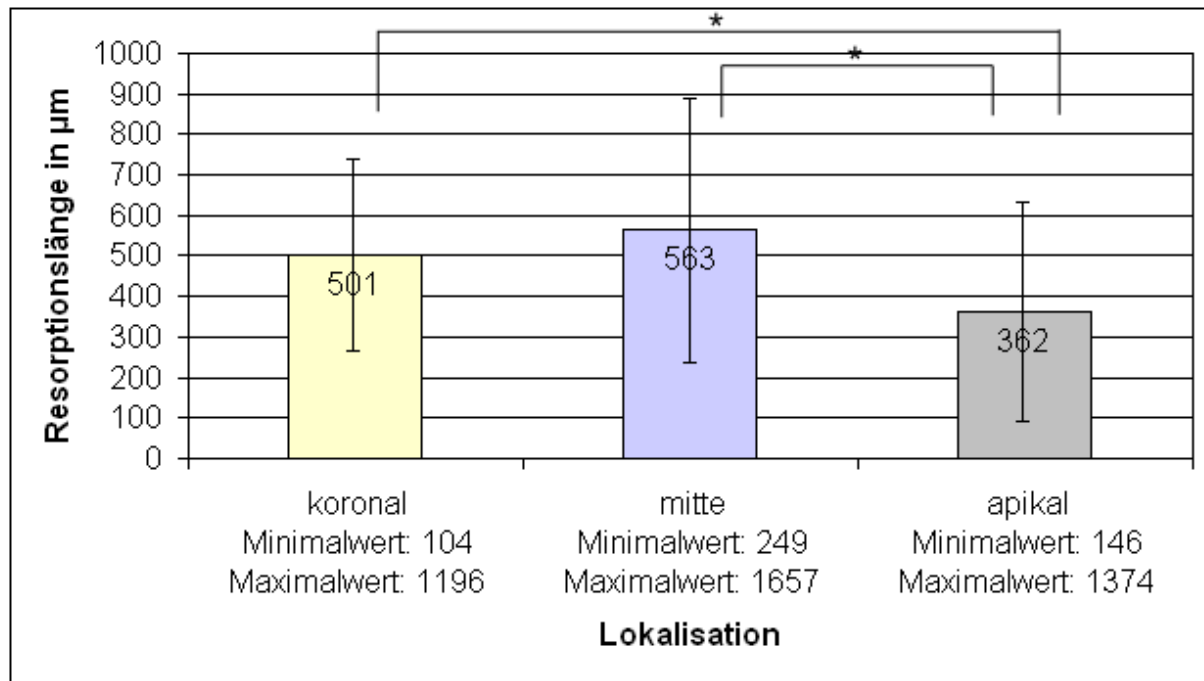


Abb. 20: Durchschnittliche Resorptionslänge pro Wurzelabschnitt

Erklärung: Mit * markiertes Feld bedeutet, dass im Vergleich zwischen den entsprechenden Werten ein signifikanter Unterschied besteht.

5.4.2 Tiefenmessung der Resorptionsstellen

Die Messung der Tiefen der Resorptionslakunen erfolgte nach dem oben genannten Prinzip.

Aus Abbildung 21 wird die durchschnittliche Resorptionstiefe für die einzelnen Wurzelabschnitte ersichtlich. Auch in diesem Fall wurden im mittleren Wurzelabschnitt die größten Werte gemessen. Die geringste Resorptionstiefe wies das apikale Wurzel Drittel auf. Bei der statistische Auswertung mit dem Programm SPSS ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den im apikalen und koronalen sowie den im apikalen und mittleren Wurzelabschnitt gemessenen Resorptionslängen. Der Vergleich der gemessenen Resorptionslängen aus dem koronalen und dem mittleren Wurzelabschnitt zeigte keinen signifikanten Unterschied, obwohl die Werte tendenziell auf einen solchen hinweisen.

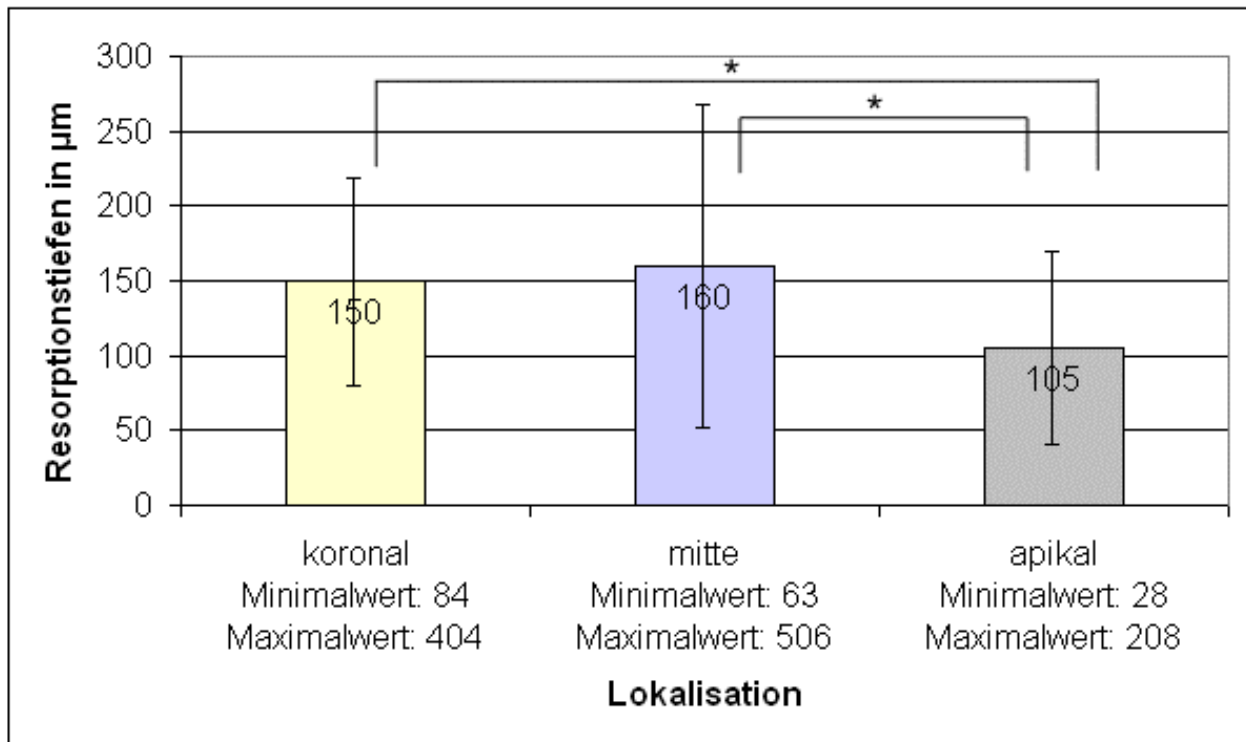
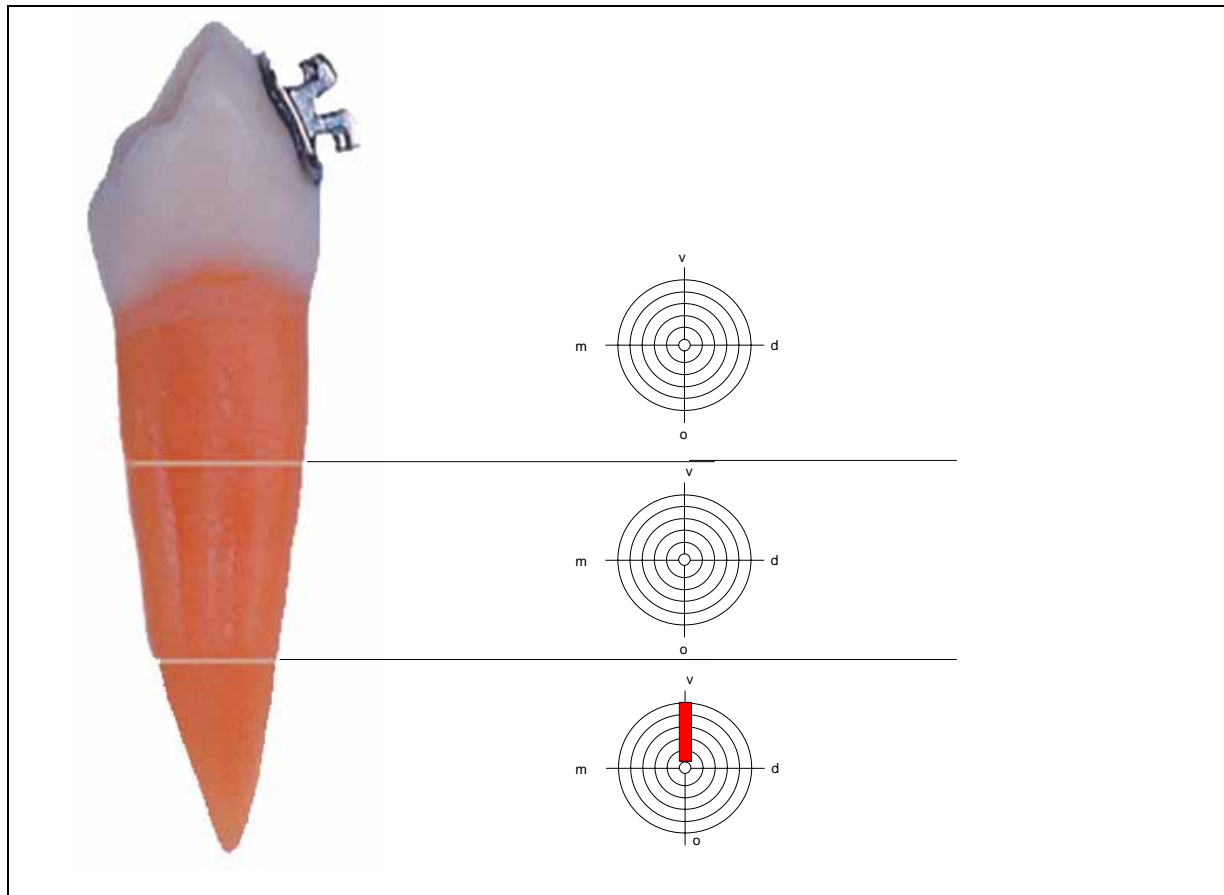


Abb. 21: Durchschnittliche Resorptionstiefe pro Wurzelabschnitt

Erklärung: Mit * markiertes Feld bedeutet, dass im Vergleich zwischen den entsprechenden Werten ein signifikanter Unterschied besteht.

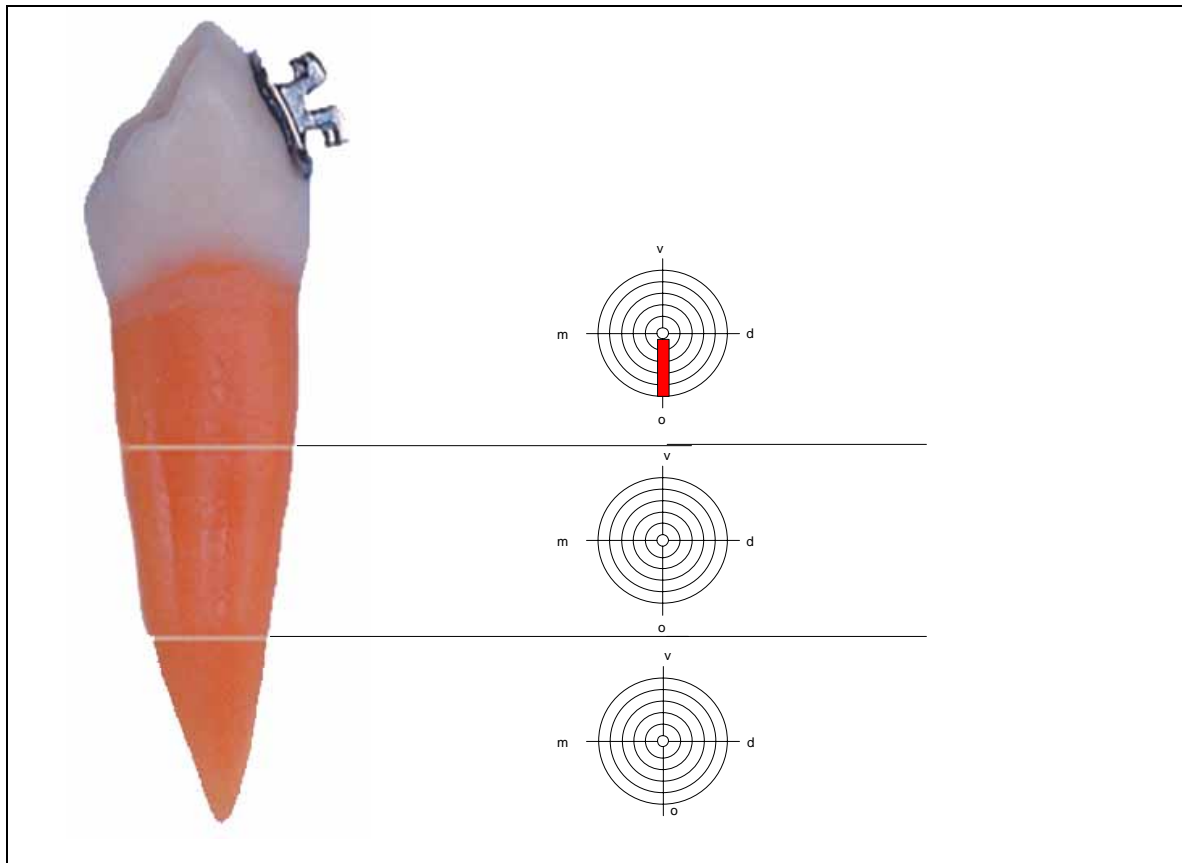
Bei der Untersuchung der Resorptionsausmaße, unabhängig vom Ort ihres Auftretens, konnte eine durchschnittliche Resorptionslänge von 475µm und eine durchschnittliche Resorptionstiefe von 138µm ermittelt werden.

In den folgenden Abbildungen wird von jedem Zahn die quantitative Verteilung der histologisch ermittelten Resorptionsstellen entsprechend ihrer topographischen Lage dargestellt. Die Angabe hierzu erfolgt in Prozent.



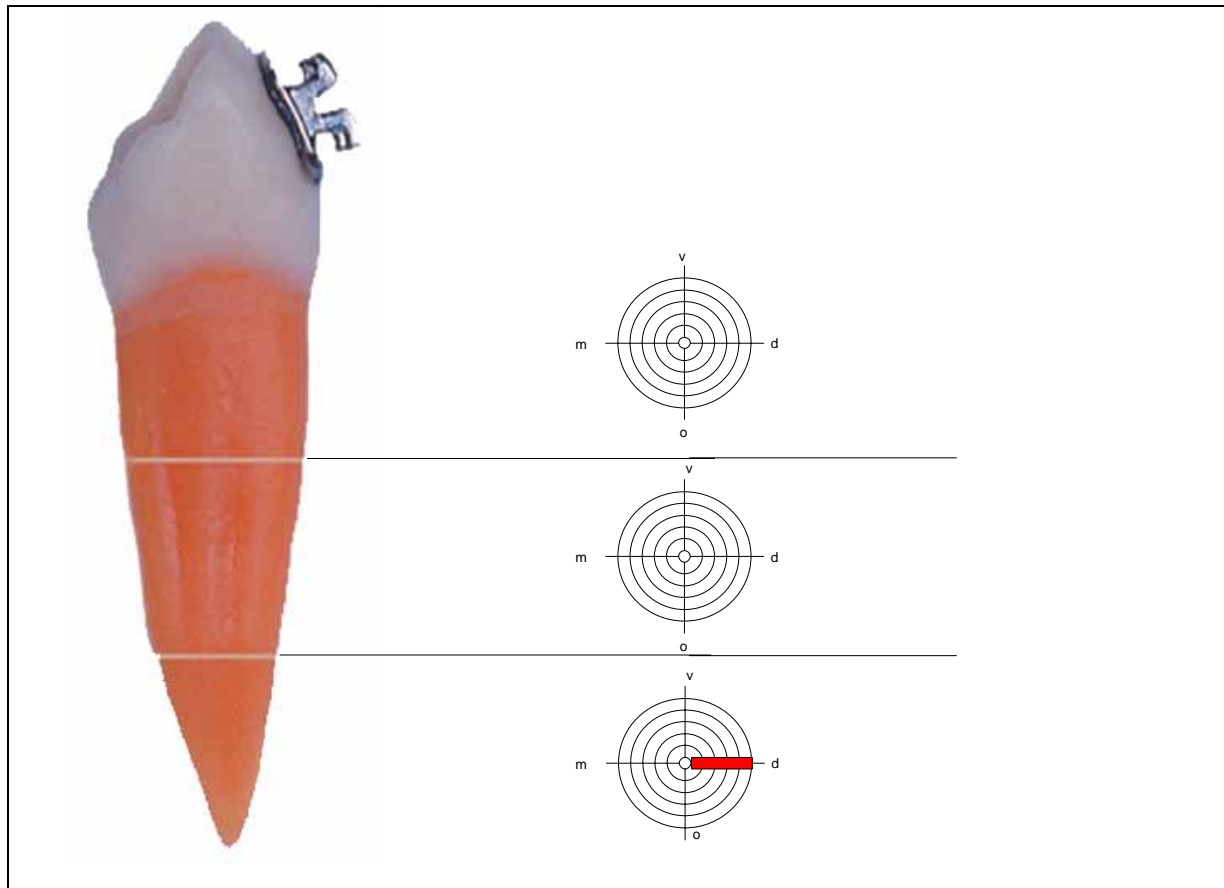
N=1		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	168µm	27µm	apikal	vestibulär

Abb. 22 / Tabelle 1: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 1) (siehe auch Abb. 18)



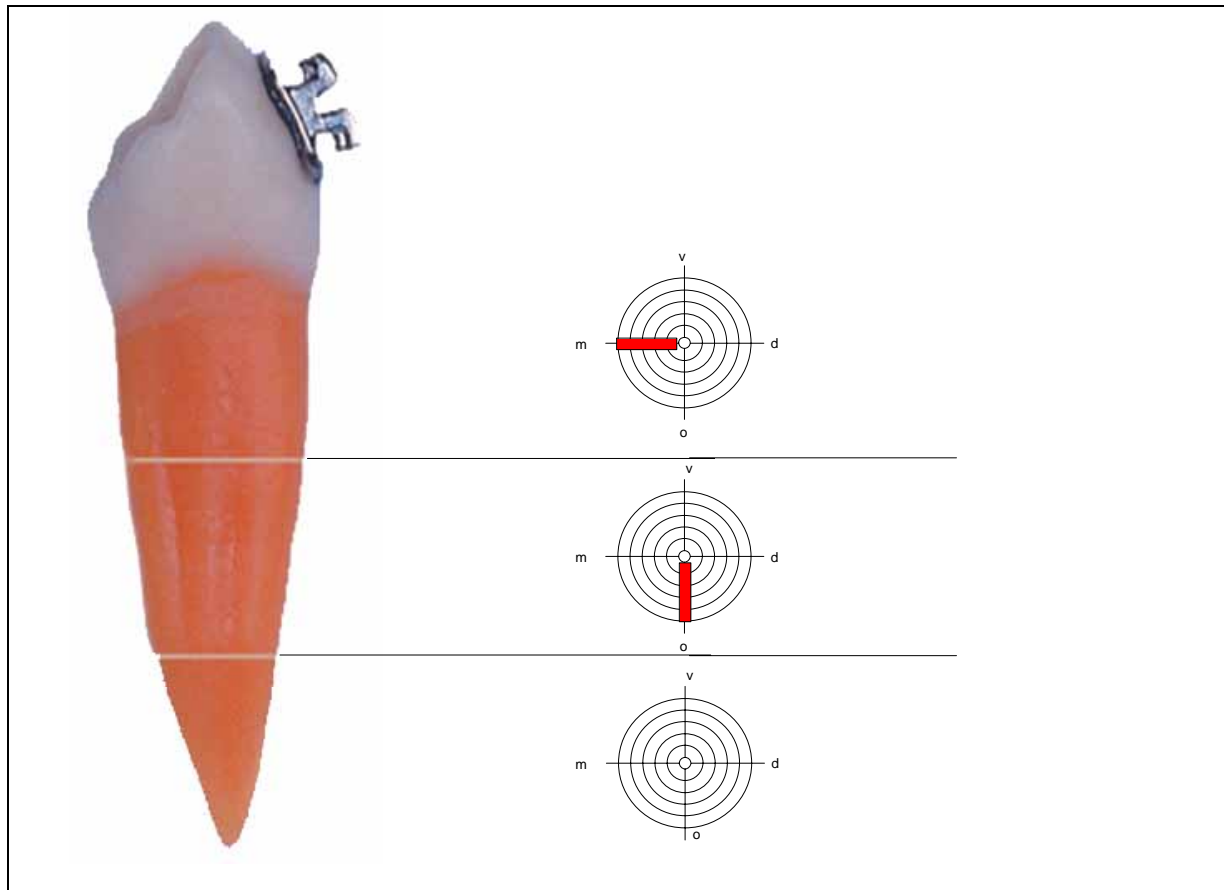
N=1 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	497µm	112µm	koronal	oral

Abb. 23 / Tabelle 2: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 2) (siehe auch Abb. 18)



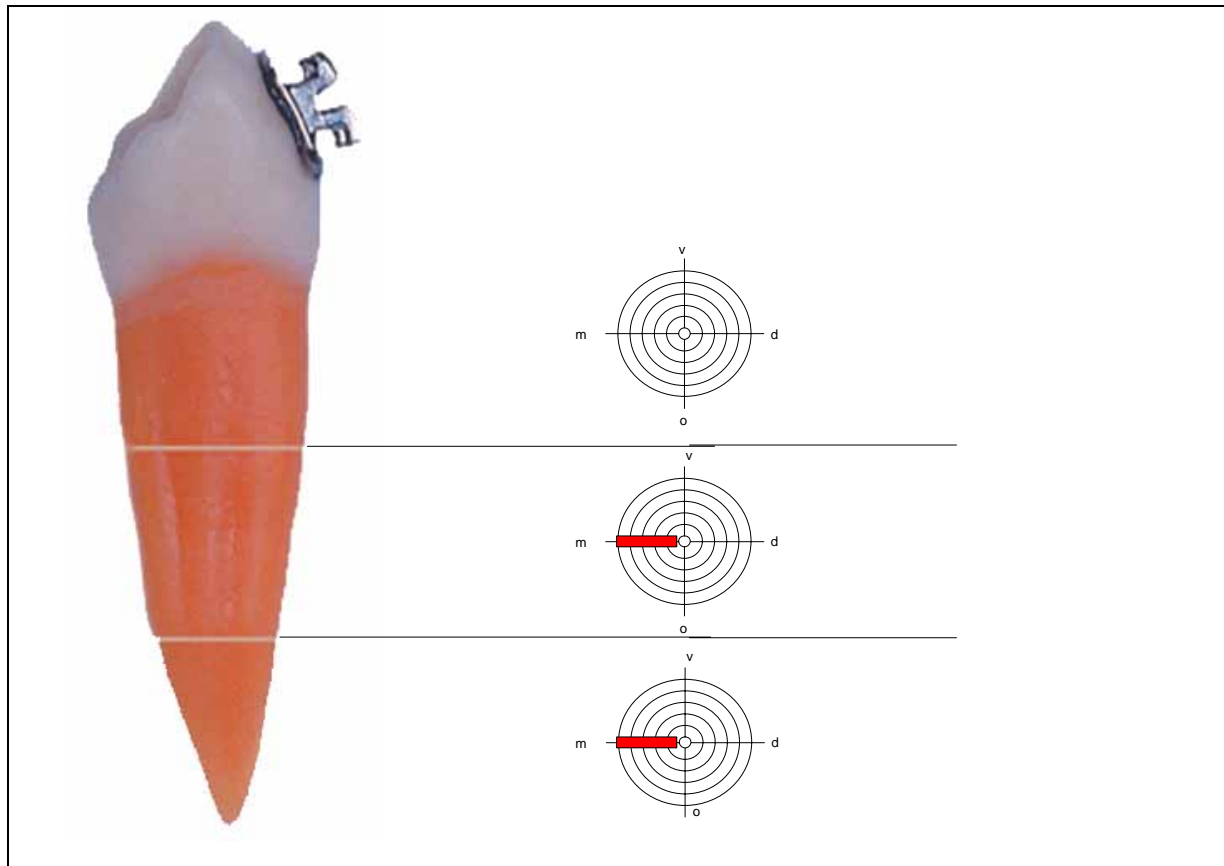
N=1 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	406µm	167µm	apikal	distal

Abb. 24 / Tabelle 3: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 3) (siehe auch Abb. 18)



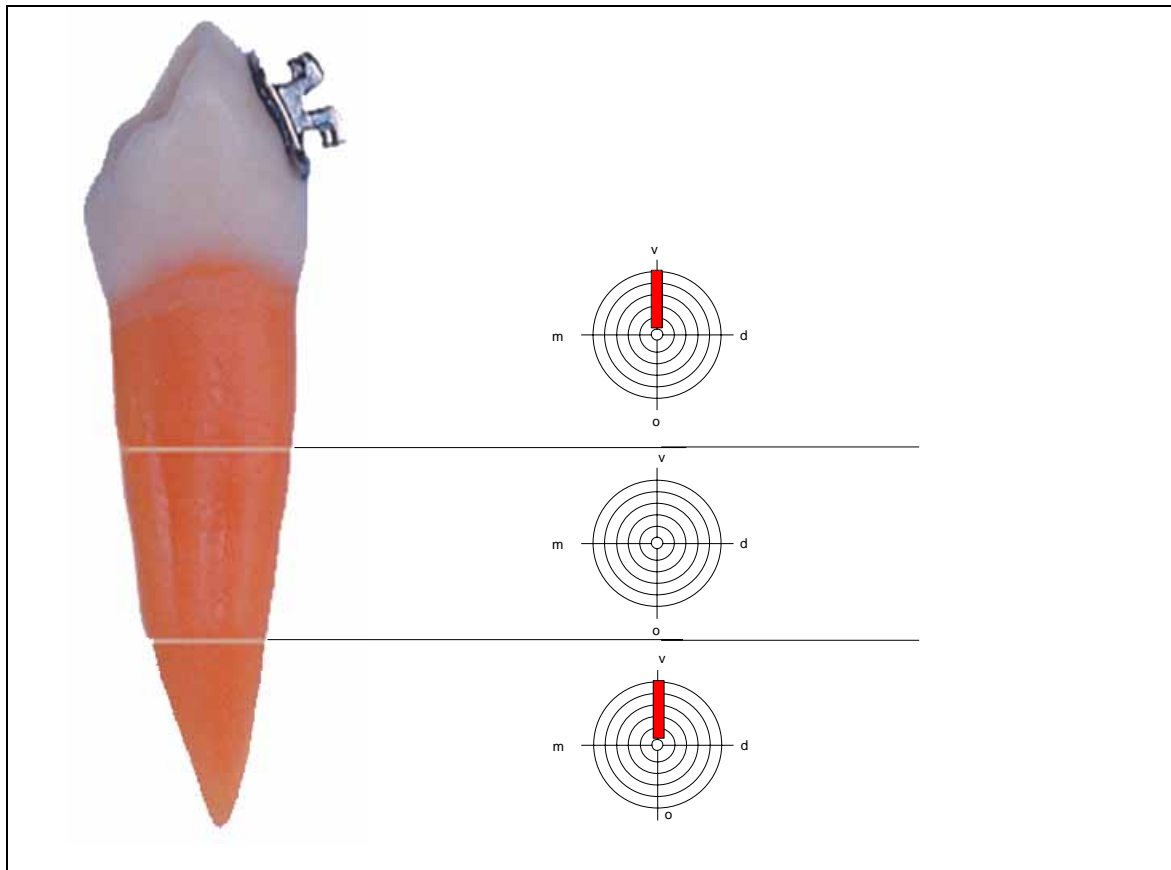
N=2 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	502µm	163µm	mitte	oral
2	668µm	114µm	koronal	mesial

Abb. 25 / Tabelle 4: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 4) (siehe auch Abb. 18)



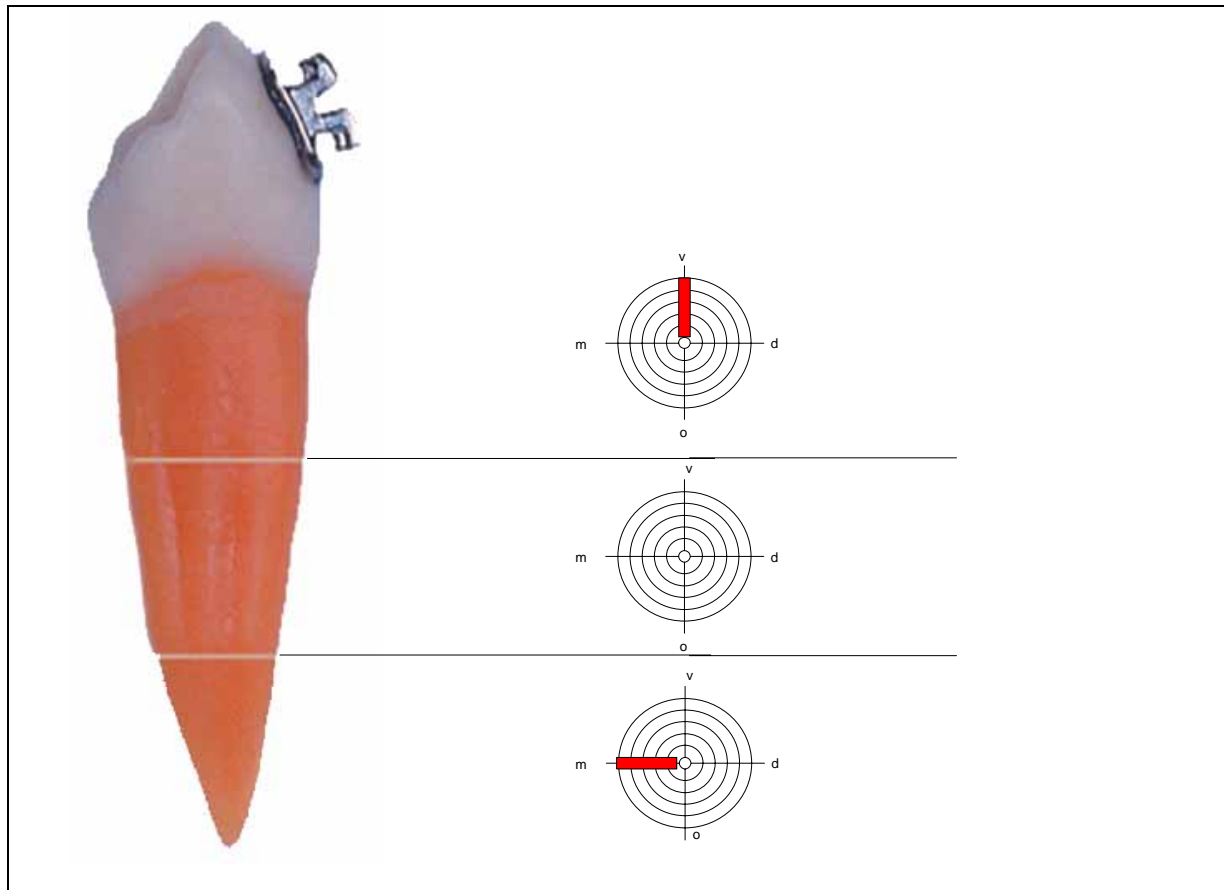
N=2		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	155µm	41µm	apikal	mesial
2	387µm	202µm	mitte	mesial

Abb. 26 / Tabelle 5: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 5) (siehe auch Abb. 18)



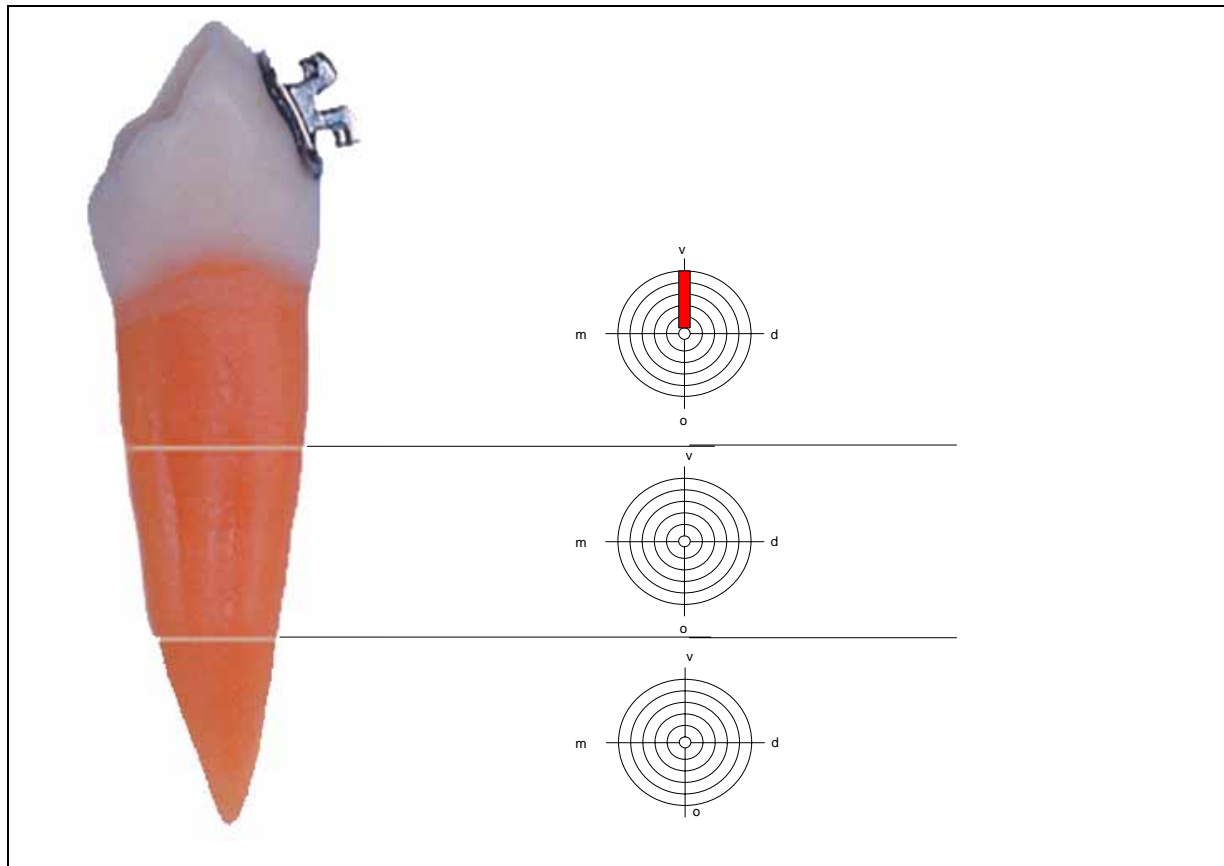
N=2 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	290µm	36µm	apikal	vestibulär
2	312µm	117µm	koronal	vestibulär

Abb. 27 / Tabelle 6: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 6) (siehe auch Abb. 18)



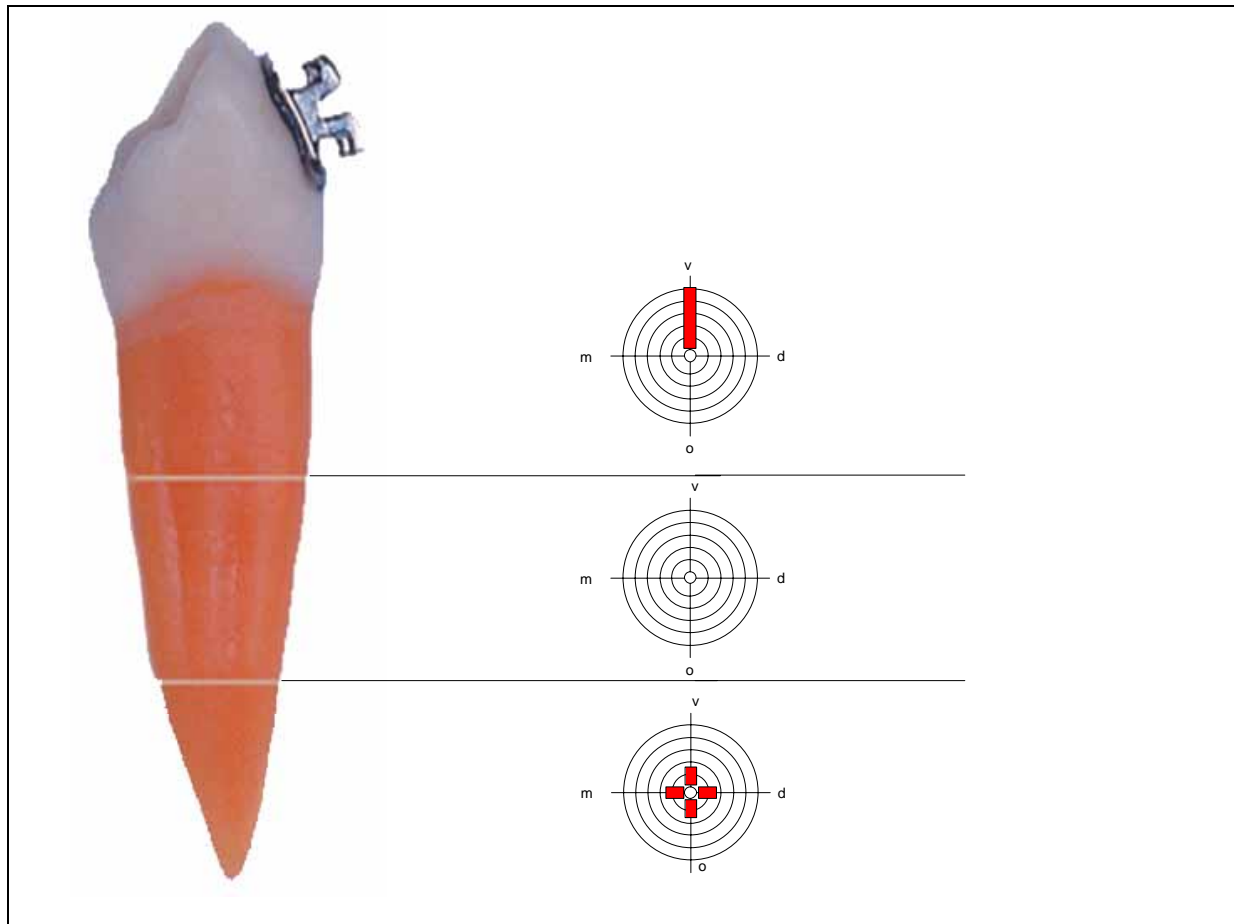
N=2 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	284m	42m	apikal	mesial
2	1196µm	404µm	koronal	vestibulär

Abb.28 / Tabelle 7: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 7) (siehe auch Abb. 18)



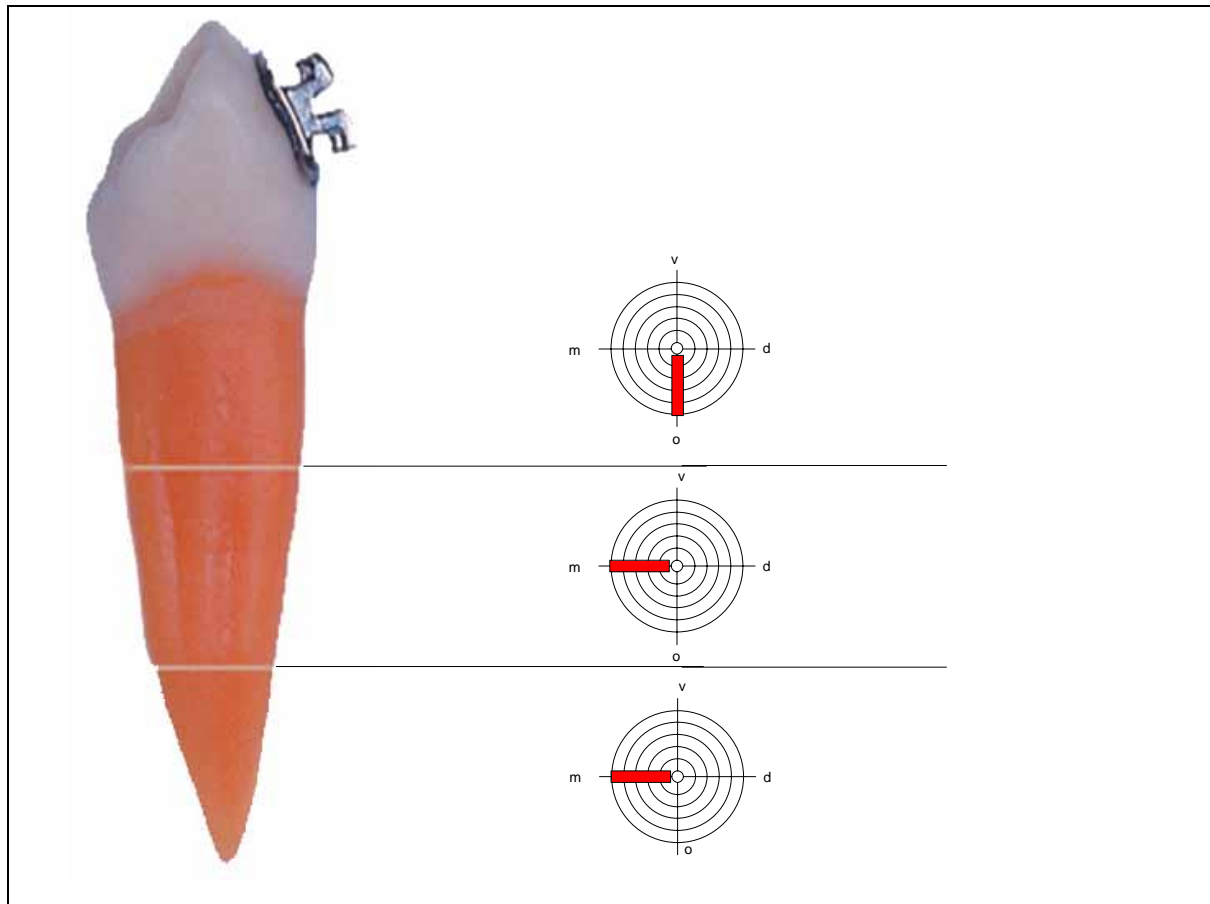
N=1		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	322µm	140µm	koronal	vestibulär

Abb.29 / Tabelle 8: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 8) (siehe auch Abb. 18)



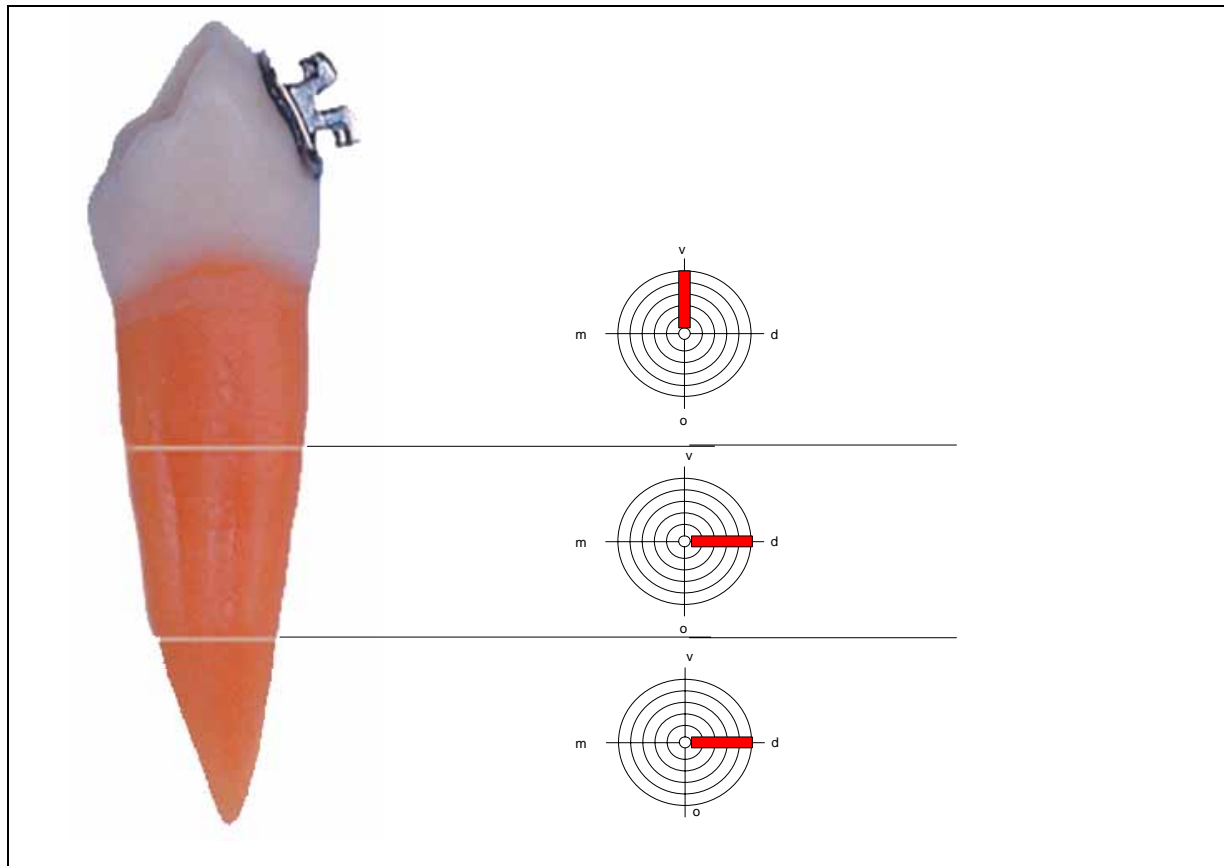
N=5 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	169µm	30µm	apikal	mesial
2	163µm	50µm	apikal	vestibulär
3	190µm	48µm	apikal	distal
4	210µm	65µm	apikal	oral
5	488µm	90µm	koronal	vestibulär

Abb. 30 / Tabelle 9: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 9) (siehe auch Abb. 18)



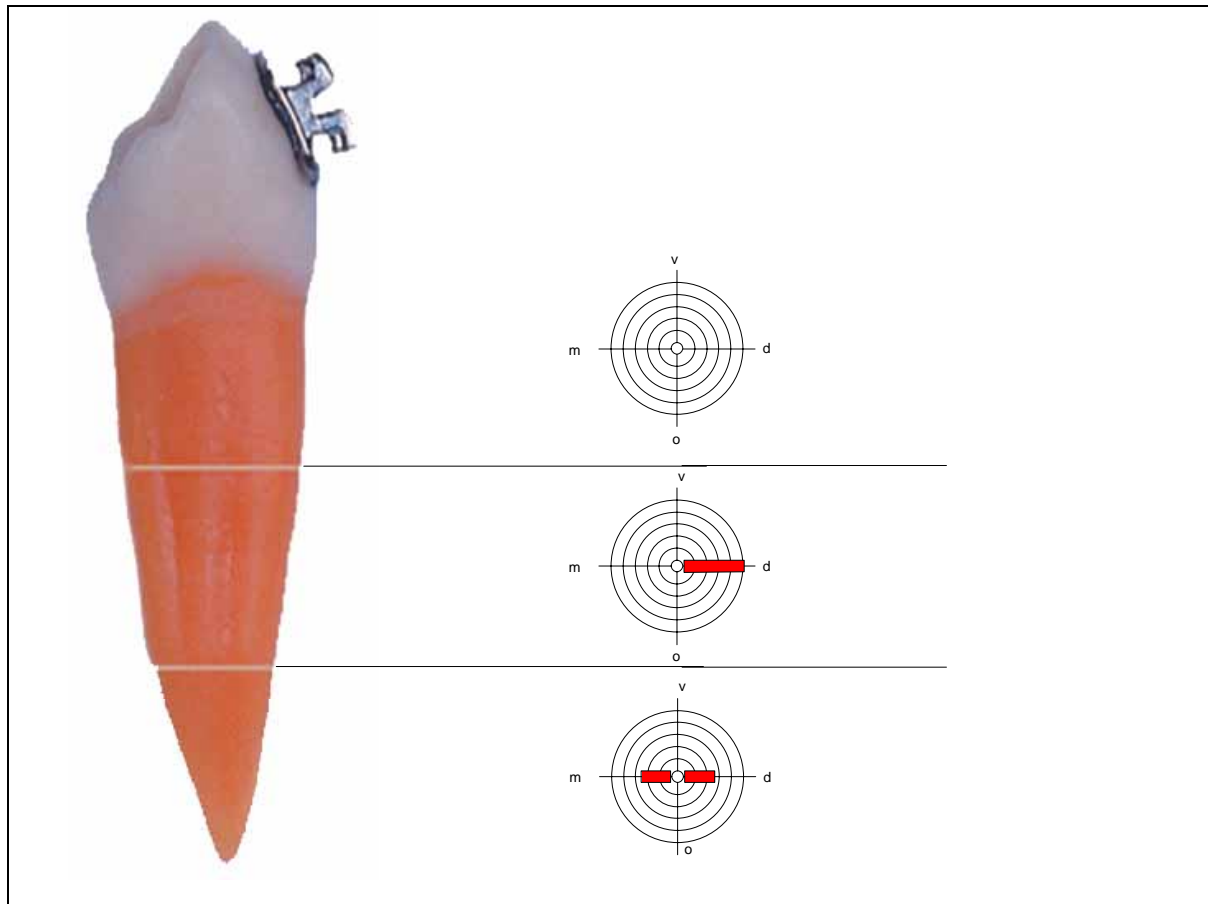
N=3 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	621µm	161µm	apikal	mesial
2	771µm	63m	mitte	mesial
3	583µm	216µm	koronal	oral

Abb. 31 / Tabelle 10: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 10) (siehe auch Abb. 18)



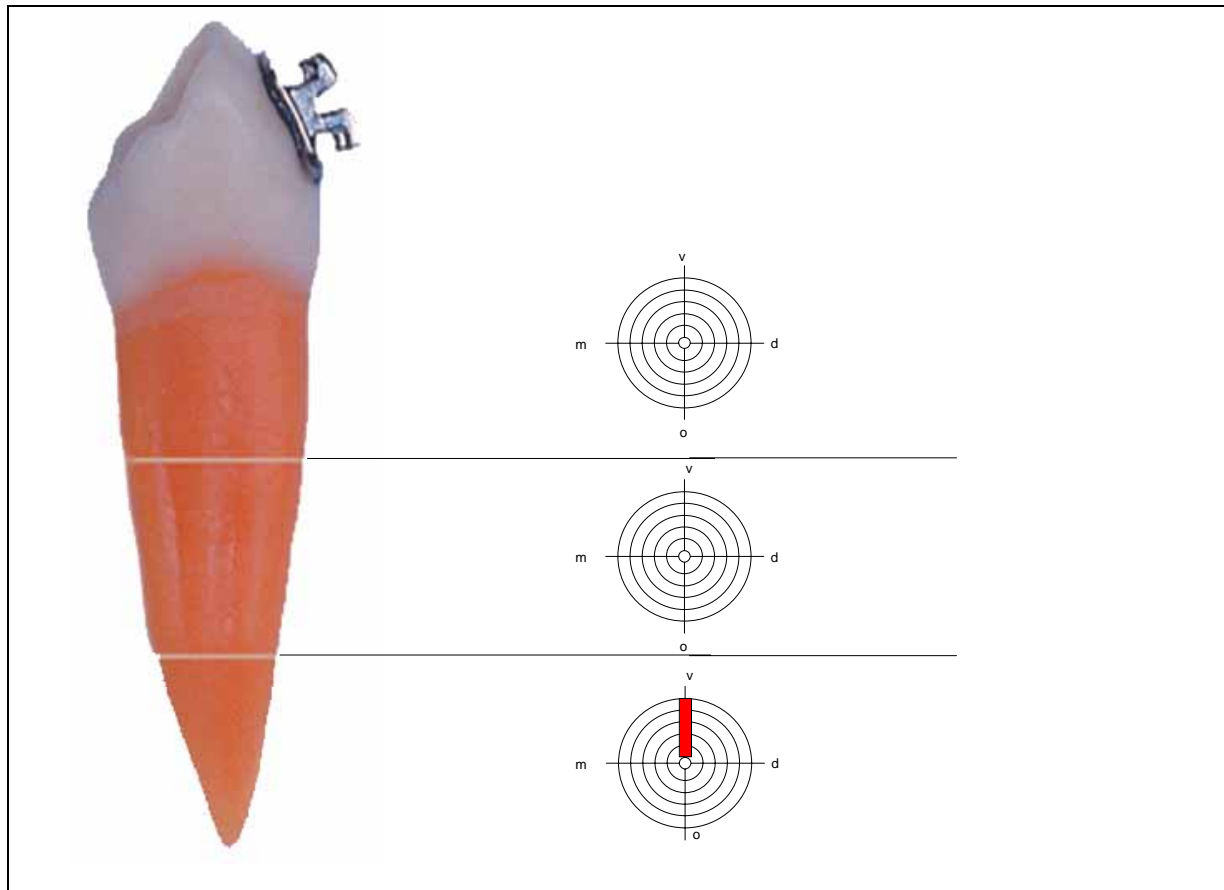
N=3 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	1374µm	195µm	apikal	distal
2	1657µm	506µm	mitte	distal
3	544µm	161µm	koronal	vestibulär

Abb. 32 / Tabelle 11: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 11) (siehe auch Abb. 18)



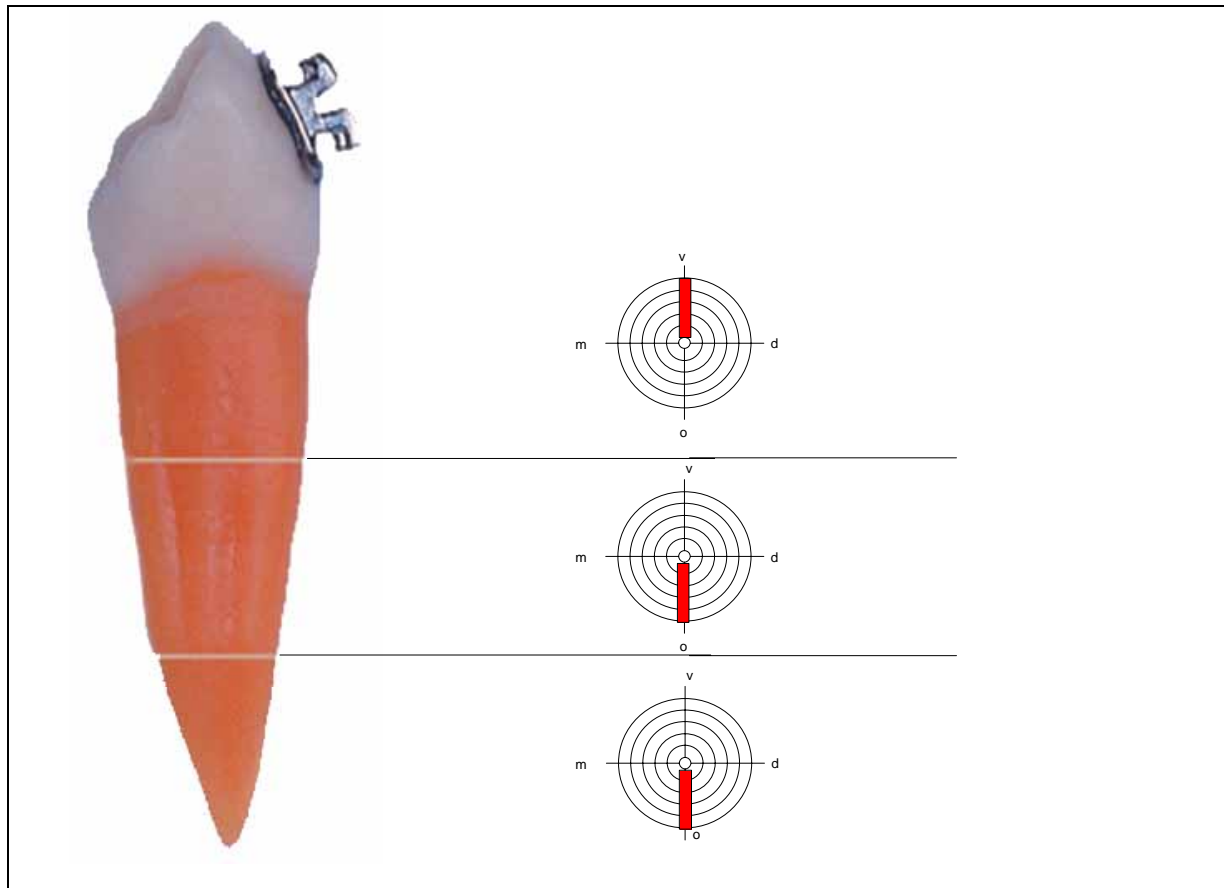
N=3		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	250µm	203µm	apikal	mesial
2	234µm	78µm	apikal	distal
3	557µm	92µm	mitte	distal

Abb. 33 / Tabelle 12: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 12) (siehe auch Abb. 18)



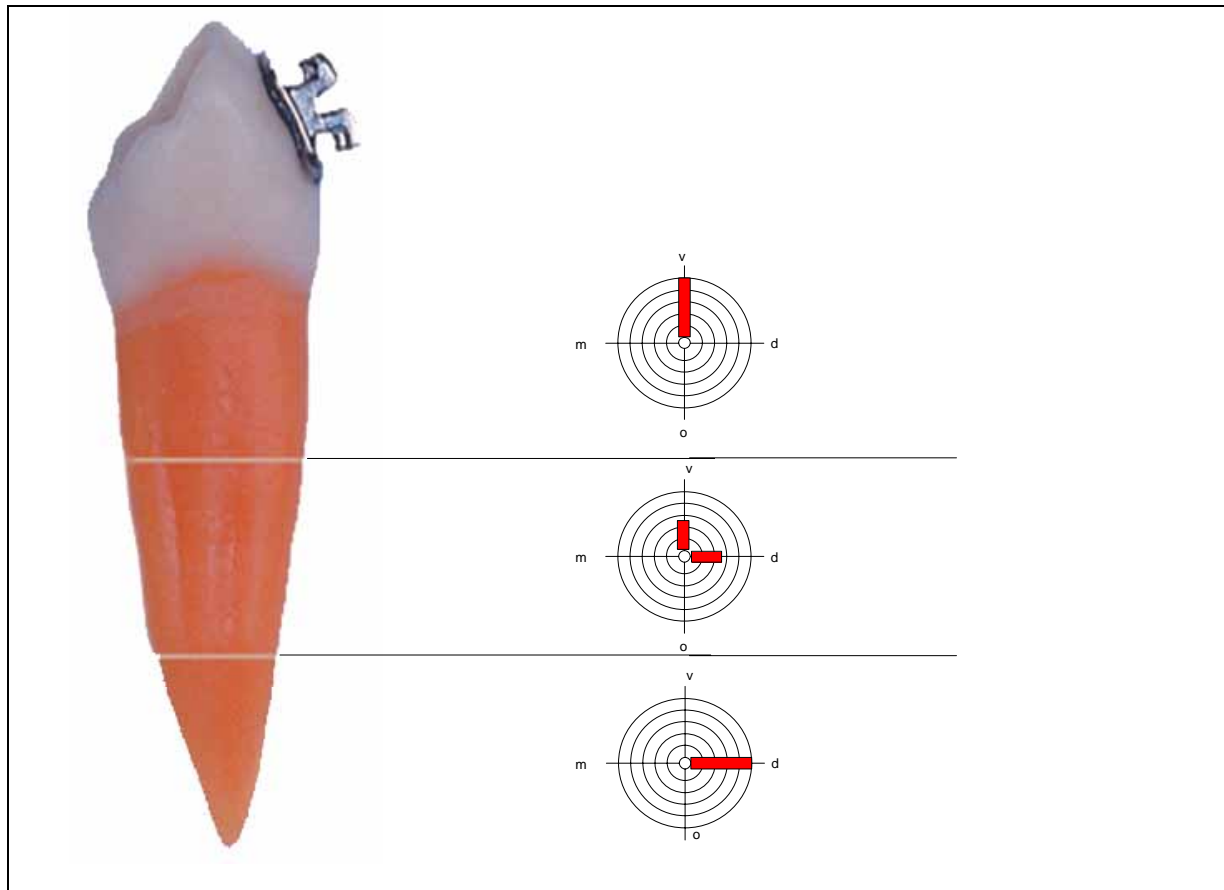
N=1		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	146µm	116µm	apikal	vestibulär

Abb. 34 / Tabelle 13: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 13) (siehe auch Abb. 18)



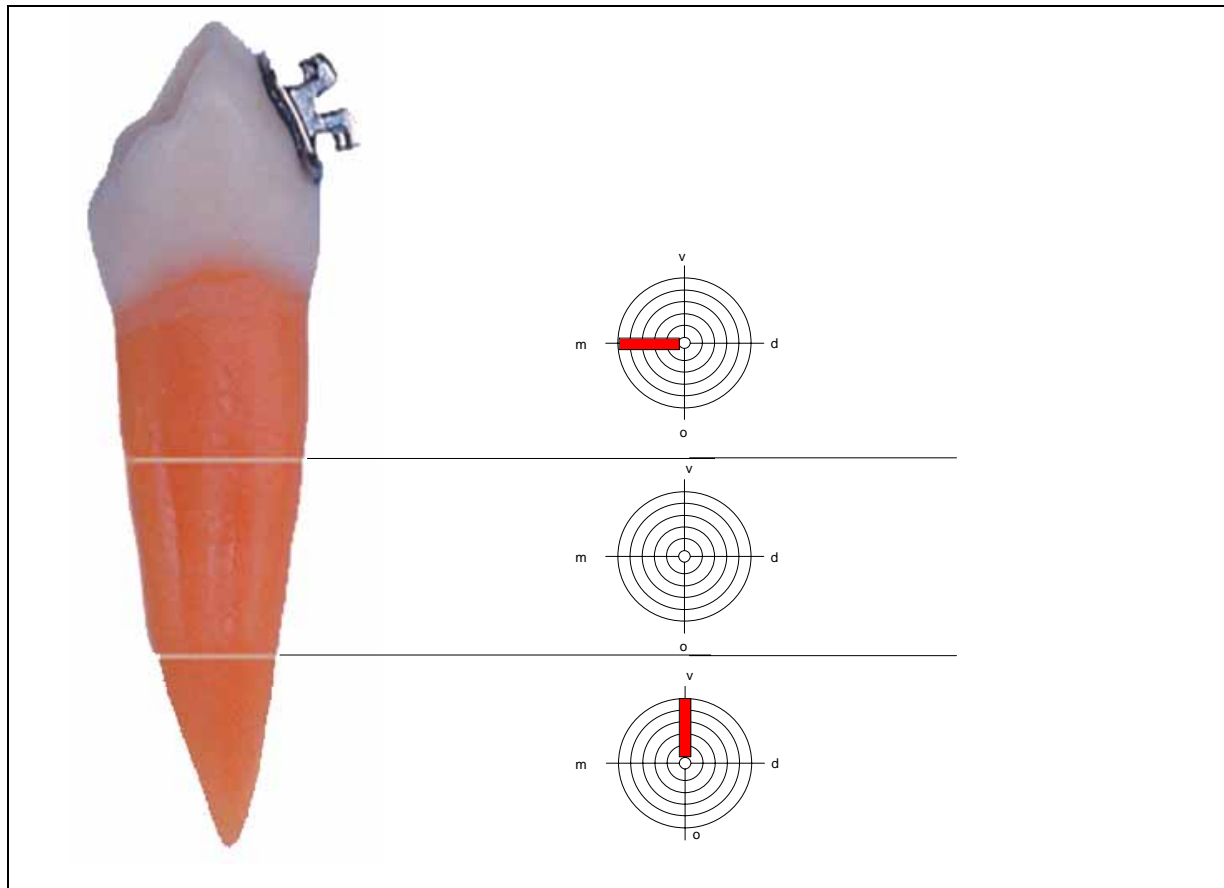
N=3 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	681µm	43µm	apikal	oral
2	727µm	83µm	mitte	oral
3	493µm	90µm	koronal	vestibulär

Abb. 35 / Tabelle 14: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 14) (siehe auch Abb. 18)



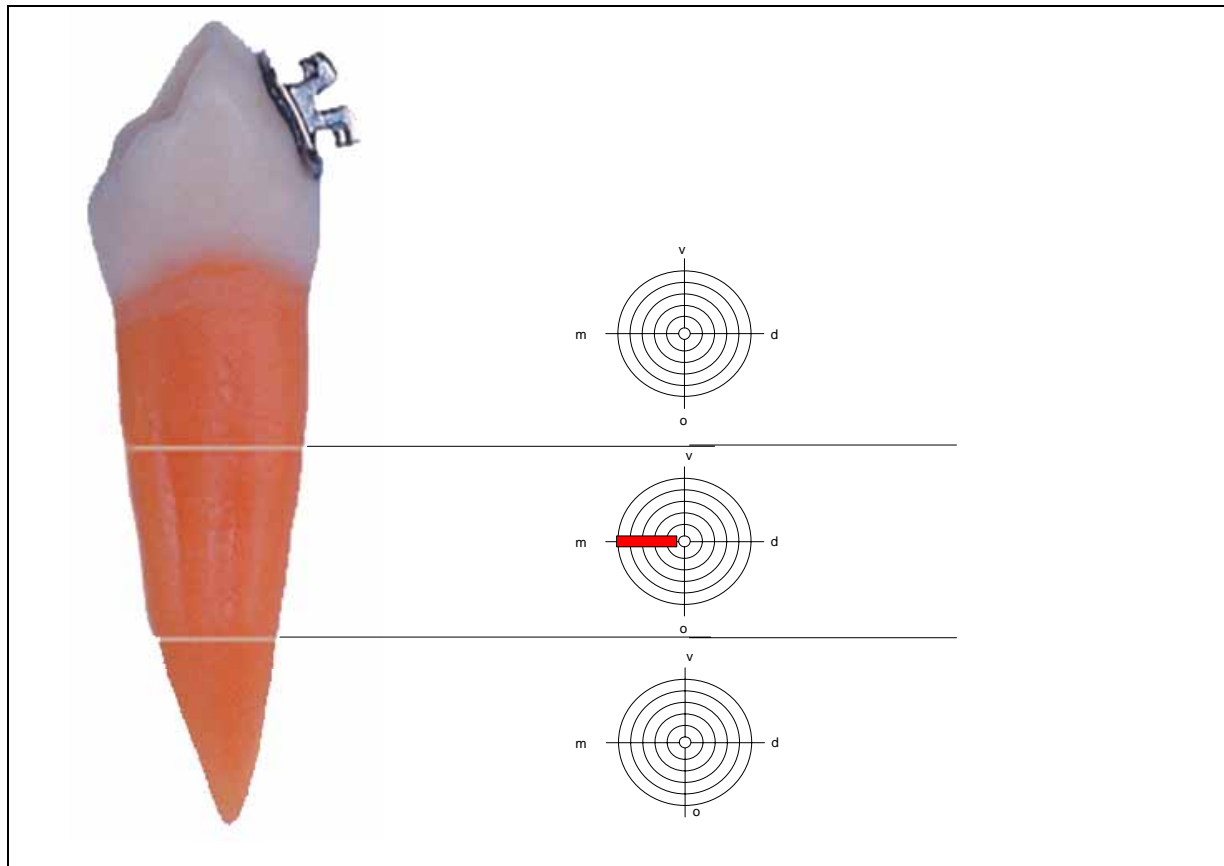
N=4 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	455µm	139µm	apikal	distal
2	374µm	82m	mitte	vestibulär
3	421µm	106µm	mitte	distal
4	832µm	136µm	koronal	vestibulär

Abb. 36 / Tabelle 15: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 15) (siehe auch Abb. 18)



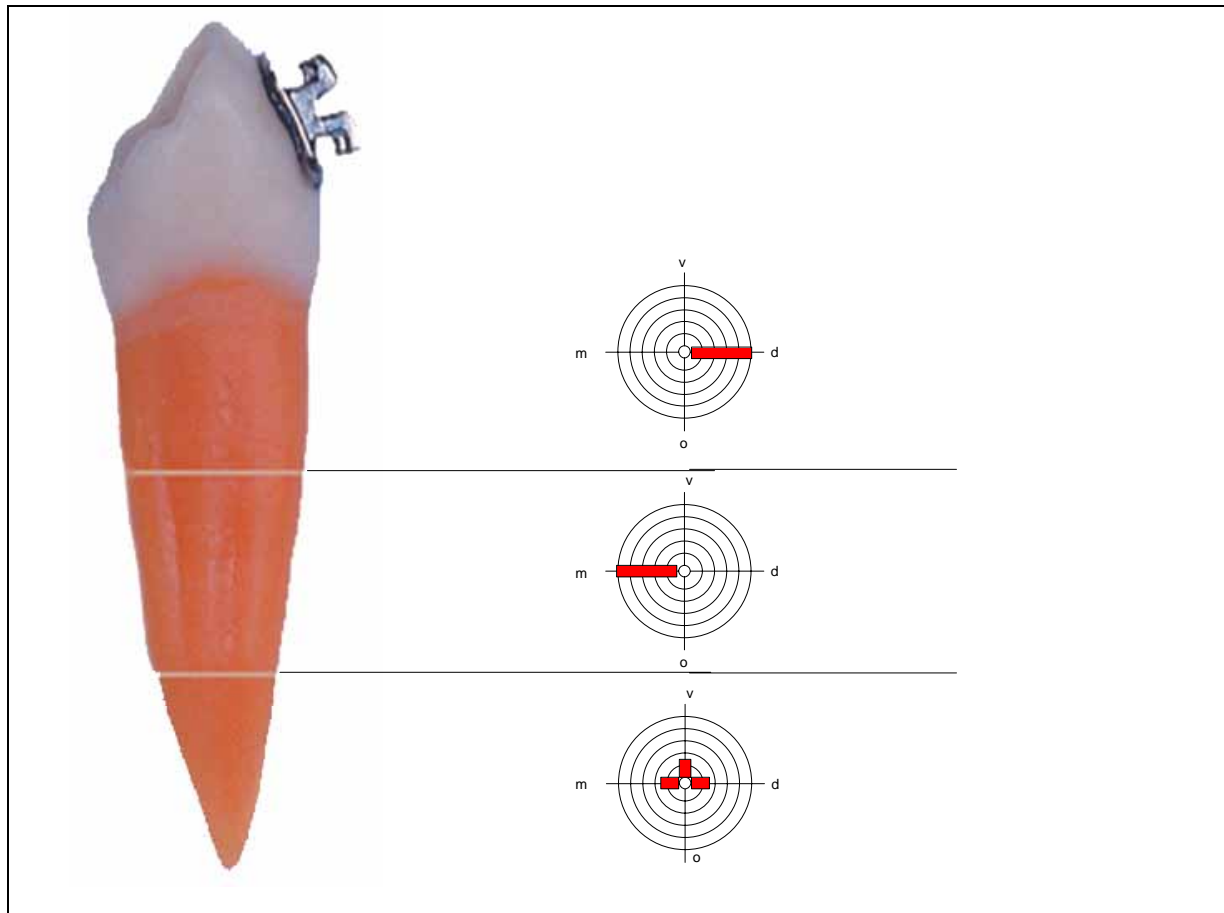
N=2 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	363µm	55µm	apikal	vestibulär
2	322µm	135µm	koronal	mesial

Abb. 37 / Tabelle 16: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 16) (siehe auch Abb. 18)



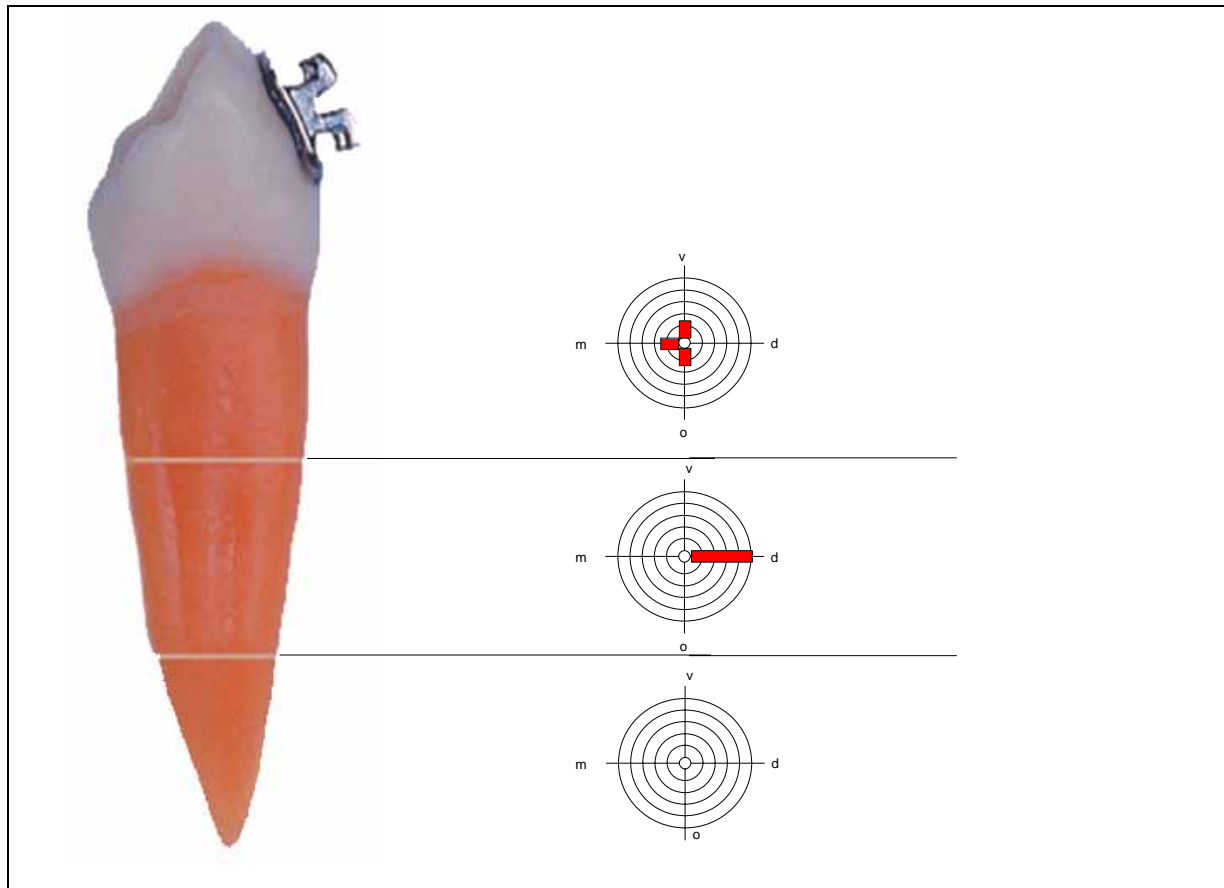
N=1		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	288µm	105µm	mitte	mesial

Abb. 38 / Tabelle 17: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 17) (siehe auch Abb. 18)



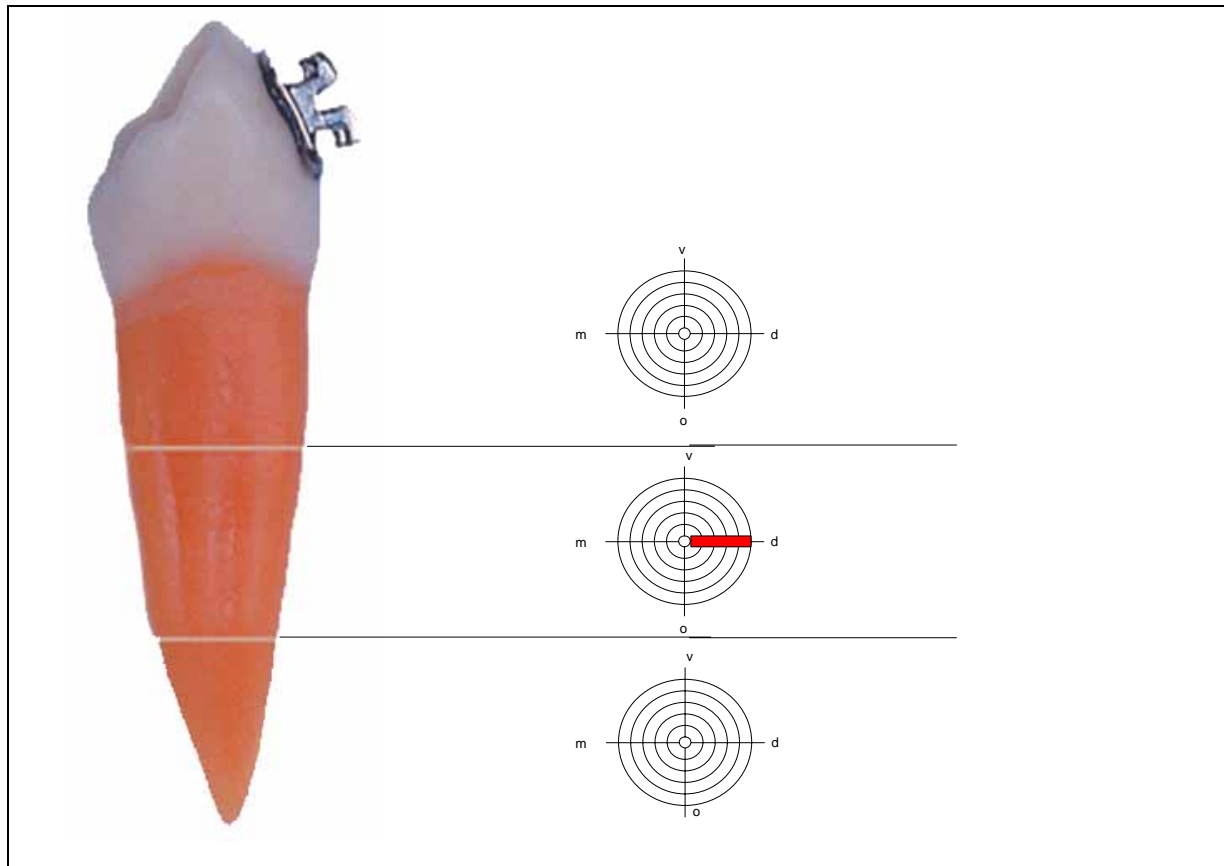
N=5 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	505µm	175µm	apikal	mesial
2	360µm	181µm	apikal	vestibulär
3	523µm	208µm	apikal	distal
4	476µm	186µm	mitte	mesial
5	104µm	84µm	koronal	distal

Abb. 39 / Tabelle 18: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 18) (siehe auch Abb. 18)



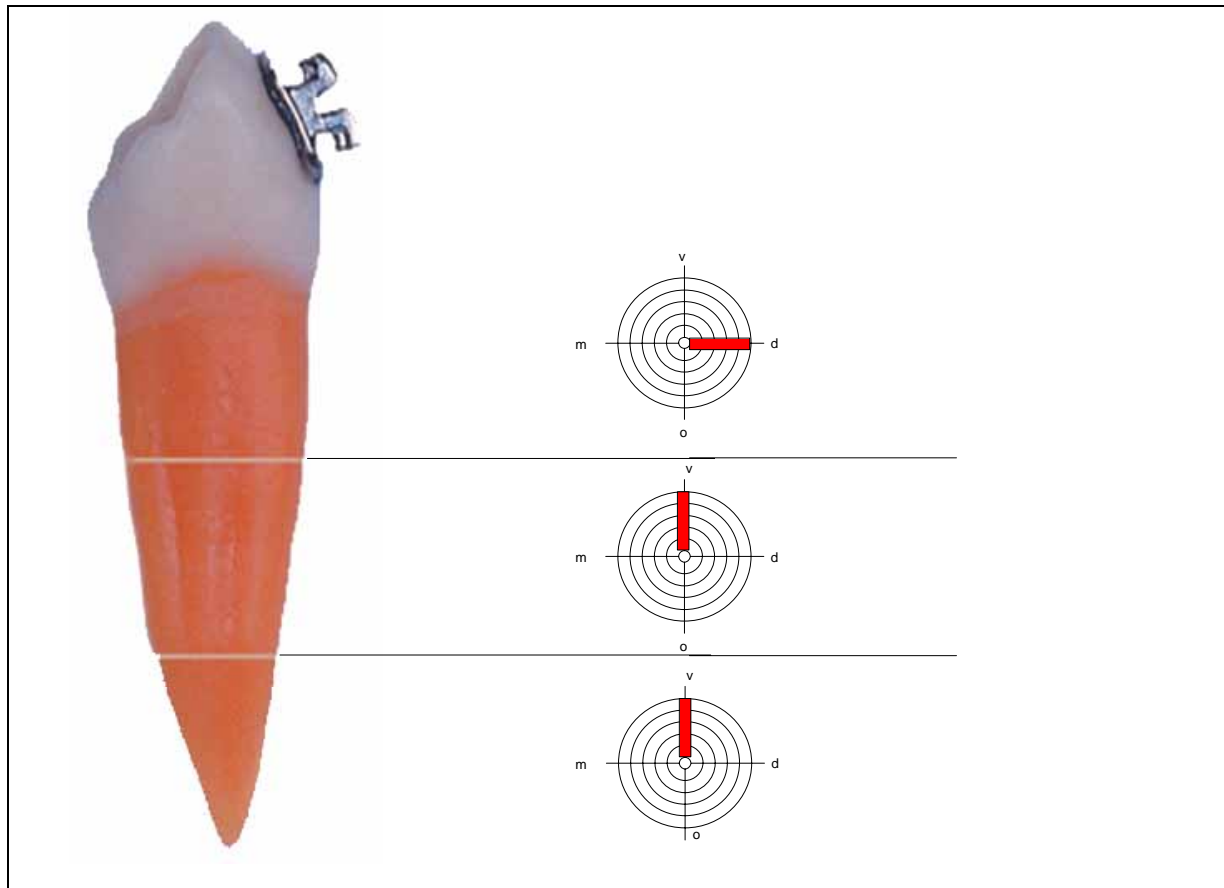
N=4 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	640µm	129µm	mitte	distal
2	509µm	98µm	koronal	mesial
3	520µm	161µm	koronal	vestibulär
4	588µm	204µm	koronal	oral

Abb. 40 / Tabelle 19: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 20) (siehe auch Abb. 18)



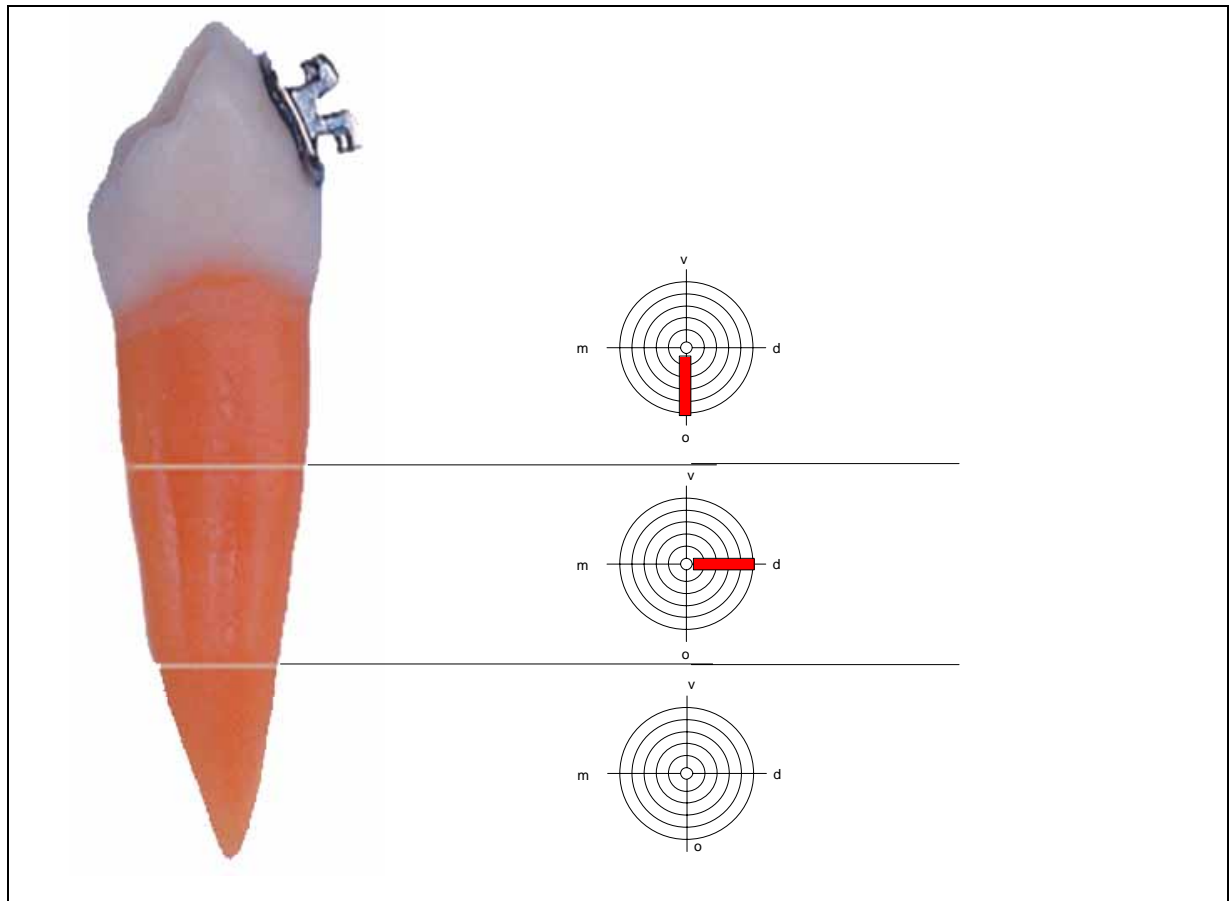
N=1		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	541µm	128µm	mitte	distal

Abb. 41 / Tabelle 20: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 21) (siehe auch Abb. 18)



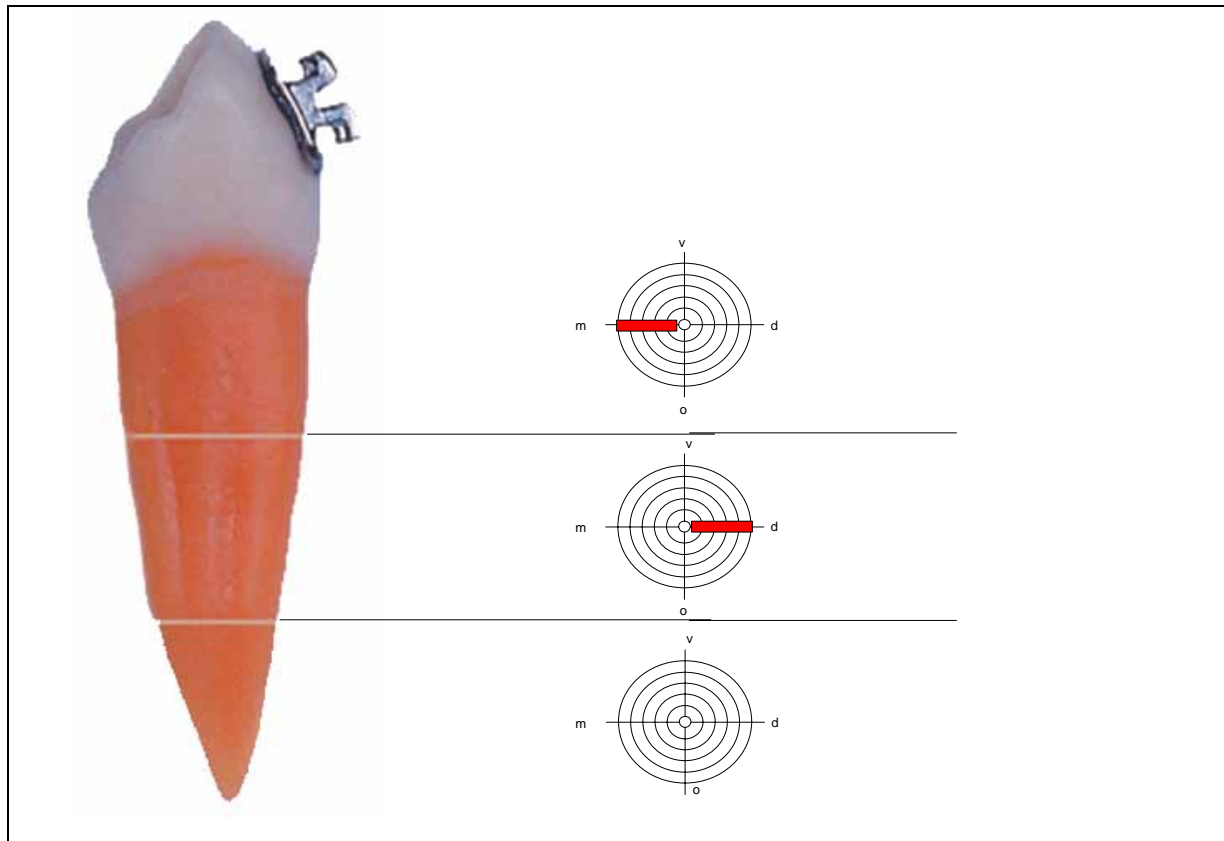
N=3 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	383µm	173µm	apikal	vestibulär
2	571µm	252µm	mitte	vestibulär
3	543µm	161µm	koronal	distal

Abb. 42 / Tabelle 21: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 22) (siehe auch Abb. 18)



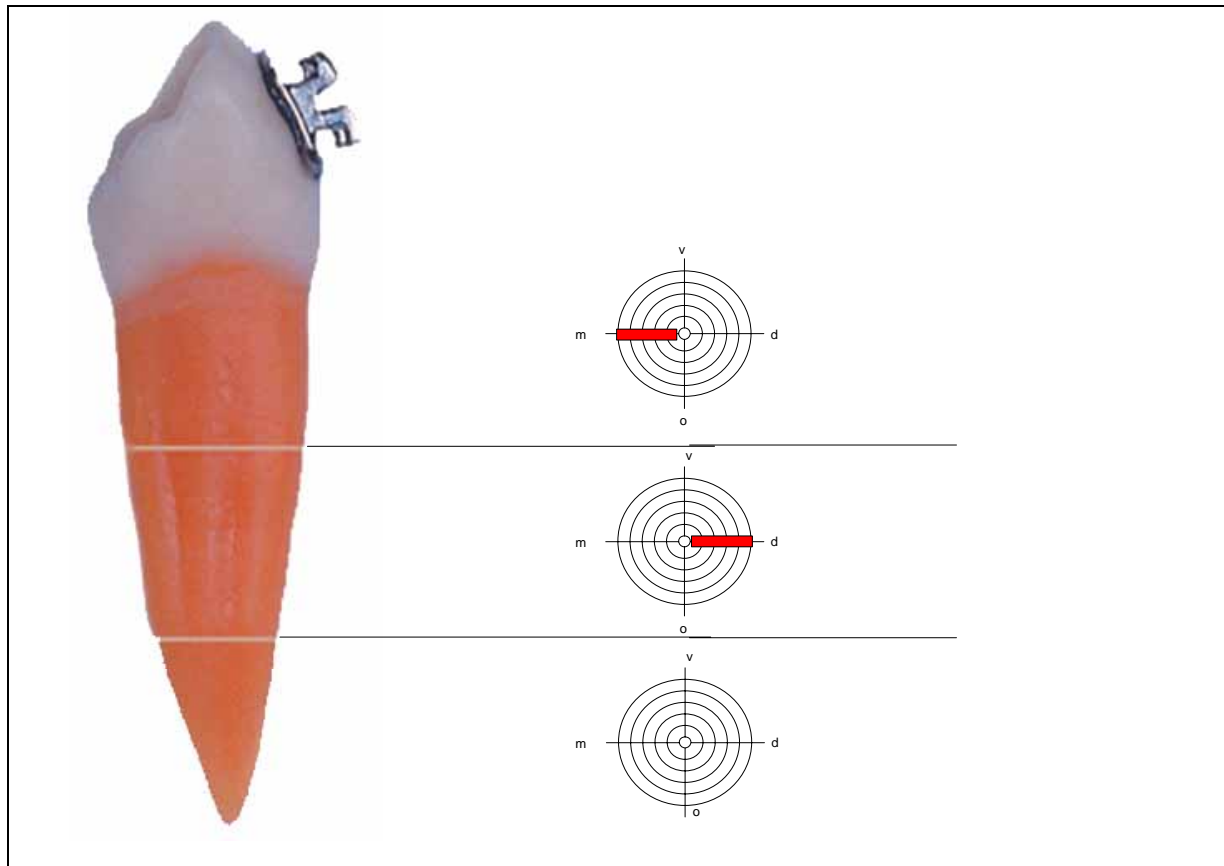
N=2 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	501µm	74µm	mitte	distal
2	456µm	120µm	koronal	oral

Abb. 43 / Tabelle 22: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 23) (siehe auch Abb. 18)



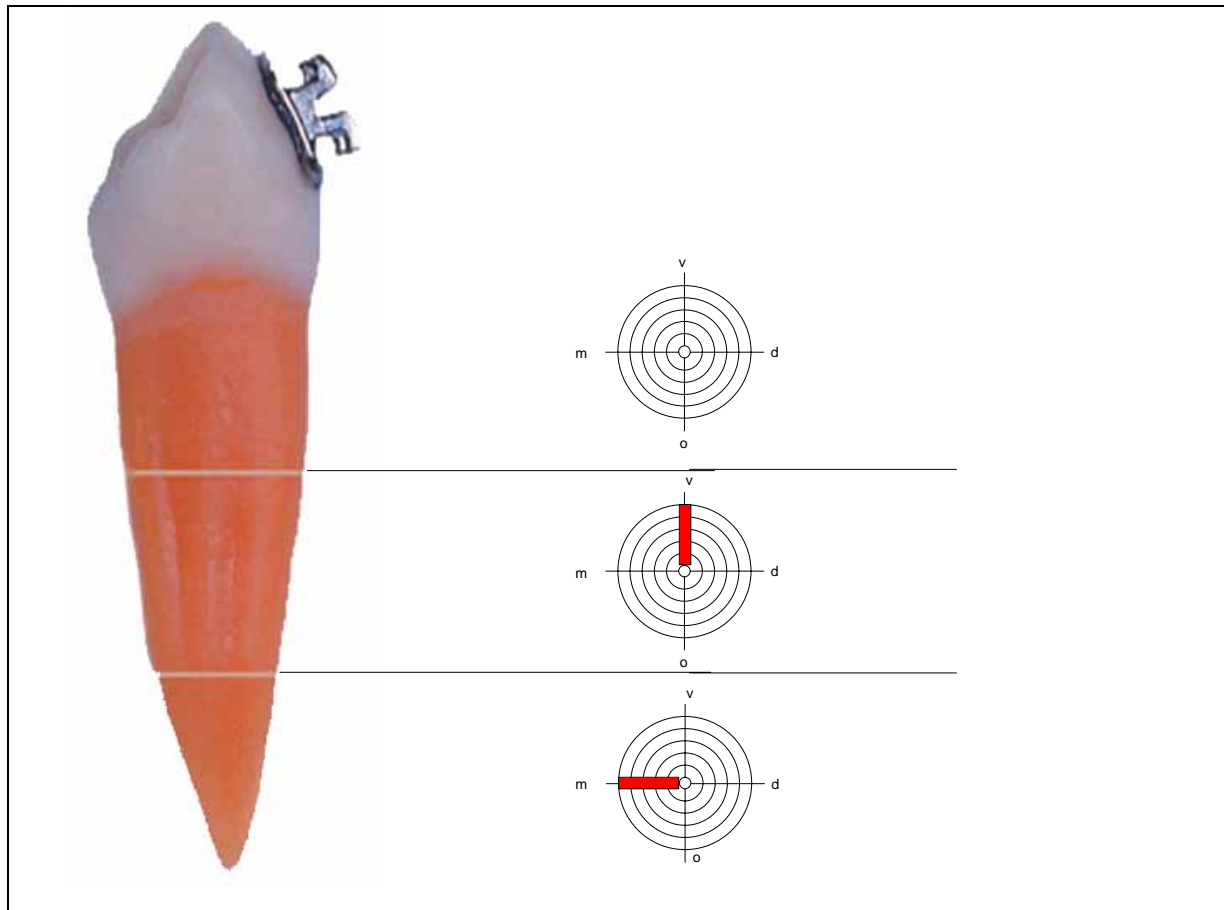
N=2		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	478µm	165µm	mitte	distal
2	333µm	143µm	koronal	mesial

Abb. 44 / Tabelle 23: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes eines Patienten (Patienten-Nr. 24) (siehe auch Abb. 18)



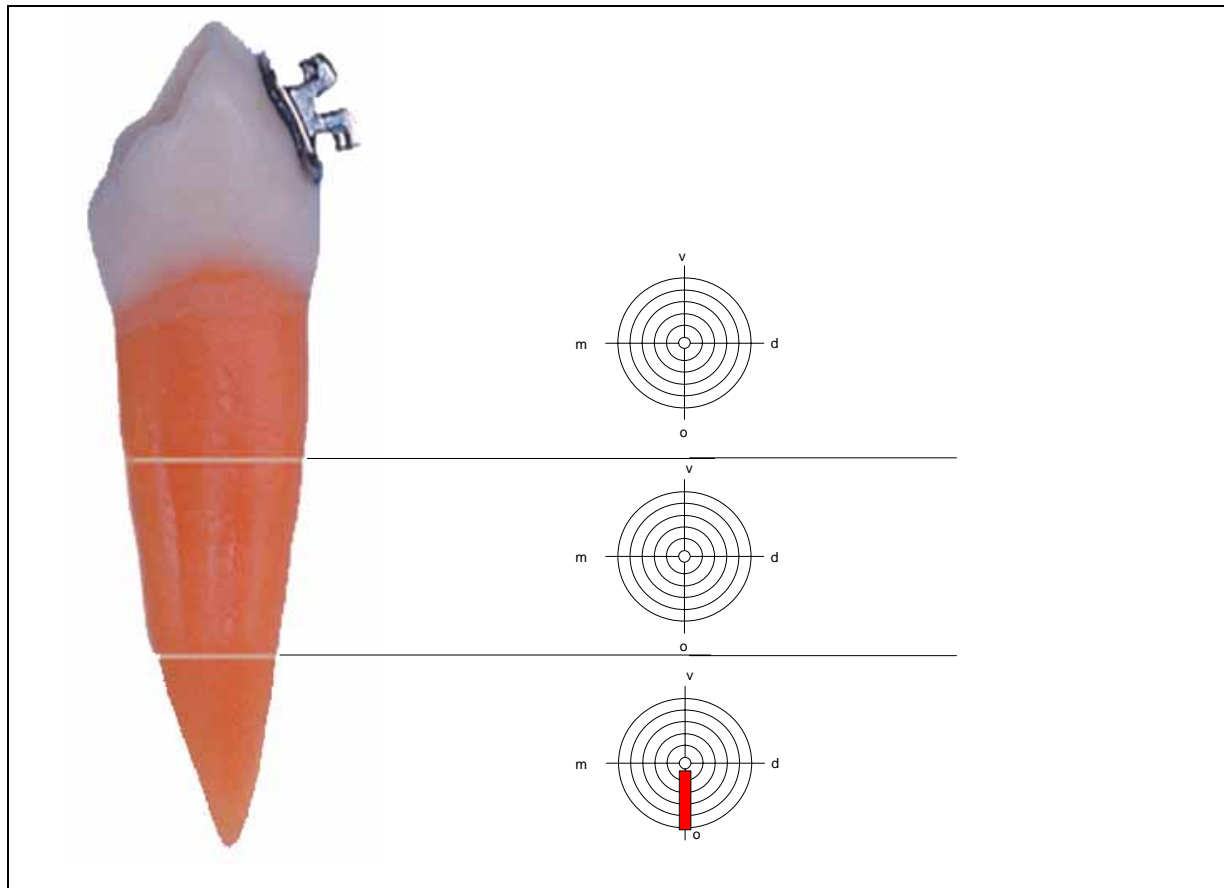
N=2 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	362µm	221µm	mitte	distal
2	211µm	150µm	koronal	mesial

Abb. 45 / Tabelle 24: Untersuchungsergebnisse des Oberkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 25) (siehe auch Abb. 18)



N=2		(Anzahl Resorptionen)		
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	202µm	90µm	apikal	mesial
2	319µm	150µm	mitte	vestibulär

Abb. 46 / Tabelle 25: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 26) (siehe auch Abb. 18)



N=1 (Anzahl Resorptionen)				
Resorption	Länge	Tiefe	Lokalisation	
			Wurzel	Zahnfläche
1	190µm	88µm	apikal	oral

Abb. 47 / Tabelle 26: Untersuchungsergebnisse des Unterkieferzahnes einer Patientin (Patienten-Nr. 27) (siehe auch Abb. 18)

5.5 Übersicht der Ergebnisse

In Tabelle 27 sind die wichtigsten Untersuchungsergebnisse zusammengefasst.

Patienten-Nr.	Präparat-Nr.	Resorptionsanzahl	ØResorptionslänge	ØResorptions-tiefe
1	1	1	168µm	27µm
	2	1	497µm	112µm
	3	1	406µm	167µm
	4	2	585µm	139µm
2	5	2	271µm	121µm
	6	2	301µm	76µm
3	7	2	740µm	223µm
	8	1	322µm	140µm
4	9	5	244µm	56µm
5	10	3	658µm	147µm
6	11	3	1192µm	287µm
7	12	3	347µm	124µm
8	13	1	146µm	116µm
9	14	3	634µm	72µm
10	15	4	458µm	116µm
11	16	2	342µm	95µm
12	17	1	288µm	105µm
13	18	5	393µm	167µm
14	19	4	607µm	148µm
15	20	1	541µm	128µm
16	21	3	499µm	195µm
	22	2	478µm	97µm
17	23	2	406µm	154µm
	24	2	286µm	180µm
	25	2	260µm	120µm
	26	1	190µm	88µm

Tabelle27: Übersicht der Untersuchungsergebnissen

6. Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Auswirkungen initialer orthodontischer Kraftsysteme auf die äußere Dentin- und Zementoberfläche zu untersuchen. Die Untersuchungen erfolgten hierbei auf histologischer Ebene.

6.1 Diskussion der Literaturergebnisse im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen

Ein Vergleich mit den in der Literatur angeführten Untersuchungen zu Wurzelresorptionen erweist sich als schwierig, da die Versuchsbedingungen der dort beschriebenen Experimente meist voneinander abweichen. Zudem weisen die Studien in ihren Erhebungen unterschiedliche Schwerpunkte auf, sodass nur Teilaspekte vergleichend analysiert werden können. Auch die Tatsache, dass die meisten histologischen Studien zu Wurzelresorptionen in Tierversuchen durchgeführt werden [9,72,75,88,89,90], spielt hierbei eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die morphologischen und funktionellen Unterschiede im Bereich der Zähne und Parodontien führen dazu, dass die dort ermittelten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf den Menschen übertragbar sind [87].

Zum Vergleich der ermittelten Ergebnisse wurden nur Studien herangezogen, die einen entsprechenden Patientenstamm untersucht haben [2,15,47]. Diesen war gemeinsam, dass zunächst alle Patienten für vier Wochen mit einer festsitzenden orthodontischen Apparatur vorbehandelt wurden. Nach diesem Zeitraum wurden die Prämolaren entfernt und histologisch auf Wurzelresorptionen hin untersucht.

Das Ausmaß der durch kieferorthopädische Behandlungsmaßnahmen verursachten Resorptionen wurde in mehreren Studien u.a. in den Studien von Owman-Moll et.al. und Brezniak et al. [2,4,56,72] untersucht.

In allen erwähnten Publikationen konnten Resorptionsprozesse infolge kieferorthopädischer Behandlungsmaßnahmen mittels festsitzender Geräte festgestellt werden.

Betrachtet man die Ergebnisse der verschiedenen Studien, so lassen sich aus den verschiedenen Stellungnahmen der Autoren zwei Grundaussagen ableiten. Die eine Gruppe der Autoren vertritt die Meinung, dass die von kieferorthopädischen Geräten ausgehende Kraftwirkung ursächlich für die Entstehung von Zahnhartsubstanzdefekten ist und dass pathologische Veränderungen der Zahnhartsubstanz insbesondere durch vertikale Kräfte hervorgerufen werden [14,15,16,20,21,22,23]. Die andere Gruppe hingegen konnte in ihren Versuchen trotz vertikaler Kraftapplikation keine nennenswerten Veränderungen der Wurzeloberflächen feststellen [96].

In der vorliegenden Arbeit wurden die Wurzelresorptionsstellen sowohl hinsichtlich ihrer Lokalisation, als auch hinsichtlich ihres Resorptionsausmaßes untersucht.

6.1.1 Topografische Erfassung der Resorptionsstellen

Die ermittelten Resorptionstiefen und Resorptionslängen wurden bezüglich ihrer resorptiven Defekte mit den Ergebnissen aus den Arbeiten von [2,15,41,47] verglichen. In den erwähnten Studien wurde das Untersuchungsmaterial ebenfalls lichtmikroskopisch beziehungsweise raster-elektronenmikroskopisch untersucht.

Das Zusammenspiel aus anatomischer Beschaffenheit der Zahnwurzel und biomechanischer Komponente erzeugt ein lokalisiertes Auftreten der Wurzelresorptionen. Um diese genau lokalisieren zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit die Wurzeloberfläche der zu untersuchenden Zähne in zwölf Bereiche unterteilt. Diese Einteilung ergab sich zum einen aus der Unterteilung der Wurzel in drei Abschnitte und zum anderen aus der Gliederung jedes Wurzelabschnittes entsprechend der vier Zahnflächen. Der erste Bereich beinhaltet die Wurzelspitze, der zweite das mittlere Wurzeldrittel und der dritte den koronalen Wurzelanteil.

Hierbei zeigt sich, wie auch in den Studien von Owman-Moll [2] und Wehrbein [41] beschrieben, dass der apikale Wurzelabschnitt die größte und der koronale Wurzelanteil die geringste Anzahl an Resorptionsstellen aufweist. Dennoch sind deutliche Unterschiede in den absoluten Werten zu erkennen. Insbesondere im apikalen und koronalen Wurzelanteil wurden resorptive Prozesse beobachtet. Im mittleren Anteil traten die pathologischen Veränderungen weitaus weniger häufig auf.

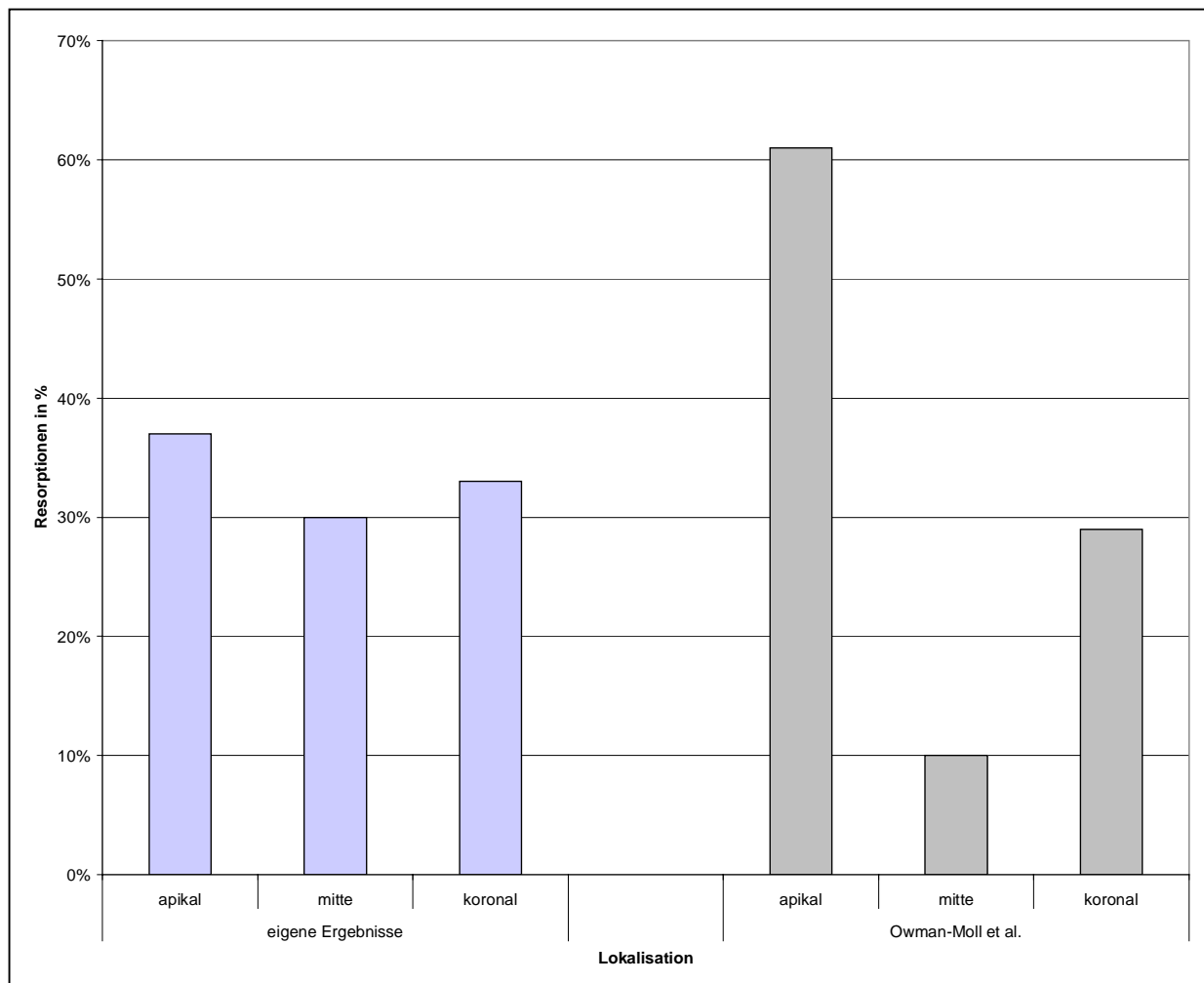


Abb. 48: Prozentuale Verteilung der Resorptionsstellen aus [2] im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen

Nach Wehrbein et al. [41] sprechen diese Ergebnisse für eine hohe Druckbelastung bei unkontrollierter Kippung. Sie widersprechen jedoch den Ergebnissen von Faltin et al. [15]. Hier konnten im zervikalen Anteil keine resorptiven Prozesse festgestellt werden. Die unterschiedlichen Ergebnisse resultieren aus den jeweils angewandten Krafrichtungen. In der Studie von Faltin et al. [15] wurden die Zähne intrudiert, in den Versuchen von Wehrbein et al. [41] erfolgte die Zahnbewegung in bukkaler Richtung. Henry-Weinmann et al. [47] sieht die Ursache für die hohe Resorptionsneigung des apikalen Wurzeltrittels in der zementalen Struktur dieses Wurzelanteils. Der apikale Wurzelbereich ist mit zellulärem Zement bedeckt. Der Zement im mittleren Wurzeltrittel enthält weniger Zellen, der Zement im koronalen Drittel ist azellulär. Der zelluläre Zement verfügt über eine hohe Bildungsrate und somit über sehr teilungsaktive Zellen. Nach Henry-Weinmann könnte die gesteigerte Proliferationsaktivität dafür verantwortlich sein, dass diese Zellen leichter geschädigt werden können, als die sich langsam teilenden Zellen des azellulären Zements, wodurch es zur Bildung größerer Resorptionslakunen kommen kann.

Um eine etwas einheitlichere Aussage über die Lokalisation der pathologischen Veränderungen machen zu können, wurde die durchschnittliche Lokalisationshäufigkeit unabhängig vom Wurzelabschnitt ermittelt. Hierbei zeigte sich, dass die resorptiven Prozesse vorwiegend im vestibulären Anteil der Wurzel auftraten. Die hierbei ermittelten Ergebnisse stimmen mit denen aus der Studie von Henry-Weinmann et al. [47] überein. In dieser Studie wurden die Resorptionen weitaus häufiger im mesialen als im distalen und ebenso häufiger im vestibulären als im oralen Wurzelbereich festgestellt. Letzteres war auch in unserer Studie der Fall. Im mesialen und distalen Anteil wurden jedoch gleich viele Resorptionen beobachtet. Die höhere Resorptionsneigung im mesialen Wurzelanteil wird in dieser Studie mit dem Mesialdrift der Zähne erklärt.

Weinmann und Schour [29,36] stellten in ihrer Studie bei Ratten eine höhere Resorptionsneigung an der distalen Wurzeloberfläche der Zähne fest. Dieser Befund korreliert mit dem Distaldrift der Rattenmolaren.

Die höhere Resorptionsneigung der vestibulären Wurzeloberfläche ergibt sich aus der physiologischen Bewegung der Zähne in eine vestibulärer Richtung [47].

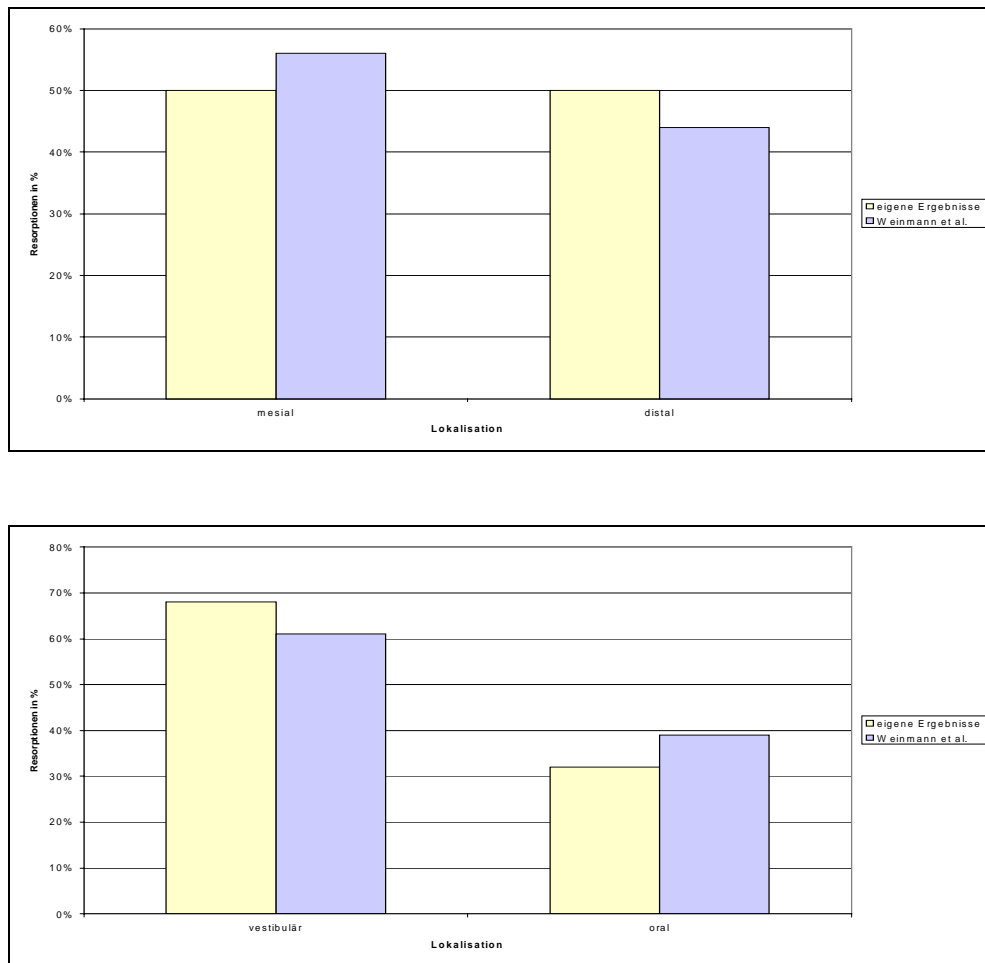


Abb. 49 a/b: Prozentuale Verteilung der Resorptionsstellen nach Zahnflächen aus [47] im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen

Auch in der Studie von Hughes et al. [110] zeigten sich die resorptiven Prozesse vermehrt auf der vestibulären Wurzeloberfläche.

6.1.2 Resorptionsausmaß

Eine ähnliche histologische Studie zur Untersuchung von Wurzelresorptionen an menschlichen Prämolaren wurde von Owmann-Moll et al. [2] durchgeführt. Auch in dieser Arbeit erfolgte die histologische Untersuchung an ersten Prämolaren, die im Rahmen einer Extraktionstherapie entfernt werden mussten. Die Dauer der Kraftapplikation betrug vier beziehungsweise sieben Wochen. Die resorptiven Prozesse wurden hinsichtlich ihrer Resorptionslänge sowie ihrer Resorptionstiefe in Abhängigkeit verschiedener Kraftgrößen (50 cN und 100 cN) untersucht. Hierfür wurde das Untersuchungsmaterial in zwei Gruppen eingeteilt, wobei die Kraftapplikation in der einen Gruppe 50 cN, in der anderen 100cN betrug.

Sowohl in der Studie von Owman-Moll als auch in der vorliegenden Arbeit wiesen alle untersuchten Zähne pathologische Veränderungen der Wurzeloberfläche auf.

Eine quantitative Gegenüberstellung der ermittelten Ergebnisse mit denen aus der Arbeit von Owman-Moll et al. ist ansatzweise möglich, da der Versuchsaufbau annähernd dem der vorliegenden Arbeit entspricht.

In dieser Publikation wurden ebenfalls die Resorptionslängen und -tiefen an extrahierten und histologisch aufbereiteten Zähnen gemessen. Vergleicht man die gemessenen Resorptionslängen aus der Studie von Owman-Moll et al. [2] mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, so zeigt sich eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten, die nach vierwöchiger Belastung mit 100 cN registriert wurden.

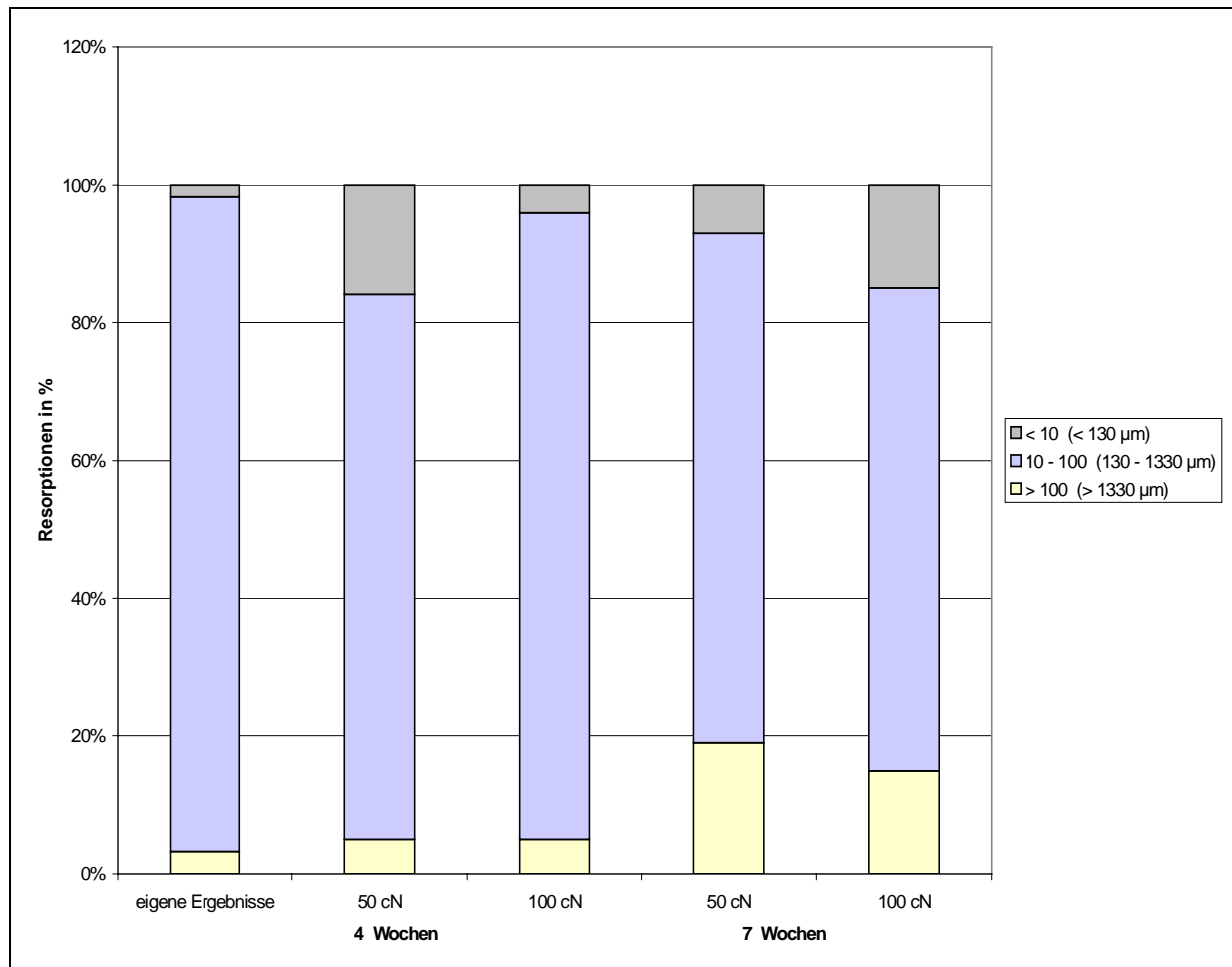


Abb. 50: Resorptionslängen aus [2] im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen

Die Abbildung 50 gibt die Größen der Resorptionslängen nach vierwöchiger und siebenwöchiger Vorbehandlung aus [2] im Vergleich zu den in der vorliegenden Arbeit gemessenen Werten wieder.

Neben den Resorptionslängen wurden von Owman-Moll [2] auch die Resorptionstiefen nach vierwöchiger und siebenwöchiger Vorbehandlung gemessen. In diesem Fall weisen die Werte der vorliegenden Arbeit eine weitaus höhere Übereinstimmung mit den Werten nach siebenwöchiger Vorbehandlung mit 50 cN auf.

Die Abbildung 51 gibt die Resorptionstiefen nach vier- und siebenwöchiger Vorbehandlung im Vergleich zu den in der vorliegenden Arbeit registrierten Werten wieder.

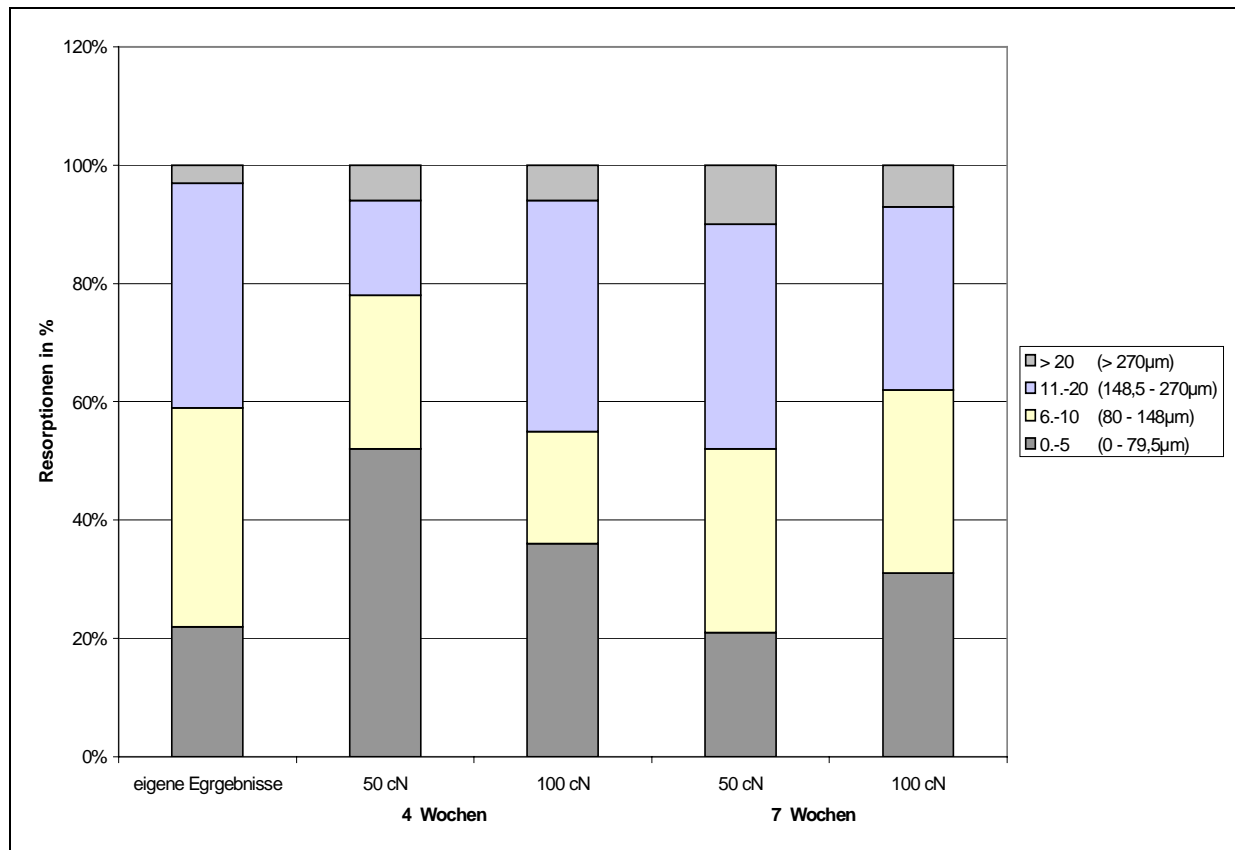


Abb. 51: Resorptionstiefen aus [2] im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen

Bei der Messung der Resorptionslängen und Resorptionstiefen wiesen alle Wurzelabschnitte unterschiedliche Messwerte auf, sodass diese zu einer gewissen Kategorisierung der Ergebnisse beitragen können.

Um eine einheitlichere Aussage über die Größe der resorptiven Prozesse machen zu können, wurden die durchschnittlichen Längen und Tiefen der einzelnen Resorptionsstellen unabhängig vom jeweiligen Wurzelabschnitt berechnet. Hierbei konnte eine durchschnittliche Resorptionslänge von 475 μm und eine durchschnittliche Resorptionstiefe von 138 μm festgestellt werden. Die in dieser

Studie gemessenen Resorptionstiefen entsprechen den Angaben aus der Studie von Henry-Weinmann et al. [47]. Obwohl mehrere Präparate hinsichtlich der Resorptionslänge im Bereich der durchschnittlichen Resorptionslänge von Henry et al. lagen, konnte eine abschließende Übereinstimmung der durchschnittlichen Resorptionslänge nicht festgestellt werden. Ein mögliche Ursache für diese Abweichung ist die unterschiedliche Anzahl der untersuchten Präparate. Die in dieser Studie untersuchten Resorptionslakunen waren im Durchschnitt 730 μm lang und 100 μm tief.

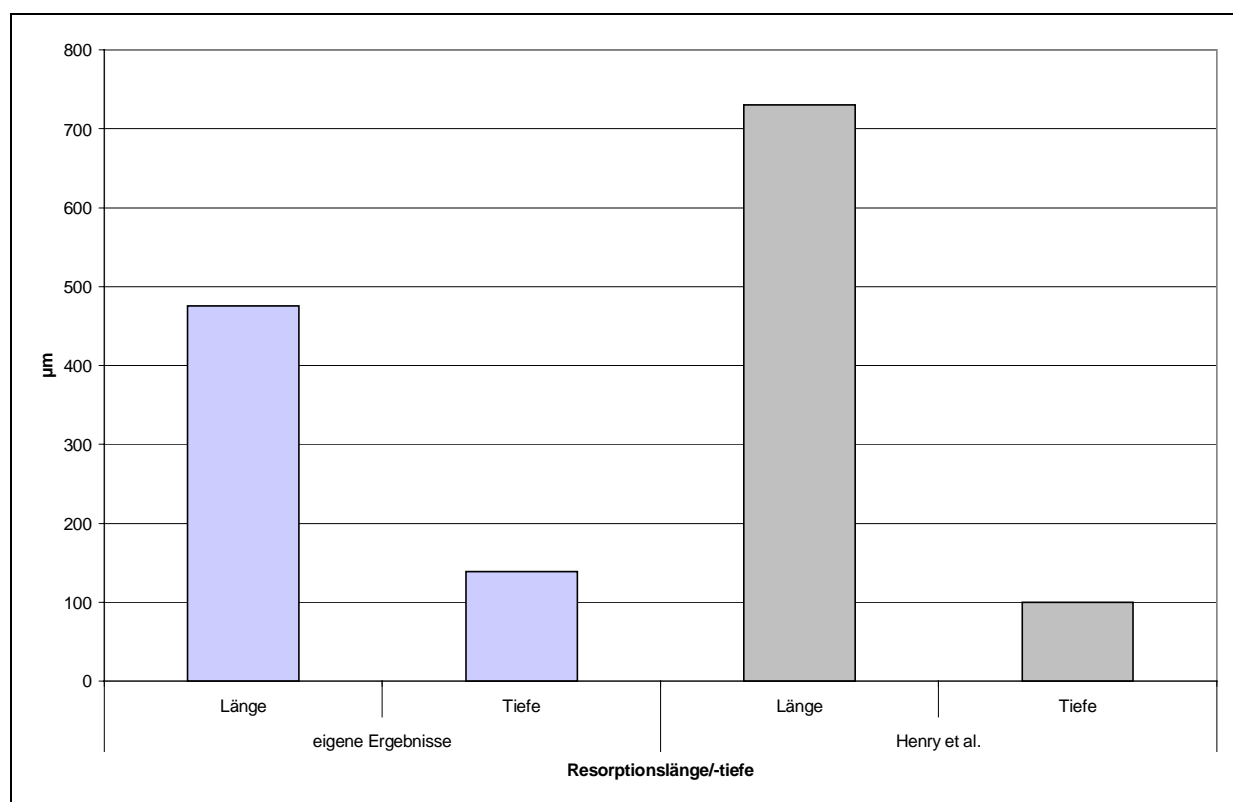


Abb. 52: Vergleich der gemessenen Resorptionslängen und –tiefen aus [47] mit den eigenen Ergebnissen

6.2 Diskussion der Versuchsmethodik

6.2.1 Patientenprofil

Die Patienten dieser Studie befanden sich alle am Anfang ihrer kieferorthopädischen Behandlung. Ihnen gemeinsam war ein erhöhter Platzmangel, der zwangsläufig die Extraktion der ersten Prämolaren im Rahmen der Therapie zur Folge hatte. Anstelle der sofortigen Extraktion wurden die zu extrahierenden Prämolaren zunächst für vier Wochen orthodontisch behandelt und erst nach Ablauf dieses Zeitraumes gezogen.

6.2.2 Versuchsprofil

Nach Extraktion der zu untersuchenden Zähne wurden die histologischen Präparate mittels Dünnschlifftechnik nach Donath [76] hergestellt. Diese Technik erwies sich als geeignetes Verfahren und ermöglichte die Herstellung von durchschnittlich 70µm dicken Schnitten.

Da die Verfahrenstechnik zahlreiche Grob- und Feinpoliturvorgänge beinhaltet, ist ein gewisser Materialverlust unvermeidbar. Dies führt zwangsläufig dazu, dass nicht alle resorptiven Stellen erfasst werden konnten.

Das Lichtmikroskop war für die Vermessung und topografische Zuordnung der Resorptionsstellen geeignet. Die Vermessung einzelner, stark angegriffener Bereiche, erwies sich jedoch als schwierig, da der Resorptionsrand nur annähernd bestimmt werden konnte. Aufgrund dessen konnte nur die ungefähre Ausdehnung der resorptiven Stellen hinsichtlich ihrer Resorptionslänge und ihrer Resorptionstiefe bestimmt werden.

Die Vermessung der Resorptionsstellen erfolgte computergestützt mit dem Programm Amazing Picture Measurement [81], welches sich für die Versuchsauswertung sehr bewährte. Zur Färbung der Präparate wurde eine Toluidinblau-Färbung verwendet. Diese Färbung zeichnet sich insbesondere durch

ihre Einfachheit und gute Standardisierbarkeit aus und bietet darüber hinaus gute Differenzierungsmöglichkeiten durch metachromatische Farbeffekte [39,65,67].

6.3 Schlussfolgerungen

Die in der vorliegenden Arbeit in vitro erhobenen Daten deuten daraufhin, dass die Applikation von Kräften zur Ausbildung von Resorptionen an Zahnwurzeln führt. Die erste Schlussfolgerung, die sich daraus ergibt, ist, dass die kieferorthopädische Behandlung - insbesondere in der Anfangszeit - äußerst behutsam angegangen werden sollte. Dies gilt insbesondere bei den Patienten, die aufgrund bestimmter Faktoren ein erhöhtes Risiko für Wurzelresorptionen aufweisen. Faltin et al. [15] stellten in ihrer Studie fest, dass die untersuchten Zähne bei höherer Kraftapplikation größere und ausgedehntere Resorptionen der mineralisierten Zementoberfläche aufwiesen als bei geringerer Kraftapplikation.

Trotz dieser Erkenntnisse ist eine allgemein zutreffende Aussage bezüglich des Resorptionsverhaltens von in kieferorthopädischer Behandlung befindlicher Patienten nicht ableitbar. Dies ergibt sich zum einen aus der Problematik der verschiedenen therapeutischen Behandlungsweisen (zum Beispiel angewandte Apparatur, Kraftgrößen), zum anderen aus dem Umstand, dass außer der Kraft noch weitere Faktoren (z.B. Genetik) auf das Resorptionsverhalten Einfluss nehmen. Zur Prüfung der Frage, inwieweit diese Ergebnisse auf alle Patienten übertragbar sind, müssten weiterreichende histologische Studien durchgeführt werden.

Des Weiteren sollte die Frage geklärt werden, inwieweit das Auftreten von Resorptionen durch eine Reduktion der Kraft verhindert werden kann. In der Studie von Verna et al. [29] wurde festgestellt, dass bei kieferorthopädisch behandelten Zähnen der Anteil an Wurzelresorptionen größer ist, als bei unbehandelten Zähnen. Eine diesbezügliche Aussage konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht getroffen werden, da die dafür benötigte Kontrollgruppe nicht vorhanden war.

Die Möglichkeiten, die das Lichtmikroskop zur Diagnostik pathologischer Oberflächenveränderungen bietet, wurden in dieser In-vivo-Studie genutzt. An allen

untersuchten Zähnen konnten Resorptionen festgestellt werden. Diese hohe Genauigkeit konnte bei röntgenologischen Untersuchungen bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erreicht werden, da kleine Destruktionen nicht erfasst werden können. Deshalb sollten zukünftig andere Techniken zur Diagnose von Wurzelresorptionen entwickelt werden. Forschungen im Bereich der Messung von Dentinmatrixproteinen in der Sulkusflüssigkeit könnten eine solche zukünftige Diagnosetechnik darstellen [84].

Da es sich bei der Entstehung von Wurzelresorptionen um ein multifaktorielles Geschehen handelt, erweist sich die Interpretation der Faktoren, die Einfluss auf die resorptiven Prozesse haben, als sehr schwierig. Weitere Faktoren, die ebenfalls für das Auftreten und das Ausmaß von Resorptionsvorgängen verantwortlich sein könnten, wären die Knochenqualität und die Knochenumbaurate.

Nach Misch [109] werden vier verschiedene Knochenqualitätsklassen von D1-D4 unterschieden. Charakteristisch für D1-Knochen ist eine sehr dichte Kompakta sowie eine reduzierte Blutversorgung. D2-Knochen hingegen verfügen über eine dichte, aber poröse Kompakta und eine engmaschige Spongiosa, wodurch eine gute Blutversorgung gewährleistet werden kann. Bei D3- und D4-Knochen steht der spongiöse Anteil des Knochens im Vordergrund. Charakteristisch für diese Knochenqualitätsklassen ist, dass sie sich sowohl durch eine geringere Knochendichte als auch durch eine gute Gefäßversorgung auszeichnen.

Im Rahmen einer klinischen Studie wäre es sinnvoll der Frage nachzugehen, inwieweit die resorptiven Vorgänge von der Knochenqualität des Patienten abhängen.

Verna et al. [29] stellten in ihrer Studie fest, dass die Knochenumbaurate einen Einfluss auf das Ausmaß von Wurzelresorptionen hat. Bei Patienten, bei denen aufgrund eines Hypoparathyroidismus eine verringerte Knochenumbaurate vorlag, konnten auch an nicht kieferorthopädisch behandelten Zähnen vermehrt Wurzelresorptionen nachgewiesen werden. Verna et al. vermuten, dass bei verringerter Knochenumbaurate die Wurzeloberfläche bereits in Form von kleinen Wurzelresorptionen vorgeschädigt ist, und dass diese infolge mechanischer Belastungen stark zunehmen.

Neben der Prävention und der frühzeitigen Diagnostik von Wurzelresorptionen sollten sich zukünftige Forschungsprojekte mit den Entstehungsmechanismen von

Wurzelresorptionen beschäftigen. Trotz zahlreicher Untersuchungen sind bis heute noch viele Fragen ungeklärt.

Zwar konnten durch histologische Analysen, die sich mit der Thematik der Wurzelresorptionen beschäftigt haben, Erkenntnisse über die chronologische Abfolge von Zell- und Gewebeveränderungen, die für das Voranschreiten von Wurzelresorptionen verantwortlich sind, gewonnen werden. Jedoch ist bis heute die Verbindung zwischen molekularer Kontrolle sowie Regulation einerseits und der Entstehung histologischer Veränderungen andererseits ungeklärt. Folglich sollten sich die zukünftigen Bemühungen mit der Identifizierung der Moleküle, die an der Entstehung von Wurzelresorptionen beteiligt sind, befassen. Vergleicht man die mRNA aus Parodontien von Ratten, die orthodontischen Kräften ausgesetzt waren, mit denen, die keine Kraftapplikation erfahren haben, so scheint eine molekulare Vorbestimmung für die Anfälligkeit von Wurzelresorptionen denkbar [97]. Die daraus gewonnenen genetischen Informationen könnten dazu beitragen, Patienten, die besonders anfällig für Wurzelresorptionen sind, bereits vor Therapiebeginn zu identifizieren. Des Weiteren könnte hiermit eine potentielle Reduzierung der Wurzelresorptionen erreicht werden sowie eine Verringerung der Kosten, die durch unspezifische Überwachungsmaßnahmen entstehen.

An dieser Stelle sollte auch geprüft werden, ab welchem Zeitpunkt der Resorptionsprozess nach Beendigung der Kraftapplikation zum Stillstand kommt. In einigen röntgenologischen Studien wurde von einem sofortigen Resorptionsstillstand nach Beendigung der Krafteinwirkung berichtet, während in anderen Studien ein konstantes Fortschreiten des Prozesses zu verzeichnen war [83]. Eine histologische Analyse während der orthodontischen Therapie hinsichtlich des Resorptions- und Reparaturverhaltens der Zahnhartsubstanz könnte diesbezüglich wertvolle Ergebnisse liefern.

Das Ausmaß und die Wirkung des Reparationsprozesses auf Resorptionslakunen hinsichtlich der Vitalität und Langlebigkeit der angegriffenen Zähne ist ebenfalls nicht bekannt. In der Literatur liegen keine Berichte über Zahnverluste aufgrund starker Wurzelresorptionen vor. Nur wenige Studien haben langfristige Untersuchungen durchgeführt und sich mit der Elongation von wurzelresorptionsgeschädigten Zähnen befasst [85,86]. Im Rahmen einer Langzeitstudie könnten die Auswirkungen und

Folgen, welche von den resorptiven Prozessen ausgehen, insbesondere hinsichtlich der Frage eines späteren Zahnverlustes, untersucht werden.

In allen neueren Literaturberichten wird auf die schützende Funktion der oberflächlichen Wurzelschichten - hierzu zählt insbesondere das unmineralisierte Zement - hingewiesen [111]. Auffällig ist, dass diese Schichten keine kollagenen Materialien enthalten. Fest steht, dass der Schweregrad der Wurzeloberflächendefekte während der orthodontischen Therapie im kindlichen und jugendlichen Gebiss weit geringfügiger ausfällt als im bleibenden Gebiss [103].

In einer klinischen Studie von Mirabella et al. wurde jedoch festgestellt, dass das Resorptionsausmaß bei Erwachsenen, die bereits im jugendlichen Alter einer kieferorthopädischen Therapie unterzogen worden waren, wesentlich geringer ausfiel, als bei Erstbehandlung im Erwachsenenalter [37].

Diese Erkenntnis wirft mehrere Fragen auf. Über welchen schützenden Effekt verfügten die Wurzeln bei der ersten Behandlung? Warum ist das Resorptionsausmaß bei Jugendlichen geringer ausgeprägt? Verfügt der remodellierte Zement über zusätzliche schützende Effekte in seiner äußeren Schicht?

Schließlich wäre es auch interessant zu untersuchen, inwieweit die präventive Gabe von Medikamenten die Entstehung von Wurzelresorption verhindern kann.

Ein experimenteller Ansatz hierfür wäre die Hemmung der Interaktion von RANKL und RANK durch die Gabe von OPG¹. OPG fungiert als negativer Regulator des RANKL/RANK-Systems. Im Rahmen der Arteriitisforschung konnte eine signifikante Hemmung der Knochenerosion durch die Verabreichung von OPG festgestellt werden [68,91]. Auch die direkte Hemmung der Osteoklasten durch Bisphosphonate würde ein interessanter Therapieansatz darstellen.

Eine solche umfassende behandlungsbegleitende Optimierung und präzise Ursachenforschung könnte zusätzliche Informationen über die Interaktion zwischen Kraftapplikation und Resorptionsverhalten der Zahnhartsubstanz geben sowie neue Ansatzpunkte zur Forschung nach neuen Materialien und Behandlungsmethoden liefern, um somit das Ziel, die Prävention von Wurzelresorptionen, näher zu bringen.

¹ OPG: Osteoprotegerin

7. Zusammenfassung

Der starke Anstieg kieferorthopädischen Behandlungen und die möglichen Gefahren, die aus solchen Behandlungen resultieren, wie etwa Wurzelresorptionen oder unkontrollierte Zahnwanderungen, nehmen als Diskussionsthematik in der Literatur einen immer größer werdenden Stellenwert ein [4,15,29].

Aus diesem Grund wurde das Resorptionsverhalten von Zähne nach initialer orthodontischer Therapie untersucht [15,29].

Der Schwerpunkt dieser Studie lag in der Diagnostik atypischer Wurzeloberflächenveränderungen extrahierter Prämolaren. Hierzu wurden von insgesamt 17 Patienten 26 Zähne untersucht. Die Zähne stammten von 12 weiblichen und von 5 männlichen Patienten ab. Alle Zähne befanden sich in einem parodontal gesunden Zustand und wiesen ein vollständig abgeschlossenes Wurzelwachstum auf. Zur Klärung der Frage inwieweit die Behandlung mit superelastischen Nivellierungsbögen zur Bildung von Wurzelresorptionen führt, erfolgte zunächst eine orthodontische Behandlung der Zähne für vier Wochen.

Anschließend wurden die zu untersuchenden Zähne extrahiert und mittels Dünnschliff-Technik nach Donath histologisch aufbereitet. Hierzu wurde der Kronenteil von der Wurzel abgetrennt. Diese wurde zunächst über mehrere Tage hinweg über eine aufsteigende Kunststoff-Alkohol-Reihe entwässert und anschließend in einen lichthärtenden Kunststoff eingebettet und zu einem Gewebblock verarbeitet. Von jedem Gewebblock wurden im Abstand von je 1mm insgesamt 12 Schnitte angefertigt, die anschließend und auf Objektträger appliziert und gefärbt wurden. Die gewonnenen Präparate wurden dann lichtmikroskopisch auf mögliche Wurzeloberflächenveränderungen hin untersucht.

Zur Quantifizierung der durch die Belastung hervorgerufenen Oberflächenveränderungen erfolgte im Rahmen der lichtmikroskopischen Untersuchung die visuelle Beurteilung der Topografien sowie eine computergestützte Berechnung der Tiefen- und Längenausdehnung der resorptiven Veränderungen an Hand digitaler Aufnahmen. Hierbei diente die Einteilung der Zahnwurzel, zum einen in drei horizontale Abschnitte (apikal, mitte, koronal) und zum anderen in vier

vertikale Abschnitte (mesial, distal, vestibulär, oral) zur Lagebestimmung der Resorptionsstellen.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse deuten auf eine erhöhte Resorptionsanfälligkeit der Wurzel kieferorthopädisch behandelter Zähne hin und erlauben, in Abhängigkeit von Stärke und Richtung der in dieser Studie applizierten Kräfte, eine Kategorisierung der Wurzelabschnitte in hohe und geringe Resorptionstendenz.

In die Gruppe mit erhöhter Resorptionsbereitschaft wurde der zervikale und apikale Wurzelabschnitt eingereiht. Das Ergebnis, dass in diesen beiden Wurzelabschnitten die meisten resorptiven Veränderungen zu verzeichnen sind, deckt mit den Aussagen aus der Literatur.

Im apikalen Wurzelabschnitt wurde mit durchschnittlich $362\mu\text{m}$ die geringste Resorptionslänge und mit durchschnittlich $105\mu\text{m}$ die geringste Resorptionstiefe registriert. Die Resorptionen im zervikalen Wurzelbereich lagen mit einer durchschnittlichen Resorptionslänge von $501\mu\text{m}$ und einer durchschnittlichen Resorptionstiefe von $150\mu\text{m}$ im mittleren Messbereich. Obwohl der mittlere Wurzelabschnitt die geringste Anzahl an Wurzelresorptionen aufwies, wurden in diesem Bereich mit einer durchschnittlichen Resorptionslänge von $563\mu\text{m}$ und einer durchschnittlichen Resorptionstiefe von $160\mu\text{m}$ die größten horizontalen und vertikalen Oberflächenveränderungen gemessen. Beim Vergleich der Resorptionslängen aus dem koronalen und apikalen sowie dem apikalen und mittleren Wurzelabschnitt ergaben sich deutlich signifikante Unterschiede. Diese signifikanten Unterschiede ergaben sich ebenfalls beim Vergleich der Resorptionstiefen aus dem koronalen und dem apikalen sowie aus dem apikalen und mittleren Wurzelabschnitt. Die durchschnittliche Resorptionslänge pro Zahn lag bei $475\mu\text{m}$, die durchschnittliche Resorptionstiefe bei $138\mu\text{m}$. Diese Ergebnisse weichen von den in der Literatur gefundenen ab. Die Ursache hierfür könnte in der unterschiedlichen Anzahl der untersuchten Präparate liegen.

In vorliegenden Studie wurde ebenfalls die Verteilung der Resorptionen nach Wurzelabschnitt untersucht. Hierbei zeigte sich, dass der apikale Wurzelabschnitt mit 37% am häufigsten betroffen war. In diesem Abschnitt traten die Resorptionen meist zirkulär, vorwiegend auf der mesialen, vestibulären und distalen Zahnfläche auf. Der

koronale Wurzelabschnitt lag mit 33% im mittleren Resorptionsbereich. Hier traten die Resorptionen insbesondere im vestibulären Anteil auf. Der mittlere Wurzelabschnitt zeigte mit 30% den geringsten Anteil an resorptiven Defekten. Diese traten überwiegend im distalen Anteil der Zahnwurzel auf. Die Untersuchung der Wurzelresorptionen nach Wurzelfläche zeigte, dass die Resorptionen häufiger im vestibulären als im oralen Bereich auftraten. Im mesialen und distalen Anteil traten sie gleich häufig auf. Diese Ergebnisse decken sich mit denen aus der Literatur. Auch hier treten die Resorptionen vermehrt im vestibulären Anteil der Wurzel auf. Des Weiteren wird in der Literatur darüber berichtet, dass die mesiale Wurzelfläche häufiger von resorptiven Veränderungen betroffen ist, als die distale.

Da in dieser Studie nach Applikation von kieferorthopädischen Kräften an allen Zähnen resorptive Veränderungen ersichtlich waren, könnten diese in einem Zusammenhang mit der kieferorthopädischen Therapie stehen. Die Veränderungen ließen sich bereits nach einem kurzen Behandlungszeitraum von vierwöchiger Kraftapplikation feststellen. Zudem konnten die resorptiven Erscheinungen, trotz Anwendung superelastischer Drähte, die sich durch eine besonders niedrige Kraftabgabe kennzeichnen, registriert werden.

Dennoch sind die experimentellen Ergebnisse nur eingeschränkt auf das allgemeine kieferorthopädische Patientenspektrum übertragbar. Sie erlauben keine absolute Aussage über das Resorptionsverhalten, da berücksichtigt werden muss, dass Wurzelresorptionen auch bei nicht kieferorthopädisch behandelten Patienten auftreten können. Insofern darf der Schluss, dass Resorptionen zwangsläufig kieferorthopädischer Natur sind, nicht gezogen werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um über ein ideales Kraftniveau für Zahnbewegungen bei Anwendung kontinuierlicher Kräfte mehr Erkenntnisse zu erhalten. Diese sollten zusätzlich mit einer entsprechenden Kontrollgruppe erfolgen.

Die Untersuchung pathologischer Wurzeloberflächenveränderungen bei präventiver Medikamentengabe erscheint insbesondere bei „Risikopatienten“ sinnvoll und ließe sich mithilfe des Lichtmikroskops bewerkstelligen.

8. Literaturverzeichnis

1. Furstman L, Bernick S: Clinical considerations of the periodontium. *Am J Orthod* 61 (1972), 138-155
2. Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D: Effects of doubled orthodontic force magnitude on tooth movement and root resorptions. An inter-individual study in adolescents. *Eur J Orthod* 18 (1996), 141-50
3. Jones M, Chan C: The pain and discomfort experienced during orthodontic treatment: A randomized controlled clinical trial of two initial aligning arch wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 102 (1992), 373-81
4. Brezniak N, Wasserstein A: Root resorption after orthodontic treatment. Part I. *Am J Orthod Dentofacial Orthod* 103 (1993), 62-66
5. Sjolien T, Zachrisson B: Periodontal bone support and tooth length in orthodontically treated and untreated persons. *Am J Orthod* 64 (1973), 28-37
6. Reitan K, Kvam E: Comparative behavior of human and animal tissue during experimental tooth movement. *Angle Orthod* 41 (1971), 1-14
7. Rygh P: Ultrastructural vascular changes in pressure zones of rat molar periodontium incident to orthodontic tooth movement. *Scand J Dent Res* 1980 (1972), 307-321
8. Ngan P, Kess B, Wilson S: Perception of discomfort by patients undergoing orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 96 (1989), 47-53
9. Kvam E: Cellular dynamics on the pressure side of the rat periodontium following experimental tooth movement. *Scand J Dent Res* 80 (1972), 369-383

10. Murrell EF, Yen EH, Johnson RB: Vascular changes in the periodontal ligament after removal of orthodontic forces. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 110 (1996), 280-286
11. Mirabella AD, Artun J: Risk factors for apical root resorption of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 108 (1995), 48-55
12. Bergius M, Kiliaridis S, Berggren U: Pain in orthodontics. A review and discussion of the literature. *J Orofac Orthop* 61 (2000), 125-37
13. Sismanidou C, Lindskog S: Spatial and temporal repair patterns of orthodontically induced surface resorption patches. *Eur J Oral Sci* 103 (1995), 292-298
14. Jeon PD, Turkey PK, Moon HB, Ting K: Analysis of stress in the periodontium of the maxillary first molar with a three-dimensional finite element model. *Am Orthod Dentofacial Orthop* 115 (1999), 267-74
15. Faltin RM, Arana-Chavez VE, Faltin K, Sander FG, Wichelhaus A: Root resorption in upper first premolars after applikation of continuous intrusive forces. Intra-individual study. *J Orofac Orthop* 59 (1998), 208-19
16. Christiansen RL, Burstone CJ: Centers of rotation within the periodontal space. *Am J Orthod* 55 (1969), 353-69
17. Reitan K: Initial tissue behavior during apical root resorption. *Angle Orthod* 44 (1974), 68-82
18. Redlich M, Shoshan S, Palmon A: Gingival response to orthodontic force. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 116 (1999), 152-8

19. Friedrich D, Rosarius N, Rau G, Diedrich P: Measuring system for in vivo recording of force systems in orthodontic treatment-concept and analysis of accuracy. *J Biomech* 32 (1999), 81-85
20. Harris EF, Boggan BW, Wheeler DA: Apical root resorption in patients treated with comprehensive orthodontics. *J Tenn Dent Assoc* 81 (2001), 30-33
21. Acar A, Canyürek U, Kocaaga M, Erverdi: Continuous vs. discontinuous force application and root resorption. *Angle Orthod* 69 (1999), 159-164
22. Rudolph DJ, Willes PMG, Sameshima GF: A finite element model of apical force distribution from orthodontic tooth movement. *Angle Orthod* 71 (2001), 127-131
23. Faltin RM, Faltin K, Sander FG, Arana-Chavez VE: Ultrastructure of cementum and periodontal ligament after continuous intrusion in human: a transmission electron microscopy study. *Eur J Orthod* 23 (2001), 35-49
24. Melson B: Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement. *Angle Orthod* 69 (1999), 151-158
25. Lu LH, Lee K, Imoto S, Kyomens S, Tanne K: Histological and histochemical quantification of root resorption incident to the application of intrusive force to rate molars. *Eur J Orthod* 21 (1999), 57-63
26. Owman-Moll P, Kurol J: The early reparative process of orthodontically induced root resorption in adolescents-location and type of tissue. *Eur J Orthod* 20 (1998), 727-732
27. McNab S, Battistutta D, Taverne A, Symons AL: External apical root resorption following orthodontic treatment. *Angle Orthod* 70 (2000), 227-232
28. Kurol J, Owman-Moll P: Hyalinization and root resorption during early orthodontic tooth movement of adolescents. *Angle Orthod* 68 (1998), 161-165

29. Verna C, Dalstra M, Melsen B: Bone turnover rate in rats does not influence root resorption induced by orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 25 (2003), 359-363
30. Cotopoulos G, Nanda R: An evaluation of root resorption incident to orthodontic intrusion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 109 (1996), 543-548
31. Kvam E, Bondevik O, Gjerdet NR: Traumatic ulcers and pain in adults during orthodontic treatment. *Community Dent Oral Epidemiol* 17 (1989), 154-157
32. Taithongchai R, Sookkorn K, Killiany DM: Facial and dentoalveolar structure and the prediction of apical root shortening. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 110 (1996), 296-302
33. Fernandes LM, Ogaard B, Skoglund L: Pain and discomfort experienced after placement of a conventional or a superelastic NiTi aligning archwire. *J Orofac Orthop* 59 (1998), 331-339
34. Rosarius N, Friedrich D, Fuhrmann R, Rau G, Diedrich P: Concept and development of a measuring system for in vivo recording of orthodontically applied forces and torques in the multiband techniques. Part 1. *J Orofac Orthop* 57 (1996), 298-305
35. Sameshima GT, Sinclair PM: Predicting and preventing root resorption : Part 1. Diagnostic factors. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 119 (2001), 505-510
36. Weinmann JP, Schour I: Experimental studies in calcification. *Am J Pathol* 21 (1945), 821-875
37. Mirabella AD, Artun J: Prevalence and severity of apical root resorption of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *Eur J Orthod* 17 (1995), 93-99

38. Casa MA, Faltin R.M, Faltin K, Sander FG, Arana-Chavez VE: Root resorption in upper first premolars after application of continuous torque moment. *J Orofac Orthop* 62 (2001), 285-295
39. Diedrich P, Rudzki-Janson I, Wehrbein H, Fritz U: Effects of orthodontic bands on marginal periodontal tissues. A histologic study on two human specimens. *J Orofac Orthop* 62 (2001), 146-156
40. Zentner A, Panagiotis K, Heaney T: Early cellular reactions in mechanically stimulated gingival connective tissue. *J Orofac Orthop* 62 (2001), 476-487
41. Wehrbein H, Harhoff R, Diedrich P: Wurzelresorptionsrate bei orthodontisch bewegten, parodontal geschädigten und gesunden Zähnen. *Dtsch Zahnärztl Z* 145 (1990), 176-178
42. Baumrind S, Korn EL, Boyd RL: Apical root resorption in orthodontically treated adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 110 (1996), 311-320
43. Alhashimi N, Frithiof L, Brudvik P, Bakhiet M: Orthodontic tooth movement and de novo synthesis of proinflammatory cytokines. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 119 (2001), 307-312
44. Parker RJ, Harris EF: Directions of orthodontic tooth movements associated with external apical root sorption of the maxillary central incisor. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 114 (1998), 677-683
45. Burstone CJ: Application of bioengineering to clinical orthodontics. In: Graber TM, Swain BF(eds) *Orthodontics. Current principales and techniques*. CV Mosby Company, St. Louis, 1985: 193-227
46. Choy K, Pae EK, Park Y, Kim KH, Burstone CJ: Effect of root and bone morphology on the stress distribution in the periodontal ligament. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 117 (2000), 98-105

47. Henry JL: The pattern of resorption and repair of human cementum. *J Amer Dent Ass* 42 (1951), 270-290
48. McNab S, Battistutta D, Taverne A, Symons AL: External apical root resorption of posterior teeth in asthmatics after orthodontic treatment. *Am J Orthod dentofacial Orthop* 116 (1999), 545-551
49. Katzhandler E, Steigman S: Effect of repeated orthodontic treatment on the dental and periodontal tissues of the rat incisor. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 116 (1999), 642-650
50. Alexander SA: Levels of root resorption associated with continuous arch and sectional arch mechanics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 110 (1996), 321-324
51. Blake M, Woodside DG, Phroah MJ: A radiographic comparison of apical root resorption after orthodontic treatment with the edgewise and speed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 108 (1995), 76-84
52. Dermaut LR, De Munck A: Apical root resorption of upper incisors caused by intrusive movement : a radiographic study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 90 (1986), 321-326
53. McFadden WM, Eugenstrom C, Eugenstrom H, Anholm JM: A study of the relationship between incisor intrusion and root shortening. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 96 (1989), 390-396
54. Harris EF, Kineret SE, Tolley EA: A heritable component for external apical root resorption in patients treated orthodontically. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 111 (1997), 301-309
55. Hotz R: Wurzelresorptionen an bleibenden Zähnen. [Root resorption in permanent teeth]. *Fortschr Kieferorthop* 28 (1967), 217-224

56. Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D: Effects of increased force magnitudes on tooth movement and root resorption. (abstract) *Eur J Orthod* 17 (1995), 347
57. Kjar I: Morphological characteristics of dentitions developing excessive root resorption during orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 17 (1995), 25-34
58. Ketcham AH: A preliminary report of an investigation of apical root resorption of permanent teeth. *Internat. Orthodont* 13 (1927), 97-127
59. Hotz RP: Die Extraktion bleibender Zähne im Rahmen kieferorthopädischer Behandlung. [Extraction of permanent teeth in the framework of orthodontic treatment (indication and prognosis)] *Dtsch Zahnäztl Z* 29 (1974), 690-694
60. Angel EH: The latest and best in orthodontic mechanics. *Dental Cosmos* 70 (1928), 1143-1157
61. Gaudet EL: Tissue changes in the monkey following root torque with the Begg technique. *Am J Orthod* 58 (1970), 164-178
62. Andrews LF: The six keys to normal occlusion. *Am J Orthod* 62 (1972), 296-309
63. Lacey DL, Timms E, Tan HL, Kelley MJ, Dunstan CR, Burgess T, Elliott R, Colombero A, Elliott G, Scully S, Hsu H, Sullivan J, Hawkins N, Davy E, Capparelli C, Eli A, Qian YX, Kaufman, S, Sarosi, I, Shalhoub V, Senaldi, G, Guo J, Delaney J, Boyle WJ: Osteoprotegerin ligand is a cytokine that regulates osteoclast differentiation and activation. *Cell* 93 (1998), 165-176
64. Toms SR, Lemons JE, Bartolucci AA, Eberhardt AW: Nonlinear stress-strain behavior of periodontal ligament under orthodontic loading. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 122 (2002), 174-179
65. Rudzki-Janson I, et al. Kieferorthopädische Zahnbewegungen im Wechselgebiss. *Fortschr. Kieferorthop* 62 (2001), 177-190

66. Yasuda H, Shima N, Nakagawa N, Yamaguchi K, Kinosaki M, Mochizuki S, Tomoyasu A, Yano K, Goto M, Murakami A, Tsuda E, Morinaga T, Higashio, K., Udagawa N, Takahashi , Suda T: Osteoclast differentiation factor is a ligand for osteoprotegerin/osteoclastogenesis-inhibitory factor and is identical to TRANCE/RANKL. *Proc Natl Acad Sci USA* 95 (1998), 3597-3602
67. Frentzen M: Histological techniques to study laser effects in mineralised tissues. Jaques SL, ed. *Laser tissue Interaction IV*, vd.1882. Bellingham, WA :SPIE ;1993 :412-421
68. Redlich K, Hayer S, Maier A, Dunstan CR, Tohidast-Akrad M, Lang S, Türk B, Pietschmann P, Woloszczuk W, Kollias G, Steiner G, Smolen J, Schett G: Tumor necrosis factor α -mediated joint destruction is inhibited by targeting osteoclasts with osteoprotegerin. *Arthr Rheum* 46 (2002), 785-792
69. Reitan K: Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment. *Am J Orthod* 53 (1967), 721-745
70. Romeis: *Mikroskopische Technik*; Urban & Schwarzenberg, München; 17 Auflage, 1989
71. Hubert E. Schroeder; *Pathobiologie oraler Strukturen*; Krager, 1997
72. Maltha JC, Van Leenwen EJ, Kuijpers-Jagtman AM: Tissue reactions to light orthodontic forces. *Eur J Orthod* 17 (1995), 343-344
73. Stuteville OH: Injuries caused by orthodontic forces and the ultimate results of these injuries. *Am J Orthod Oral Surg* 24 (1938), 103-116
74. Bates S. Adsorption. *Br J Dent Sci* 1 (1856), 256
75. Miyoshi K, Igarashi K, Shinoda H, Mitani H: Tooth movement and changes in periodontal tissue in response to orthodontic force in rats very depending on the time of day the force is applied. *Eur J Orthod* 23 (2001), 329-338

76. Donath K: Die Trenn-Dünnschnitt-Technik zur Herstellung histologischer Präparate von nicht schneidbaren Geweben und Materialien. Nordenstedt: Exakt-Kulzer-Druckschrift, 1988
77. Owman-Moll P, Kuroi J, Lundgren D: Continuous versus interrupted orthodontic force related to early tooth movement and root resorption. *Angle Orthod* 65 (1995), 395-401
78. Linge BO, Linge L: Apical root resorption in upper anterior teeth. *Eur J Orthod* 5 (1983), 173-183
79. Ottolengui R: The physiological and pathological resorption of tooth roots. *Item of Interest* 36 (1914), 322-362
80. Kahl-Nieke : Einführung in die Kieferorthopädie; Urban & Fischer, München; 2 Auflage, 2001
81. Computerprogramm zur Vermessung digitaler Bilder. Programmspezifikation Picture–Measurement der Firma Emazing new media.
82. Phillips JR: Apical root resorption under orthodontic therapy. *Angle Orthod* 25 (1995), 1-22
83. Rygh P: Orthodontic root resorption studied by electron microscopy. *Angle Orthod* 47 (1977), 1-16
84. Sirivivasan R, Evans C, George A: Detection of dentin matrix protein and dentin phosphophoryn in gingival crevicular fluid. *J Dent Res* 77 (1998), 1026
85. Parker WS: Root resorption: long-term outcome. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 112 (1997), 119-123
86. Desai HM: Root resorption: another long-term outcome. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 116 (1999), 184-186

87. Reitan K, Kvam E: Comparative behaviour of human and animal tissue during experimental teeth movement. *Angle Orthod* 41 (1971), 1-14
88. Follin ME, Ericsson I, Thailander B: The occurrence and distribution of root resorption in orthodontically moved premolars in dogs. *Angle Orthod* 56 (1986), 164-175
89. Steigman S, Michaeli Y: Experimental intrusion of rat incisors with continuous loads of varying magnitude. *Am J Orthod* 80 (1981), 429-436
90. Melson B: Tissue reaction following application of extrusive and intrusive forces to teeth in adult monkeys. *Am J Orthod* 89 (1986), 469-475
91. Kong YY, Feige U, Sarosi I, Bolon B, Tafuri A, Morony S, Capparelli C, Li J, Elliott R, McCabe S, Wong T, Campagnolo G, Moran E, Bogoch ER, Van G, Nguyen LT, Ohashi PS, Lacey DL, Fish E, Boyle WJ, Penninger JM: Activated T cells regulate bone loss and joint destruction in adjuvant arthritis through osteoprotegerin ligand. *Nature* 402 (1999), 304-309
92. Storey E: The nature of tooth movement. *Am J Orthod* 63 (1973), 292-314
93. Vignery A, Baron R: Dynamic histomorphometry of alveolar bone remodelling in adult rat. *Anat Rec* 196 (1980), 191-200
94. Rygh P: Ultrastructural changes in tension zones of rat molar periodontium incident to orthodontic movement. *Am J Orthod* 70 (1976), 269-281
95. Burstone CJ, Pryputniewicz RJ: Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces. *Am J Orthod* 77 (1980), 396-409
96. Kaley J, Phillips C: Factors related to root resorption in edgewise practice. *Angle Orthod* 61 (1991), 125-132

97. Grageda E et al: Gene expression induced by orthodontic forces and root resorption. *J Dent Res* 78 (1990), 202 (abstract)
98. Ketcham AH: A progressreport of an investigation of apical root resorption of vital permanent teeth. *Int J Orthod* 15 (1929), 310-328
99. Steadman SR: Résumé of the literature on root resorption. *Angle Orthod* 12 (1942), 28-38
100. Shafer WG, Hine MK, Levi BM: A textbook of oral pathology. 4 th. Philadelphia: WB Saunders, 1983: 328-32
101. Belanger GK, Coke JM: Idiopathic external root resorption of the entire permanent dentition: report of a case. *ASDC J Dent Child* 52 (1985), 359-63
102. Al-Qawasmi RA, Hartsfield JK, Everett ET, et al: Genetic predisposition to external apical root resorption in orthodontic patients: linkage of chromosome-18 marker. *J Dent Res* 82 (2003), 356-360
103. Mavaragani M, Boe OE: Changes in root length during orthodontic treatment: advantages for immature teeth. *Eur J Orthod* 24 (2002), 91-97
104. Brezniak N, Wasserstein A: Orthodontically induced inflammatory root resorption. Part 1: The basic science aspects. *Angle Orthod* 72 (2002), 175-179
105. Fukushima H, Kajiya H, Takada K, Okamoto F, Okabe K: Expression and role of RANKL in periodontal ligament cells during physiological root-resorption in human deciduous teeth. *Eur J Oral Sci* 111 (2003), 346-352
106. Bosshardt DD, Masseredjian V, Nanci A: Root resorption and tissue repair in orthodontically treated human premolars. In: Davidovitch Z, Mah J, eds. *Biological mechanisms of tooth eruption, resorption and replacement by implants*. Boston, Mass: Havard Society for Advancement of Orthodontics; 1998:425-437

-
107. Brudvik P, Rygh P: Transition and determinants of orthodontic root resorption-repair sequence. *Eur J Orthod* 17 (1995), 177-188

 108. Sismanidou C, Hilliges M, Lindskog S: Healing of the root surface-associated periodontium : an immunohistochemical study of orthodontic root resorption in man. *Eur J Orthod* 18 (1996), 435-444

 109. Misch CE: Density of bone : Effect on treatment plans, surgical approach, healing, and progressive bone loading. *Int J Oral Implantol* 6 (1990), 23-31

 110. Hughes B, King GJ: Effect of orthodontic appliance reactivation during the period of peak expansion in the osteoclast population. *Anat Rec* 251 (1998), 80-86

 111. Roberts WE: Bone physiology, metabolism, and biomechanics in orthodontic practice. In: Graber TM, Vanarsdall RL, eds. *Orthodontics: Current Principles and Techniques*. St Louis, Mo: Mosby;2000:231-234.

 112. Brosius G, Brosius F: *SPSS-Base System und Professional International* Thomason Publishing, Bonn, Albany 1995.

 113. Kähler-WM, *SPSS für Windows*, Vieweg Verlag, Braunschweig 1994

9. Lebenslauf

Name: Evelyn Patricia Pascale Schmid
Geburtsdatum: 16.12.1978
Geburtsort: Mainz
Staatsangehörigkeit: deutsch
Eltern: Josette Schmid, geb. Habert
Dr. Karl-Heinz Schmid

Schul- und Hochschulausbildung:

1985-1989 katholische Grundschule Neanderstraße, Mettmann
1989-1998 Konrad-Heresbach-Gymnasium, Mettmann
1998-2003 Studium der Zahnmedizin an der Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf
2001 zahnärztliches Physikum
2003 Approbation
12/03-03/04 Auslandstudium an der Universität René Descartes, Paris

Tätigkeiten

2004-2005 Vorbereitungsassistentin in der zahnärztlichen Praxis
Dr. Dr. S. Lechner, Pfaffenhofen
2005 Weiterbildungsassistentin in der kieferorthopädischen
Praxis bei Dr. N. Rosarius, Roetgen

10. Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. D. Drescher
für die Überlassung des Themas,
die stets gewährte fachliche Unterstützung und seinen Rat sowie
meinen Eltern und meinem Freund für ihr Verständnis und ihre Unterstützung.

Abstract

Mikroskopische Analyse von Wurzelresorptionen nach initialer orthodontischer Therapie

Vorgelegt von Evelyn Patricia Pascale Schmid

Ziel dieser Arbeit war die experimentelle Untersuchung orthodontisch behandelter Zähne nach initialer Therapie. Hierfür wurden von 17 Patienten insgesamt 26 Zähne für vier Wochen mit superelastischen Nivellierungsbögen mit der Straight-wire-Technik nach Andrews behandelt. Die in dieser Studie untersuchten Patienten befanden sich alle am Anfang ihrer kieferorthopädischen Behandlung. Ihnen gemeinsam war ein erhöhter Platzmangel, der zwangsläufig die Extraktion der ersten Prämolaren zur Folge hatte. Alle Zähne befanden sich in einem parodontal gesunden Zustand und wiesen ein vollständig abgeschlossenes Wurzelwachstum auf.

Da in der kieferorthopädischen Behandlung Zahnhartsubstanzdefekte, ausgehend von zu hohen Kräften, stets eine unterschwellige Gefahr darstellen, galt es in dieser Studie mehrere Fragen zu klären:

Inwieweit führt die Behandlung mit superelastischen Nivellierungsbögen, deren Kraftabgabe sehr gering ist, zur Bildung von Wurzelresorptionen? Reicht die Dauer der initialen Behandlungsphase zur Bildung resorptiver Veränderungen aus?

Nach Extraktion der Zähne wurden diese mittels der Dünnschliff-Technik nach Donath histologisch aufbereitet und anschließend lichtmikroskopisch untersucht. Zur Quantifizierung der durch die Belastung hervorgerufenen resorptiven Oberflächenveränderungen erfolgte an Hand digitaler Aufnahmen eine visuelle Beurteilung der Topografien sowie eine computergestützte Berechnung ihrer Tiefen- und Längenausdehnungen. In dieser Studie wurden an allen untersuchten Zähnen atypische Wurzeloberflächenveränderungen festgestellt. Hierbei wiesen insbesondere der apikale und der zervikale Wurzelabschnitt eine erhöhte Resorptionsbereitschaft auf. Obwohl der mittlere Wurzelabschnitt die geringste Anzahl an Resorptionen aufwies, wurden in diesem Bereich mit einer durchschnittlichen Resorptionslänge von 563µm und einer durchschnittlichen Resorptionstiefe von 160µm die größten horizontalen und vertikalen Oberflächenveränderungen gemessen. Mithilfe des Mann-Whitney-U-Test wurden die gemessenen Werte auf ihre Signifikanz hin überprüft. Bei der Untersuchung der Verteilung der Wurzelresorptionen nach Wurzelabschnitt zeigte sich, dass der apikale Wurzelbereich mit 37% am häufigsten betroffen war. In diesem Abschnitt traten die Resorptionen meist zirkulär auf. Sie traten hier vermehrt auf der vestibulären, im mittleren Wurzelbereich vermehrt im distalen Anteil auf. Insgesamt traten die resorptiven Prozesse häufiger im vestibulären als im oralen und gleichhäufig im mesialen und distalen Anteil auf.

Da trotz Anwendung superelastischer Drähte, die sich durch eine besonders niedrige Kraftabgabe kennzeichnen, pathologische Veränderungen der Wurzeloberfläche bereits nach einer kurzen Behandlungsphase von vier Wochen festzustellen waren, müssen sich die zukünftigen Bemühungen mit der Entwicklung neuer Materialien und Behandlungsmethoden beschäftigen, um dem Ziel, der Prävention von Wurzelresorptionen, näher zu kommen.

Referent: Prof. Dr. D. Drescher