

**Aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und
Kieferheilkunde**

Westdeutsche Kieferklinik

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Poliklinik für Kieferorthopädie

Direktor: Univ.-Prof. Dr. D. Drescher

**Prävalenz und Abschätzung der Progredienz apikaler
Wurzelresorptionen –
eine retrospektive Untersuchung an Panoramaschichtaufnahmen**

Dissertation

**zur Erlangung des Grades eines Doktors der
Zahnmedizin**

**Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf**

vorgelegt von

Silke Maria Dreiner

2004

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

gez.:

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Wolfgang H.-M. Raab

Referent: Prof. Dr. Drescher

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Herforth

Widmung:

meinen lieben Eltern

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1. Einleitung	5
2. Literaturübersicht.....	6
2.1 Historischer Überblick	6
2.2 Einteilung der Wurzelresorptionen	11
2.3 Häufigkeit und Ausmaß apikaler Wurzelresorptionen	13
2.4 Pathogenese	16
2.5 Ätiologie	20
2.6 Reparaturmechanismen	25
2.7 Vorhersage von Wurzelresorptionen	26
2.8 Diagnostik	27
2.9 Konsequenzen und Prävention von Wurzelresorptionen	29
3. Zielstellung	31
4. Material und Methoden	32
4.1 Allgemeine Kriterien	32
4.2 Auswahl und Erstellung der Orthopantomogramme	32
4.3 Vorgehensweise zur Datenerhebung	33
4.4 Berechnungen	35
4.5 Auswertungen pro Zahn	36
4.6 Statistik	41
4.7 Kontrolluntersuchung und Fehlerabschätzung	46
5. Ergebnisse	48
5.1 Prüfung auf Normalverteilung	48
5.2 Geschlechtsunterschiede	48
5.3 Verteilung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle	48
5.4 Allgemeiner Wurzelresorptionsvergleich	50
5.5 Wurzelformvergleich	50
5.6 Analyse der einzelnen Zähne	51
5.7 Vergleich der Wurzelresorptionen verschiedener Zahn- gruppierungen	54
5.8 Bogenwechsel	55
5.9 Behandlungsdauer	56
5.10 Vergleich verschiedener Patientengruppen	59
5.11 Kontrolluntersuchung und Ergebnisse	60

	Seite
6. Diskussion	61
6.1 Prüfung auf Normalverteilung	61
6.2 Geschlechtsunterschiede	61
6.3 Verteilung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle	62
6.4 Allgemeiner Wurzelresorptionsvergleich	63
6.5 Wurzelformvergleich	66
6.6 Analyse der einzelnen Zähne	68
6.7 Vergleich der Wurzelresorptionen verschiedener Zahn- gruppierungen	76
6.8 Bogenwechsel	78
6.9 Behandlungsdauer	79
6.10 Vergleich verschiedener Patientengruppen	83
6.11 Kontrolluntersuchung, Fehleranalyse, Validität	87
6.12 Schlussfolgerungen und praktische Konsequenzen	89
7. Zusammenfassung	93
8. Literaturverzeichnis	95
9. Lebenslauf	105
10. Danksagung	107

1. Einleitung

Neben Problemen wie Karies und marginalem Attachmentverlust durch Einschränkung der Hygienefähigkeit, treten als Nebenwirkung kieferorthopädischer Behandlung bei vielen Patienten Wurzelresorptionen auf.

Wie viele Zähne hiervon betroffen oder wie stark sie resorbiert werden, ist individuell sehr variabel und kann durch vielfältige Faktoren verursacht sein.

Hierzu wurden diverse Risikofaktoren auf verschiedene Arten untersucht. Diese bezogen sich auf unterschiedliche Zahnmorphologien, Typ der Apparatur, Patienteneigenschaften, Krafteinwirkung, Bewegungsausmaß und systemische Einflüsse.

In der Behandlungsphase eines Patienten kann es mitunter sehr wichtig sein, zu erfahren, ob dieser dem Risiko schwerer Wurzelresorptionen unterliegt. Idealerweise soll man diese Gefahr schon vor der Behandlung herausfinden. Bedingt durch die komplexe Beziehung zwischen Wurzelresorptionen und Behandlungsvariablen, gestaltet sich dies oftmals als äußerst schwierig [64].

Bisher ist nicht bekannt, warum einzelne Zähne schwere Resorptionen erfahren. Demgegenüber erklärt jedoch eine Anzahl von Faktoren, warum Resorptionen überhaupt stattfinden [63].

Zumindest soll aber nach einer kurzen Behandlungszeit in Erfahrung gebracht werden können, ob schon Wurzelresorptionen aufgetaucht sind. Zusätzlich ist eine Abschätzung der Progredienz notwendig, um die nachfolgende Therapie entsprechend individuell festzulegen.

Meist sind die auftretenden Wurzelresorptionen harmloser Art und führen nicht zu Komplikationen. Jedoch kommt es vor, dass Patienten schwerwiegende Ausprägungen der Resorptionen vorweisen, so dass Behandlungspläne verändert und überdacht werden müssen zur Vermeidung negativer Folgen, wie erhöhter Zahnmobilität oder, im ungünstigsten Fall, Verlusten. Erschwerend kann bei diesen Fällen ein Alveolarknochenverlust hinzukommen, der die Zahnverankerung minimiert. In solchen Situationen ist es vorteilhaft, in der Lage zu sein, das Fortschreiten der Wurzelresorptionen vorher abzuschätzen [111].

2. Literaturübersicht

2.1 Historischer Überblick

Stärkere Wurzelresorptionen nach Beendigung der kieferorthopädischen Therapie mindern das ansonsten zufriedenstellende Behandlungsergebnis. Der Verlust von apikalem Wurzelmaterial ist bisher unvorhersehbar und, bei Penetration des Dentins, auch irreparabel [14].

Jedoch gibt es bisher keine Fälle in der Literatur, dass iatrogene Wurzelresorptionen durch orthodontische Therapie Zahnverluste hervorrufen [53].

Eine Langzeitfallstudie von PARKER untermauerte dies. Obwohl Inzisivi eines Patienten zum Teil sehr starken Resorptionsprozessen unterlagen - besonders die mittleren Schneidezähne im Oberkiefer - erfuhr nach 33 Jahren der dann 47jährige Patient keine Funktionseinbußen [85].

Gestützt auf die Aussagen von BREZNIAK und WASSERSTEIN [12, 13, 14, 15] auf der einen und KILLIANY [53] auf der anderen Seite, lassen sich zur historischen Entwicklung nachstehende Angaben machen:

Diverse histologische Studien berichteten von einer hohen Inzidenz der Wurzelresorptionen, während in klinischen Untersuchungen ein variableres Auftreten erkannt wurde.

Die ätiologischen Faktoren und die Vorhersagbarkeit schwerer Resorptionen stellten in den meisten Studien den Untersuchungskern dar, jedoch blieb der Ursprung weiterhin ungeklärt.

Auch können idiopathische Wurzelresorptionen ohne vorherige orthodontische Behandlung auftreten.

Zum Teil lieferten Studien auch entgegengesetzte Ergebnisse, betreffend die Verbindung zwischen Wurzelform und Wurzelresorptionen, so wie die Rolle der eingesetzten Kräfte.

Den ersten Diskussionsansatz zu Wurzelresorptionen an bleibenden Zähnen erbrachte BATES im Jahre 1856.

Den direkten Zusammenhang der Wurzelresorptionen zu orthodontischer Behandlung knüpfte OTTELENGUI im Jahre 1914 und erwähnte, dass SCHWARZKOPF schon 1887 resorbierte Wurzeln bleibender Zähne demonstriert hatte.

Große Zuwendung fanden Wurzelresorptionen 1927, als KETCHAM Unterschiede der Wurzelgestaltung vor und nach kieferorthopädischer Behandlung mit radiologischem Beweis zeigte.

Daraufhin folgte eine breitgefächerte histologische, klinische und physiologische Erforschung der Wurzelresorptionen in Zusammenhang mit orthodontischer Therapie.

Nachdem zuvor „Resorption“ und „Absorption“ gleichwertig verwendet wurden, legten BECKS und MARSHALL im Jahre 1935 nach einem Literaturreckblick fest, dass apikale Wurzelverluste mit „Resorption“ bezeichnet werden sollten.

Dies sollte laut den beiden Autoren in medizinischer und zahnmedizinischer Literatur üblicherweise gebraucht werden, sobald geformtes Gewebe zerstört und vom Blut- oder Lymphsystem aufgenommen wird.

In den letzten zehn Jahren wurde die orthodontisch induzierte Wurzelresorption als iatrogener Effekt kieferorthopädischer Behandlung zunehmend anerkannt. So ist bis heute recht genau bekannt, wie und wann Wurzelresorptionen auftreten. Es fehlen jedoch Mittel zur Vorhersage, welches Stadium sie gegen Ende der Behandlung erreicht haben werden.

LEVANDER und MALMGREN zeigten mit ihrer Studie 1988 anhand von intraoralen Röntgenaufnahmen nach sechs bis neun Monaten Behandlungsdauer einen möglichen Weg zur weiteren Abschätzung der Resorptionsentwicklung [63] (siehe auch 2.7).

1989 erläuterten GÖZ und RAKOSI anhand von Fernröntgenseitenbild- und Orthopantomogramm-Analysen ein Auftreten von Wurzelresorptionen ab 2 mm bei 1,5% der untersuchten Patienten. Besonders bei „Jiggling“, aber auch durch lange Behandlungsdauer und Extrusion kamen vermehrt Resorptionen vor. Andere Studien bestätigten ihr Ergebnis, da sie ebenfalls bewiesen, dass behandlungsbedingte Resorptionen meist unter dem Grenzwert von 2 mm liegen [38].

Nur zwei Jahre später bezeugten KALEY und PHILLIPS anhand von Orthopantomogrammen, die vor und nach der Behandlung angefertigt wurden, ein Resorptionsvorkommen von mehr als einem Viertel der Wurzellänge bei lediglich 3% der untersuchten Patienten. Insgesamt beobachteten sie bei 90% der Fälle Resorptionsvorgänge. Als neuen Effekt stellten die Autoren die Reduktion der Wurzelresorptionen bei Beendigung der Zahnbewegung vor Abschluss des Wurzelwachstums fest [51].

Diese Aussage konnte eine neuere Studie aus dem Jahre 2001 bestätigen. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass das Alter zu Therapiebeginn signifikant mit der Wurzellänge nach der Behandlung zusammenhängt. So kann eine wesentlich bessere Prognose, bezogen auf die Wurzellänge, für jüngere Zähne gestellt werden als für ausgereifte [72].

Anfang des Jahres 2004 bewies eine weitere Arbeit, dass orthodontische Zahnbewegung während der Wurzelbildung keine Wurzelresorptionen verursacht und sich noch nicht voll ausgebildete Wurzeln danach normal entwickeln [28].

Auch die Analyse von XU und BAUMRIND stellte heraus, dass sich die Wahrscheinlichkeit eines positiven Zusammenhangs zwischen dem Bewegungsausmaß und Resorptionen der Schneidezahnwurzel bei Heranwachsenden als sehr gering darstellt [114].

Anno 1989 verfolgten REMINGTON et al. den Gedanken, ob die Resorptionsvorgänge mit dem Ende der Behandlung stoppen. Ihre Langzeitauswertung bekräftigte diese Theorie, denn nach Entfernung der kieferorthopädischen Apparatur zeigten sich, außer Remodellationen von rauen und scharfen Kanten, keine auffälligen Veränderungen [89].

Dies konnte auch RUPP in seinem Literaturreisblick bestätigen [94].

Ein zusätzliches Fazit ihrer Studie lag darin, dass die Oberkieferinzisivi besonders stark resorbiert wurden [89].

Im folgenden Jahr erarbeiteten SAHM, HAFFNER und KLINGER, dass kein Zusammenhang zwischen der bei orthodontischer Zahnbewegung auftretenden, sich radiologisch darstellenden Knochenreaktion und der Wurzelresorption besteht. Dieser Aspekt der Knochenreaktion fand bis dahin kaum Beachtung [95].

Mit Fortschreiten der konservierenden Techniken interessierte auch das Verhalten von endodontisch behandelten Zähnen bei kieferorthopädischer Bewegung. SPURRIER, HALL et al. stellten dazu fest, dass endodontisch behandelte Inzisivi klinisch kaum weniger Resorptionen aufwiesen als vitale Vergleichszähne. Deshalb könnten vitale und wurzelgefüllte Zähne mit der gleichen Zuversicht behandelt werden [105].

Dieses Ergebnis konnten MIRABELLA und ARTUN 1995 bestätigen. In ihrer Analyse berichteten sie zusätzlich, dass bei erwachsenen Patienten zwar nicht mehr Wurzelresorptionen auftraten, jedoch extremere Resorptionsmuster [75].

Zusätzlich stellte sich bei weiblichen Patienten (nur bei vitalen Zähnen) ein Überhang von Resorptionen gegenüber männlichen Patienten heraus [105]. Dies fand Bestätigung bei einer Arbeit von KJAER, der auch weitere Faktoren, wie Wurzelmorphologie und Dentitionsanomalien, berücksichtigte [56].

1990 fiel auch der Vergleich von orthodontisch bewegten, parodontal geschädigten mit gesunden Zähnen durch WEHRBEIN, HARHOFF und DIEDRICH ins Gewicht. In ihrer Untersuchung konnten sie mittels Rasterelektronenmikroskop an 24 Zähnen nachweisen, dass kieferorthopädisch bewegte Zähne die meisten Resorptionen erfuhren. Klinisch gesunde Zähne zeigten signifikant weniger Resorptionen als parodontal geschädigte Zähne. Dies erschwerte die kieferorthopädische Behandlung bei parodontalen Vorschädigungen [112].

Im Jahre 1992 hatte eine Analyse das Ziel, die Resorptionsmuster bei frontal offenem Biss zu studieren. Bereits vor der Behandlung lagen bei offenem Biss mehr Resorptionen als bei Tiefbisspatienten vor. Nach aktiver Behandlung zeigte sich ein signifikantes Überwiegen der Wurzelresorptionen bei den Patienten mit offenem Biss. Zusätzlich waren bei den offenen Bissen mehr kurze Wurzeln und weniger bukkaler Knochen zu finden, weil bei der Entstehung und Korrektur der Fehlstellung stärkere Kräfte ausgeübt wurden [41].

Eine Studie von 1994 bezeugte eine Herabsetzung des Vorkommens von kraftinduzierten Wurzelresorptionen an Oberkieferschneidezähnen von Ratten durch Zuführung von Schilddrüsenhormonen. Beachtung finden sollte die Thyroxinverabreichung bei Patienten mit beginnender Wurzelresorption oder erniedrigter Schilddrüsenfunktion [87].

POVOLNY kritisierte ihre Aussage, der Knochenremodellierungsprozess sei effizienter bei Thyroxingabe, stimmte aber der auftretenden Reduktion der Oberflächenresorptionen zu. Dennoch bedürfe dieses Thema noch eingehender Forschung [88].

Weitergeführt wurde dieser Ansatz zur Reduktion der Wurzelresorptionen durch LOBERG und ENGSTRÖM mit dem Beweis, dass eine Thyroxingabe bei aktiver Zahnbewegung in drei Fällen Wurzelresorptionen reduzierte. Als einzige Nebenwirkung brachte dies eine erhöhte Knochenresorption mit sich [67].

In seinem Kommentar wies CHRISTIANSEN die Autoren unter expliziter Anerkennung der potentiellen Möglichkeiten ihrer Idee darauf hin, dass die Reduktion der Wurzelresorptionen nur einen indirekten Effekt des verstärkten Alveolar-knochenabbaus darstellt [24].

Bald darauf erschien eine Studie, die hervorhob, dass deutlich (58%) mehr Wurzelresorptionen nach orthodontischer Behandlung festzustellen waren, aber auch der alveoläre Knochenverlust 18% mehr betrug [70].

Im Jahre 2002 präsentierte ein Tierversuch erneut das Resultat, dass geringe Dosen des Schilddrüsenhormons eine protektive Wirkung bei orthodontisch erzeugten oder spontanen Wurzelresorptionen besitzen [109].

VERNA, DALSTRA und MELSEN unterstützten im Jahre 2003 die skeptischen Ansätze von CHRISTIANSEN. In ihrem Tierversuch ergab sich einerseits eine erhöhte Bewegung der Zähne bei Erhöhung der biologischen Knochenerneuerung durch Thyroidhormonbehandlung von Ratten, andererseits zeigten sich jedoch bei Patienten mit erniedrigter Knochenerneuerungsrate selbst ohne orthodontische Behandlung mehr Wurzelresorptionen. Dies ist als Risikofaktor, den eine Thyroidhormonverabreichung verringern kann, zu werten [110].

Aus der Studie von LEVANDER, MALMGREN und ELIASSON resultierte, dass eine Therapieunterbrechung von zwei bis drei Monaten nach sechs Monaten Behandlungszeit signifikant weniger Wurzelresorptionen verursacht als ohne Behandlungspause [64].

Dagegen brachte eine Unterbrechung von einer Woche nach drei Behandlungswochen keinen signifikanten Unterschied der Wurzelresorption gegenüber ununterbrochener Therapie [80].

KING kommentierte diese Studie und riet, den geringen Umfang der Arbeit zu beachten, sowie die zu geringe Sensitivität der Messungsmethode.

Aus diesen Gründen und weil keine behandlungsfreie Kontrollgruppe vorlag, bezweifelte er auch die Aussage, höhere Kräfte bewirkten nicht signifikant mehr Resorptionen [54].

Andere Studien befassten sich mit dem Vergleich verschiedener Techniken. So fanden BECK und HARRIS keine Unterschiede zwischen Begg- und Tweed-Technik [6].

Vielfach wurden in der letzten Zeit die unterschiedlichsten Apparaturen und Behandlungsmethoden gegenübergestellt [1, 6, 10, 16, 49, 64, 91].

Diverse Arbeiten versuchten die genauen Mechanismen der Wurzelresorptionen und deren Reparatur aufzudecken [17, 18, 23, 39, 41, 46, 58, 82, 103].

Physiologische Mechanismen wurden durch Untersuchungen an Milchzähnen beschrieben [34, 36, 68, 99]. Zell-Zell-Interaktionen, entsprechende Enzyme und die Differenzierung und Funktionen von Odontoklasten standen dabei im Vordergrund.

Auch die genetische Komponente fand in neueren Untersuchungen mehr und mehr Beachtung [2, 3, 40, 42, 43].

Studien belegten mehr Resorptionsvorkommnisse bei Asthmatikern als bei Gesunden [73], schlossen dentale Anomalien als Risikofaktor aus [61] und erbrachten den Beweis, dass keine physiologischen Wurzellängenänderungen im frühen bis mittlerem Erwachsenenalter auftreten [9].

In jüngster Zeit spezialisierten sich Studien darauf, die Mechanismen der Wurzelresorption auf zellulärer und subzellulärer Ebene zu verstehen [78].

Durch die Weiterentwicklung und Prüfung unterschiedlichster Methoden, zum Beispiel der Immunhistochemie und biochemischer Untersuchungen, konnten die Effekte von Mediatoren, Proteinen und Enzymen, wie beispielsweise Prostaglandin E₂, Misoprostol, Kalziumglukonat, Interleukin-1, Tumornekrosefaktor- α und eines speziellen Integrins beleuchtet werden [71, 101, 102, 108, 115].

Moderne Röntgenverfahren, beispielsweise die Subtraktionsradiographie, eröffneten Studien neue Möglichkeiten, auch kleine Beträge apikaler Wurzelresorptionen quantitativ zu erfassen [47]. Die Werte dieser Verfahren waren bei Optimierung der Strahlendosis akzeptierbar [11].

Die digitalen Röntgenbilder lieferten mit Standardfilmen vergleichbare diagnostische Informationen [62]. Auch konnten digitale Rekonstruktionen von Zahnfilmen für Diagnose, Prävalenz und relative Wurzelresorptionsgrade Verwendung finden [90].

Viele Studien befassten sich mit dem Zusammenhang der Kraftdosierung [55, 59, 69, 79, 80, 81, 83, 113] und der Therapiedauer [5, 25, 38, 50, 52, 59, 65, 66, 79, 98, 107] bezüglich der Ausmaße der Resorptionen.

Eine Veröffentlichung im Jahre 1998 wies auf die geringe Weiterentwicklung von Lösungsansätzen zur Problematik der Wurzelresorption im letzten Jahrhundert hin. Obwohl vergleichsweise nur wenige Patienten extreme Resorptionsgrade erreichten, sollte Wert darauf gelegt werden, Risikopatienten identifizieren zu können, sowohl auf Grund des Behandlungsergebnisses, als auch unter forensischem Aspekt. Zwar befassten sich Studien damit, Auswirkungen verschiedener Behandlungsvariablen zu verstehen und Mittel zu finden, um apikale Wurzelresorptionen zu reduzieren, jedoch besteht weiterhin Forschungsbedarf im Hinblick auf klinisch nützliche Kontrollmechanismen [111].

Mit Hilfe histologischer Überprüfung kamen FALTIN, ARANA-CHAVEZ, SANDER et al. zu dem Schluss: Resorptionsfelder treten vermehrt im apikalen Bereich auf, sowohl bei kieferorthopädisch bewegten Zähnen, als auch bei der Kontrollgruppe [32].

Aktuellere Studien belegten, dass bei kieferorthopädischer Behandlung in histologischen Graden bei jedem Patienten geringe Wurzelresorptionen auftraten [80], wenngleich diese gewöhnlich durch Reparaturen ausgeglichen wurden [92].

Ein neues Paradigma zur Gewebereaktion bei orthodontischer Zahnbewegung stellte MELSEN auf, indem sie die direkte Resorption als eine Minderung der normalen Belastung des parodontalen Ligamentes und als Beginn der Remodellation des Knochens beschrieb [74].

Indirekte Remodellation konnte danach als eine sterile Entzündung aufgefasst werden, die versucht, ischämischen Knochen unter hyalinisiertem Gewebe zu entfernen [74].

FRITZ, DIEDRICH und WIECHMANN befassten sich Ende des Jahres 2003 mit der Analyse, ob und in welchem Ausmaß Wurzelresorptionen bei Patienten auftreten, die mit der Lingualtechnik behandelt werden [35]. Dies stellte zwar einen moderneren Untersuchungsansatz dar, jedoch zogen die Autoren keine Vergleiche zum Vorkommen von Resorptionen bei labial behandelten Patienten.

Zur reproduzierbaren und akkuraten Erfassung des Volumens von Wurzelresorptionskratern entwickelten CHAN, DARENDELILER, PETOCZ und JONES 2004 eine neue Methode mittels Rasterelektronenmikroskop und einer Bildanalysesoftware [22].

Somit erlangten die Untersucher im Laufe der Zeit umfangreichere und tiefere Einblicke in die zu Wurzelresorptionen führenden Mechanismen und Ursachen. Es bleibt jedoch bis heute schwierig und weitgehend ungeklärt, wie valide Vorhersagen bezüglich des Auftretens, der Dimension und des Fortschreitens der externen apikalen Resorptionen zu treffen sind.

2.2 Einteilung der Wurzelresorptionen

Nach dem Glossar der American Association of Endodontists definieren sich die Wurzelresorptionen als ein von physiologischen oder pathologischen Prozessen bedingter Zustand, den Zement- oder Dentinverlust der Zahnwurzel kennzeichnet [37].

Eine Einteilung nach der Lokalität der Resorptionen bietet die Aufgliederung in laterale, röntgenologisch kaum sichtbare und zumeist mit guter Reparationstendenz auftretende und apikale Wurzelresorptionen, die im Röntgenbild zur Darstellung kommen, jedoch irreparabel sind [38].

Röntgenologisch stellen sich die apikalen Wurzelresorptionen meist erst dann dar, wenn seitliche Resorptionen bereits länger andauern [38].

In der Aufgliederung nach BARCLAY ereigneten sich im adulten permanenten Gebiss nur pathologische Wurzelresorptionen [4].

Es kommen sowohl von der Pulpa ausgehende interne Wurzelresorptionen vor, als auch externe, deren Ursprung sich im Parodont findet [60].

BENENATI klassifizierte die Wurzelresorptionen sehr ähnlich, basierend auf der Einteilung nach FRANK et al. und ANDREASEN, jedoch unter Einbeziehung apathologischer Resorptionsvorgänge [7]. Nachfolgend wird die Aufteilung nach BENENATI beschrieben:

Den **externen Resorptionen** lassen sich die nicht pathologischen, vorübergehenden **Druck-** und **Oberflächenresorptionen** zuordnen.

Druckresorptionen treten meist auf Grund von orthodontischen Zahnbewegungen, aber auch durch Zahndurchbruch, Knochenläsionen, impaktierte Zähne oder okklusale Traumata auf. Röntgenologisch ist bei den durch orthodontische Zahnbewegung hervorgerufenen apikalen Resorptionen ein Parodontalspalt normaler Breite und ein abgestumpfter Apex zu erkennen [7].

Eine pathologische Form der externen Wurzelresorption bildet die **Ersatzresorption** (Ankylose). Hierbei werden zerstörte Areale im Zement und im Dentin rasch durch Knochen ersetzt. Im Röntgenbild lassen sich solche Fälle durch ein Fehlen des Parodontalspaltes erkennen.

Den wahrscheinlich bekanntesten externen Typ repräsentiert die **entzündliche Wurzelresorption**, hervorgerufen durch endodontische oder parodontale Infektionen, wodurch die Pulpa nekrotisiert.

Die zervikale Resorption, die auch extrakanalikuläre invasive Resorption genannt wird, stellt eine besondere, weniger bekannte Form dar, die an der Wurzelhaut beginnt. Ursächlich können Trauma, parodontale Entzündung oder kieferorthopädische Behandlung sein. Eine Kombination von Osteoid und locker organisiertem vaskularisiertem Gewebe tritt an die Stelle des resorbierten Materials. Dieser Prozess zeigt sich meist einwärts und seitlich ausgerichtet, so dass er den Wurzelkanal umrundet, jedoch intakt lässt [7].

EMERY berichtete in einem Fall externer zervikaler Resorption über die Schwierigkeit, diese Form der Resorption zu diagnostizieren [31].

Iatrogene externe Resorptionen können zum Beispiel durch internes Bleichen hervorgerufen werden [7].

Weniger verbreitet ist die **interne Resorption**. Sie bleibt typischerweise asymptomatisch und kann daher, falls sie unentdeckt bleibt, rasch destruktiv wirken. Es handelt sich um eine entzündliche Resorptionsart mit drei Subtypen. Bei einem der Subtypen ist bei fortschreitender Resorption die Wurzeloberfläche noch nicht durchbrochen. Des Weiteren kann eine subossale Perforation, meist verbunden mit einem angrenzenden Knochendefekt, vorliegen, die dann auch Schmerzen bereiten wird [60]. Schließlich können interne Resorptionen mit supraossaler oder koronaler Beteiligung zu einer Rosafärbung des Zahnes führen [7].

LAMBRECHTS und VANHOOREBEECK teilten die internen Wurzelresorptionen in eine infektiöse Resorption mit Granulationsgewebe und eine Ersatzresorption, bei der durch Metaplasie einiger pulpaler Zellen Knochen in die Resorptionslakunen hineinproduziert wird [60].

Als externe Resorptionsarten nannten sie die Druckresorption durch impaktierte Zähne, Zysten und Tumoren oder orthodontische Behandlung [60].

Ergänzt wird diese Aussage durch einen Fallbericht von OLIVER und DUMMER. Der Versuch der Extrusion eines teildurchgebrochenen zweiten Prämolaren des Oberkiefers scheiterte. Deshalb wurde in ultima ratio extrahiert. Frühzeitig wurden schon bei der röntgenologischen, aber später auch bei der histologischen Untersuchung Wurzelresorptionen erkannt [77].

Unter die durch Trauma provozierten Wurzelresorptionen fallen die Oberflächenresorption, die Ersatzresorption und die infektiöse Resorption. Eine infektiöse apikale Resorption muss jedoch nicht zwangsläufig durch ein Trauma hervorgerufen werden. Eine chronische Parodontitis oder ein Granulom am Apex können auch verantwortlich dafür sein. Zusätzlich schafften die Autoren noch den Typ der infektiösen externen zervikalen Resorption, die sowohl an vitalen, als auch an devitalen Zähnen stattfinden kann. Verursacht wird sie durch den Druck eines Nachbarzahnes oder über eine Infektion des Parodontium [60].

Die idiopathische Wurzelresorption klassifiziert die Fälle, zu denen sich keine direkten Ursachen finden lassen. Meist handelt es sich um Einzelfälle. Manchmal wird jedoch auch von multiplen Formen berichtet.

Eine solche generalisierte idiopathische externe Wurzelresorption stellten COUNTS und WIDLAK in einer Fallstudie fest. Selbst durch historische, klinische, radiologische, histologische und Laboruntersuchungen ergaben sich keine Hinweise auf die Ursache der Resorptionen, so dass ihnen nur die Extraktion und Beobachtung als Behandlungsoptionen blieben [26].

Auch SNELGROVE erläuterte einen Fall generalisierter idiopathischer apikaler Wurzelresorptionen bei einem Jugendlichen. Hier musste zunächst auf eine kieferorthopädische Behandlung verzichtet werden [104].

Es existieren Vermutungen, systemische Erkrankungen oder endokrine Anomalien könnten verantwortlich für diese Form der Wurzelresorption sein [60].

Apikale Wurzelresorptionen lassen sich durch absolute Werte, oder durch Stadien einteilen. Ähnliche Ideen hierzu entwickelten diverse Autoren. Am weitesten verbreitet ist ein Schema nach LEVANDER und MALMGREN [63]:

- Grad 0: unbeschädigte Wurzel
- Grad 1: leichte Resorptionen am Apex
- Grad 2: deutliche Resorptionen, jedoch weniger als 2 mm
- Grad 3: Substanzverlust von 2 mm bis zu einem Drittel der Wurzellänge
- Grad 4: Wurzellänge um mehr als ein Drittel der Ursprungsform verkürzt

Diese Graduierung stellt ein vielfach verwendetes Mittel zur Analyse apikaler Wurzelresorptionen dar [6, 40, 41, 65] (siehe auch 2.8.3).

2.3 Häufigkeit und Ausmaß apikaler Wurzelresorptionen

Bei durchschnittlich 65,5% der mit festsitzender Apparatur behandelten Patienten traten apikale Wurzelresorptionen in einer Studie von REUKERS, SANDERINK, KUIJPERS-JAGTMAN und VAN'T HOF auf. Sie maßen eine relative Wurzelverkürzung von 15,2% bei oberen Schneidezähnen; entsprechend 1,9 mm im Durchschnitt [91].

LEVANDER und MALMGREN fanden große individuelle Schwankungen. In ihrem Patientengut waren 66% mit Wurzelresorptionen am Behandlungsende vertreten, während sich der gleiche Prozentsatz nach sechs bis neun Monaten Therapiedauer noch als resorptionsfrei erwies [63].

In etwa 88,3% der Fälle traten apikale Wurzelresorptionen bis zu 2 mm ein, während sie bei 11,3% zwischen 2 mm und einem Drittel der Wurzellänge lagen. Im Rückgriff bestätigte eine größer angelegte radiologische Studie von 1954 bei 86,4% der Zähne Wurzelresorptionen von mehr als 1 mm [100].

LUPI, HANDELMAN und SADOWSKY stellten ein Resorptionsvorkommen von 15% vor Therapiebeginn und eine Steigerung auf 73% nach der Behandlung anhand von Zahnfilmen fest [70].

Die Analyse von BAUMRIND, KORN und BOYD folgte einen Wert von 1,36 mm als durchschnittliche Resorptionsgröße [5].

Durch die Begutachtung von Panoramaschichtaufnahmen, legten KALEY und PHILLIPS dar, dass 40% ihrer Patienten an zumindest einem Oberkieferschneidezahn mäßige Resorptionen zeigten, während sich an den mittleren Inzisivi der Mandibula nur 20% ergaben. In 3% der Fälle erfuhren die mittleren Schneidezähne der Maxilla starke Resorptionen [51].

Deutlich weniger Resorptionen erlitten die Prämolaren beider Kiefer mit 6%. Insgesamt konnten an etwa 90% der Schneidezähne deutliche Spuren von Wurzelresorptionen entdeckt werden [51].

KJAER unterstrich mit seiner Arbeit die stärkeren Resorptionen an Oberkiefer- und mittleren Unterkieferschneidezähnen, aber auch an den zweiten Prämolaren des Unterkiefers [56].

REMYNGTON et al. erwähnten ebenso die häufiger und schwerer betroffenen Oberkieferschneidezähne und zwei Beispiele einer Hypermobilität [89].

Eine Arbeit von BLAKE et al. hielt Prozentwerte für die Wurzelresorptionen der Ober- und Unterkieferschneidezähne fest. Die seitlichen Inzisivi der Maxilla verkürzten sich um durchschnittlich etwa 12,5%, die mittleren dagegen nur um 8,4%. Im Unterkiefer wurden die lateralen Inzisivi um 6,2% und die zentralen um etwa 5,9% resorbiert [10].

Ähnliche Ergebnisse erbrachte eine Studie im Jahre 1998 mit durchschnittlichen Resorptionen von 7,85% bei etwa 60% der Patienten [91].

KOOK, PARK und SAMESHIMA ermittelten für normal geformte laterale Inzisivi Wurzelresorptionen von 0,88 mm bis 1,62 mm anhand von Zahnfilmen [57].

Auch die Lingualtherapie reihte sich in die Serie ähnlicher Ergebnisse ein. Im Jahre 2003 beschrieb eine Arbeit von FRITZ et al. die durchschnittliche Resorptionsrate mit 3,7% beruhend auf Analysen von Fernröntgenseitenbildern und Orthopantomogrammen, wobei abermals die Oberkieferinzisivi erhöhte Resorptionen bis zu 10% im Mittel aufwiesen. Wurden die verschiedenen Patienten außer Acht gelassen und nur die Zähne miteinander verrechnet, so blieben 82% resorptionsfrei [35].

BECK und HARRIS beobachteten die größte Häufigkeit von Resorptionen an mittleren Oberkieferschneidezähnen mit 62% und das geringste Auftreten an distalen Wurzeln der ersten Unterkiefermolaren mit 5% [6].

Eine weiteres Experiment untermauerte die stärkere Resorptionsneigung der Oberkieferschneidezähne, denn hier wiesen nach anfänglich kaum nennenswerter Resorption 80% der mittleren Inzisivi und 85% der seitlichen Inzisivi Wurzelresorptionen nach Behandlungsende auf. 5% der Schneidezähne befanden mäßige Resorptionen [40].

In einer allgemeineren Aussage hielten GÖZ und RAKOSI, JIANG et al. und HARRIS et al. Frontzähne für resorptionssensitiver als Seitenzähne [38, 40, 50].

Laut Aussage von BRIN, TULLOCH et al. kamen 11% der zentralen und 14% der seitlichen Schneidezähne durch mäßige bis schwere (> 2 mm) Resorptionen zu Schaden [16].

Das gleiche Ergebnis dokumentierten SAMESHIMA und SINCLAIR mittels Zahnfilmen und setzten eine Reihenfolge der meistresorbierten Zähne hinzu. Stärkste Resorptionen erfuhr der seitliche Oberkieferschneidezahn, gefolgt vom mittleren Inzisivus und vom Eckzahn, während sich derselbe im Unterkiefer zunächst am empfindlichsten zeigte, mit dem mittleren und dann dem seitlichen Schneidezahn im Anschluss [97, 98].

Dieser Auflistung nach Empfindlichkeit widersprach in Teilen eine Erörterung anhand von Zahnfilmen des Jahres 2000, bei der sich die mittleren Oberkieferschneidezähne als die meist betroffenen darstellten, gefolgt von den oberen seitlichen, danach von den unteren mittleren und zuletzt von den unteren lateralen Inzisivi. Hier fanden die Autoren geringe Resorptionen bei 42,6% der Zähne, moderat verliefen sie bei 53,4% der Zähne. Stärker resorbiert wurden 1,4% und extrem resorbiert zeigten sich 0,4%. Insgesamt ergab sich hier also eine Prävalenz von 97,8% [49].

HARRIS, KINERET und TOLLEY unterstrichen den oberen zentralen Inzisivus als meist resorbierten Zahn, fanden jedoch für den unteren mittleren Schneidezahn die geringsten Resorptionsgrade [42].

ALEXANDER wiederum bezeugte 1996 verstärkte apikale Wurzelresorptionen der Inzisivi, besonders im Oberkiefer. Dort betrafen sie am ehesten die seitlichen Schneidezähne [1].

In einer Studie an Patienten mit ein bis drei Aplasien von LEVANDER und MALMGREN ergab sich anhand von Zahnfilmen ein Resorptionswert von 2 mm oder mehr bei 5% [65].

Auch TAITHONGCHAI et al. sprachen von starken Wurzelresorptionen in 2% ihrer Fälle [107].

In seinem Literaturreview nannte KILLIANY ebenfalls den Wert von 5%, allerdings traten hier Resorptionen von mehr als 5 mm auf [53].

Bei der Bildung einer Reihenfolge nach den meisten und stärksten Resorptionsvorgängen der einzelnen Zähne muss beachtet werden, dass viele Untersuchungen nur Auswahlen von Zähnen analysieren und somit direkte Vergleiche schwierig werden.

Generell bleibt festzuhalten, dass die Inzisivi, besonders die (lateralen) der Maxilla, am anfälligsten für Resorptionen zu sein scheinen.

In vielen Untersuchungen wurde stets auf die starken individuellen Schwankungen hingewiesen, auch zum Beispiel bei KUROL, OWMAN-MOLL und LUNDGREN [59]. Dies unterstrich ebenfalls ein Literaturreückblick, in dem Patienten mit Resorptionshäufigkeitswerten von 0,5% bis 100% und resorbierte Zähne mit Werten von 3,5% bis 92,6% aufgelistet wurden [14].

Einigkeit besteht weitestgehend darüber, dass Wurzelresorptionen ein häufiges Phänomen bleiben, beziehungsweise in mikroskopischen Formen sogar immer, zum Teil auch physiologisch, auftreten, auch wenn ernsthafte Resorptionsgrade nur bei wenigen Fällen berichtet werden.

2.4 Pathogenese

Im Jahre 1936 bestand OPPENHEIM auf grundsätzlicher Schadensbegrenzung bei kieferorthopädischer Behandlung [58].

Damit sollten die Wurzelresorptionen und entsprechend deren Folgen möglichst verhindert werden. Somit muss zunächst in Erfahrung gebracht werden, welche Mechanismen ursächlich sind.

GÖZ und RAKOSI erläuterten: bei jeder Zahnbewegung kommt es durch entsprechende orthodontische Kraftausübung zur Kompression, beziehungsweise zur Entlastung der jeweiligen Seite des Zahnes mit dem Risiko von Wurzelresorptionen. Eine Knochendeformation tritt innerhalb von Sekunden auf, wobei auf einer Seite der Parodontalspalt unter Druck verengt wird, während sich die andere Seite durch Zug erweitert.

Dies bewirkt auf der Druckseite nach einigen Stunden eine Zirkulationsstörung, die das Gewebe in seiner Vitalität beeinträchtigt. Durch vaskulär vermittelte Prozesse beginnt dann nach Tagen und Wochen die Resorption dieses Gewebes. Dabei kann auch die Wurzel resorbiert werden, obwohl die Wurzeloberfläche auf Grund schlechterer Gefäßversorgung weniger resorptionsanfällig ist.

Auf der Zugseite finden Umbauvorgänge im Ligamentum parodontale statt, die auch die desmodontale Aufhängung des Zahnes vorübergehend schwächen, beziehungsweise es vollständig resorbieren. Im Tierexperiment zeigt sich nach zwei bis acht Wochen eine Reparatur des Fasersystems [38].

Dieselben Autoren fanden nach Kraftapplikation auf der parodontalen Zugseite eine Verbreiterung der Innenkortikalis durch mineralisiertes Osteoid, welches radiologisch als Verschattungszone sichtbar wurde. Diese stand jedoch nicht im Zusammenhang mit Wurzelresorptionen [95].

Weniger Resorptionen verursachen herausnehmbare Geräte, weil sie intermittierende Kräfte applizieren, die den physiologischen ähneln. Die entsprechend geringe parodontale Kompression hat nur irrelevante Zirkulationsstörungen zur Folge.

Ein größerer Effekt stellt sich bei permanenter Zahnbewegung ein, zum Beispiel bei Therapie mit Multiband. Dies ist jedoch mit einem umso höheren Risiko von Wurzelresorptionen behaftet, je länger kontinuierliche Kräfte wirken [38].

Seit 1951 wurden osteoklastenähnliche Zellen für Wurzelresorptionen verantwortlich gemacht. Im lichtmikroskopischen Tierexperiment konnten die Autoren belegen, dass die erste Phase des Resorptionsprozesses durch die Reaktionen der Parodontalzellen und deren Penetration in den unmineralisierten Präzement eingeleitet wurde [17].

Zunächst fanden sich keine Zellen in überkomprimierten Zonen, in denen die Wurzel mit nekrotischem parodontalem Ligament bedeckt war. Diese sterile Nekrose bei Überkompression des parodontalen Ligamentes in solchen Zonen wird als Hyalinisation bezeichnet. Einige Tage darauf setzten Wurzelresorptionen nahe den Zentren der Überkompressionsgebiete ein. In deren Umgebung drangen Zellen ein, die von dem ursprünglich gesunden parodontalen Ligament abstammten und transportierten das nekrotische Gewebe und die oberflächliche Schicht der Wurzel ab. Diese Zellen waren stationär oder immigrierten aus dem Blut. Dies bewiesen BRUDVIK und PER RYGH dadurch, dass zuerst dort Wurzelresorptionen eintraten, wo Blutgefäße intakt blieben und parodontale Zellen eindringen [17].

Zumindest ein Teil der Zellen nahe der Wurzeloberfläche bestand aus Makrophagen, die sich jedoch nicht unmittelbar auf ihr befanden [17].

KUROL und OWMAN-MOLL studierten 1998 die zeitliche Abhängigkeit der Hyalinisation des parodontalen Ligamentes im Zusammenhang mit Wurzelresorptionen. Die Hälfte der beobachteten hyalinisierten Areale zeigten keine Verbindung zu oberflächlichen Wurzelresorptionen; was daran liegen mochte, das erstere später entstanden.

Reorganisiert sich nekrotisches Gewebe, werden Substanzen freigesetzt, die Wurzelresorptionen induzieren. Daneben wird hyalines Gewebe beseitigt. Danach beginnen Reorganisation und Reparatur. Dies ist dann der Fall, wenn Kräfte innerhalb physiologischer Grenzen für eine solche Neubildung bleiben.

In ihrer Studie waren Hyalinisationen, besonders nach der ersten bis vierten Woche der Kraftapplikation, zu erkennen, während sie nach fünf bis sieben Wochen deutlich abnahmen.

Die Autoren sprachen bei niedrigen Kräften (38-50 cN) von einer Semihyalinisation oder von einem Primärstadium der kompletten Hyalinisation mit mehr vitalem Gewebe und geringerem Risiko zu Wurzelresorptionen.

Aktive Resorption kann auch in der Nähe von nekrotischen Zonen durch Reaktionen lebensfähigen Gewebes geschehen. Jedenfalls muss selbst bei vergleichbar geringen orthodontischen Kräften mit Hyalinisationen und Wurzelresorptionen gerechnet werden [58].

Die Hyalinisation provoziert zelluläre Reaktionen in angrenzenden Alveolarknochen und Wurzeloberflächen. Sie besteht bei einem jungen Patienten für etwa zwei bis vier Wochen [46].

Beim Vergleichen der Ergebnisse bei lichtmikroskopischer Studie und Analyse mittels Rasterelektronenmikroskop konnten HELLSING und HAMMARSTRÖM im Tierversuch bereits einen Tag nach Kraftapplikation begrenzte Areale mit hyalinisiertem Gewebe nachweisen. Sie beschrieben eine Oberflächenveränderung des Zementes unter der hyalinen Schicht. In der Peripherie des hyalinen Bereichs fanden sich vielkernige Zellen, die möglicherweise durch den entblößten mineralisierten Zement angezogen wurden. Der Abbau der osteoiden Schicht ging der osteoklastischen Knochenresorption voran. In dieser Studie traten nicht sofort Resorptionen unter der hyalinen Schicht auf, sondern erst nach sieben Tagen. Die resorbierenden Zellen bekamen durch die Variabilität der Stärke der hyalinen Schicht unterschiedlich rasch Zugang zur Wurzel. Dieser Vorgang erstellte ein komplexes Muster unbeschädigter und resorbierter Areale der Wurzeloberfläche [46].

Normalerweise bildet die zementoide Schicht zusammen mit dem reiferen parodontalen Kollagen (beziehungsweise das parodontale Ligament [39]) eine Barriere zur Vorbeugung von Wurzelresorptionen. Der Resorptionsprozess schreitet jedoch fort, wenn orthodontische Kräfte im Anschluss an die Entfernung des gesamten hyalinen Gewebes anhalten [100].

Ähnliche Schlüsse zogen HARRIS und BUTLER in ihrer Darstellung, dass eine pathologische, dystrophische Antwort in Form von Resorptionen dann auftritt, wenn die auf den Zahn angewendete Kraft den Widerstand und die Reparaturfähigkeit der Gewebe übersteigt. Sowohl intaktes parodontales Ligament, als auch vitaler Zement sind nötig, um Resorptionen zu widerstehen [41].

Nach den Autoren haben Malassez-Epithelreste, mehr als das vitale parodontale Ligament, eine wichtige Schutzfunktion für den Zement. Diese Überbleibsel der Hertwigschen Epithelscheide wurden nahe dem Zement entdeckt. Vermutungen gingen in die Richtung, dass diese epithelialen Reste eine Substanz produzieren, die die Fusion von Alveolarknochen und Zement verhindert, und somit eine protektive Funktion gegen Wurzelresorptionen ausübt [41].

Die Malassez-Epithelzellreste wurden ebenfalls im Zusammenhang mit Reparaturmechanismen hervorgehoben [44].

In die gleiche Richtung wies eine Studie von SRINGKARNBORIBOON, MATSUMOTO und SOMA. Bei nicht in Okklusion stehenden Zähnen stellte sich histologisch ein verändertes, hypofunktionales Parodontium dar. Ein Tierexperiment bewies, Zähne mit hypofunktionalem Parodontium weisen deutlich mehr Resorptionen auf. Sie sind deshalb mit Vorsicht zu behandeln [106].

Diese durch Minderbelastung des parodontalen Ligamentes hervorgerufene direkte Wurzelresorption bildete für MELSEN die Grundlage für eine neue Betrachtungsweise [74].

Klasten führen bei kieferorthopädischer Zahnbewegung die Resorption mineralisierter Gewebe aus. Die Adhäsion der Klasten an mineralisiertem Gewebe wird durch Glykoproteine der Zelloberfläche (Integrine) vermittelt, besonders durch das Integrin $\alpha\text{v}\beta\text{3}$. Dieses wurde schon im Zusammenhang mit Knochenresorption beobachtet, die zu Osteoporose führte [108].

Im Tierversuch wiesen TALIC, EVANS et al. im Jahre 2004 durch mikroskopische und immunhistochemische Untersuchung eine Expression des Alphavbeta3-Integrins nach, sowohl bei Osteoklasten, die Knochen resorbierten, als auch bei wurzelresorbierenden Odontoklasten. Die Untereinheit beta3 wurde auch in den Malassez-Epithelresten im parodontalen Ligament exprimiert.

Auch der Adhäsionsrezeptor des Alphavbeta3-Integrins wurde exprimiert und kann deshalb am Resorptionsprozess mineralisierter Gewebe und der Funktion der Malassez-Epithelreste beteiligt sein [108].

Im Tierversuch hoben ZHANG, GOETZ, BOURAUUEL und JAEGER die Bedeutung von Interleukin-1 (IL-1) und Tumornekrosefaktor- α (TNF- α) hervor. Sie stellen typische Mediatoren einer entzündlichen Reaktion dar, wobei TNF- α eng mit dem mononukleären Phagozytosesystem verknüpft ist. TNF- α ist mehr für Wurzelresorptionen verantwortlich als IL-1. Werden beide Zytokine inhibiert, treten verminderte Resorptionen sowohl am Knochen, als auch an der Wurzel auf. Dies gibt wiederum einen Hinweis darauf, dass beide Resorptionsmechanismen wahrscheinlich identisch sind [115].

SEIFI, ESLAMI und SAFFAR führten ein Tierexperiment durch und folgerten, dass erhöhte orthodontische Zahnbewegung bei Prostaglandin-E2-(PG-E2-)Zugabe erfolgt. Bei gleichzeitiger Applikation von Kalziumglukonat verringerte sich die Zahnbewegung, lag jedoch noch signifikant über dem Wert der Kontrollgruppe. Hier traten keine signifikanten Unterschiede bei der Wurzelresorption auf [101].

Diese Ergebnisse zeigten, dass Kalziumionen in Verbindung mit PG-E2 bei gleichzeitiger Zunahme der Zahnbewegung Wurzelresorptionen vermindern [101].

Die Applikation von Misoprostol, als Analogon von Prostaglandin-E1, brachte im Tierversuch ebenfalls einen Anstieg der Zahnbewegung mit sich. Das Ausmaß der Wurzelresorptionen unterschied sich nicht signifikant, dennoch war eine Tendenz zu umfangreicheren Resorptionen erkennbar. Die Applikation von Misoprostol kann also zu erfolgreicherer Zahnbewegung bei minimaler Wurzelresorption beitragen [102].

Um die physiologischen Prozesse zu verstehen, untersuchten FRANCINI, MANCINI et al. mikroskopische Aspekte der Wurzelresorption bei Milchzähnen. Sie zeigten die topographischen Zusammenhänge zwischen dem Druck des permanenten Zahnes, dem Ausmaß der Wurzelresorption und den verschiedenen Gewebeprozessen, die während Resorptionen ablaufen.

Die auffällig starken Milchzahnresorptionen durch den Druck des nachkommenden Zahnes bestätigten, dass Druck ein Hauptfaktor für die Differenzierung und Funktion der Odontoklasten ist, und auch Knochenresorption stimuliert [34].

Bei der physiologischen Resorption an Milchzähnen untersuchte SASAKI im Tierversuch die Expression von H(+)-ATPase, Cathepsin K (lysosomale Cystein-Proteinase) und Matrix-Metalloproteinase-9 in Odontoklasten. Er entdeckte keine Unterschiede in der Expression dieser Moleküle zwischen Osteoklasten und Odontoklasten.

Die Differenzierung und Funktionen von Osteoklasten steuern von Osteoblasten abgeleitete Faktoren. Der Rezeptoraktivator des NF κ B- (=nuclear factor of kappaB-) Liganden (RANKL) stimuliert die Osteoklastenbildung. Ein neu entdecktes Osteoprotegerin aus der Subfamilie der Tumornekrosefaktor-(TNF-)Rezeptoren hat negativen Einfluss auf die Genese der Osteoklasten [99].

Als wichtigste Enzyme bei der Dekalzifizierung von Apatitkristallen und beim Abbau von Typ-I-Kollagen erwähnten OSHIRO, SHIBASAKI, MARTIN und SASAKI ebenso die H(+)-ATPase, Cathepsin K und die Metalloproteinase-9 (MMP-9). RANKL (receptor activator of nuclear factor kappaB ligand), als einer der Schlüsselregulatoren bei der Bildung und Funktion der Osteoklasten, wurde sowohl bei einkernigen Bindegewebszellen, als auch bei Odontoklasten auf resorbierten Dentinoberflächen lokalisiert. Odontoklasten trugen direkt zur Dekalzifizierung der Apatitkristalle bei, indem sie durch die H(+)-ATPase Protonen aktiv ausstießen und extrazellulär mittels Cathepsin K und MMP-9 das Typ-I-Kollagen des Dentins abbauten. Zusätzlich wurde durch RANKL zumindest zum Teil die Differenzierung und Aktivität der Odontoklasten beeinflusst.

Diese zellulären Mechanismen der Wurzelresorption scheinen demnach den Abläufen der osteoklastischen Knochenresorption sehr zu ähneln [78].

RANKL wurde auch in Bindegewebszellen entdeckt, die sich auf resorbierten Dentinoberflächen befanden. Es scheint also einen gemeinsamen Mechanismus der zellulären Resorption von mineralisiertem Gewebe bei Knochen und Zähnen zu geben, bei dem RANKL und Osteoprotegerin als wichtige Regulatoren der Differenzierung und resorptiven Funktion der Osteoklasten wirken [99].

In einer immunzytochemischen Studie analysierten FUKUSHIMA et al. an Zellen menschlicher Milch- und bleibender Zähne die Expression der Regulatoren RANKL und Osteoprotegerin. Zellen des parodontalen Ligamentes von nicht resorbierten Milchzähnen und bleibenden Zähnen exprimierten reichlich schützendes Osteoprotegerin, aber kein RANKL. Im Gegensatz dazu produzierten Zellen aus dem parodontalen Ligament resorbierender Milchzähne überwiegend RANKL [36].

Die Autoren beobachteten zusätzlich einen von der RANKL-Konzentration abhängigen Anstieg resorptiver Aktivität der Odontoklasten. Die Expression von RANKL ist wahrscheinlich auch an der Genese der Odontoklasten beteiligt und aktiviert physiologische Wurzelresorption [36].

In einer weiteren Studie an menschlichen Milchzähnen mit Wurzelresorptionen erläuterten LOSSDÖRFER, GÖTZ und JÄGER, dass RANKL in Fibroblasten des parodontalen Ligamentes, Odontoblasten, Pulpafibroblasten und einzelnen Odontoklasten auftrat, während RANK in vielkernigen Odontoklasten und deren einkernigen Vorläufern festgestellt wurde. Menschliche dentale Zellen exprimieren also Schlüsselmediatoren der pathologischen und physiologischen Resorption von Hartgewebe. Das RANK/RANKL-System kann nicht als alleiniger Regulator der Wurzelresorption angesehen werden, scheint aber unabhängig von Zytokinen, wie TNF- α zu arbeiten [68].

2.5 Ätiologie

Die vielfältigen Ursachen apikaler Wurzelresorptionen gaben im Laufe der Zeit immer wieder Anlass zu neuen Untersuchungen. Da zahlreiche Faktoren eine Rolle spielen, gestaltet sich die Analyse einzelner Gegebenheiten nach wie vor als schwierig, jedoch ragen bestimmte Merkmale wiederholt hervor.

Faktoren der nahen Umgebung

Zysten, Tumoren und auch Infektionen können resorptive Geschehen auslösen [60]. Auch parodontale Entzündungen können zu Wurzelresorptionen beitragen [112], so wie auch die reduzierte Höhe des krestalen Knochens [94].

Als weiterer Risikofaktor war bei KALEY und PHILLIPS die Annäherung der Wurzel an die Kortikalis aufgetaucht [51], was bei anderen Autoren sowohl Bestätigung [48], als auch Widerspruch [76] fand.

Durch den Druck impaktierter Zähne werden auch Resorptionen an den Nachbarzähnen hervorgerufen [26, 60, 66].

Durch Non-Okklusion können ebenfalls vermehrt radikuläre Resorptionen provoziert werden. Solche Zähne sind deshalb mit Vorsicht zu behandeln [106].

Habits verursachen auch verstärkte apikale Resorptionen [60, 66, 94].

Durch ein immunhistochemisches Tierexperiment des Jahres 2003 stellte sich heraus, dass sympathische Nervenfasern einen inhibitorischen Effekt auf Wurzelresorptionen ausüben. Gleichzeitig fördern sie die Zahnbewegung, da sie Einfluss auf die Entzündungsreaktion nehmen [45].

Endodontisch versorgte Zähne werden seltener als vitale Zähne resorbiert [105].

LEVANDER, MALMGREN und STENBACK sagten aus, dass Patienten mit multiplen Aplasien (vier oder mehr fehlende Zähne) ein hohes Risiko apikaler Wurzelresorptionen bergen. Dies ist vermehrt bei Zähnen mit abnormer Wurzelform und längerer Behandlungsdauer mit Elastiks und rechteckigen Drähten der Fall [65].

Allgemeine Ursachen

Nach einer Studie von SAMESHIMA et al. wiesen Asiaten weniger Wurzelresorptionen auf als weiße oder hispanische Patienten [97].

Asthmatiker neigten zu höheren Inzidenzen von Wurzelresorptionen, aber bei mäßigen und schweren Resorptionen unterschieden sie sich nicht wesentlich von gesunden Patienten [73].

Offensichtlich gibt es eine genetische Komponente der Anfälligkeit für Wurzelresorptionen [2, 40, 43].

Dies bestätigte auch eine weitere Studie, die bei Geschwistern ähnliche Resorptionsmuster feststellte, was auf eine familiäre Prädisposition hindeutet [42].

Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die genetischen Faktoren mit Einfluss auf die Wurzelresorption als heterogen erweisen, mit verschiedenen Mechanismen oder sogar seitenspezifischen Reaktionen beim gleichen Individuum [3].

Gesichts- und Schädelmorphologie

Bei Patienten mit verstärktem Overjet [66, 97] oder offenem Biss [41] stellten Untersuchungen erhöhte Wurzelresorptionen fest.

Um vorauszusagen, ob umfangreiche resorptive Verkürzungen der Wurzel zukünftig auftreten werden, sind die Gesichts- und Schädelformen ebenso wenig verwendbar, wie dentoalveoläre Strukturen [107].

Trauma

Traumatische Verletzungen provozieren Oberflächen-, Ersatz- und entzündliche Resorptionen oder durch anschließende kieferorthopädische Regulierung apikale Wurzelresorptionen [39].

Zum Beispiel berichtete ein Fall über oben genannte Vorgänge nach Therapieversuch eines subluxierten zentralen Schneidezahnes [29].

Dennoch besteht durchaus die Möglichkeit, einen Zahn nach chirurgischem Trauma und nachfolgender orthodontischer Behandlung zu erhalten [8, 30].

RUPP bestätigte in einem Bericht über einen Patienten starke Resorptionen nach Luxation der vier Oberkieferfrontzähne [93]. Er erwähnte in seinem Literaturreückblick auch Resorptionsvorgänge nach Traumata des Zahnhalteapparates durch Intrusion, Luxation oder Exfoliation [94].

Erhöhte Resorptionsrisiken sind bei traumatisierten [66] und bei chirurgisch mobilisierten Zähnen zu erwarten [38].

Kieferorthopädische Therapie

Durch orthodontische Therapie induzierte Wurzelresorptionen sind lange bekannt [4, 94], doch hier spielt wiederum eine erhebliche Anzahl von Merkmalen eine Rolle:

- Therapiedauer, Zahnbewegungsrichtung und –strecke

Starke Torquemomente sorgen für erhöhte Resorptionsraten [51]. In Abhängigkeit der verwendeten Kräfte traten auch bei CASA, FALTIN et al. Wurzelresorptionen bei Torquemomenten auf [20].

Auch bei längerer Behandlungsdauer, bei Extrusion und bei „Jiggling“-Belastungen erscheinen in ausgeprägterem Maße Resorptionen [38].

Es gibt jedoch widersprüchliche Aussagen zum Zusammenhang von Therapiedauer und Wurzelresorptionen. Einige der Autoren sahen mehr Resorptionen bei längerer Behandlung [5, 38, 50], während andere keinen Einfluss der Behandlungsdauer auf die Resorptionen konstatierten [6, 76].

Intrusion zeigte sich in verschiedenen Studien als bedeutsamer Risikofaktor für Wurzelresorptionen, abhängig von der jeweils verwendeten Kraftgröße [32, 25].

In einem Experiment von PARKER und HARRIS ließen sich bis zu 90% der Resorptionen durch die Art der Zahnbewegung erklären. Besonders Torque in Kombination mit Intrusion, aber auch vertikale Bewegungen mit Protrusion riefen, im Gegensatz zur Extrusion, starke Resorptionen hervor [84].

- Vergleich der Wirkung verschiedener Apparaturen und Techniken

Standard-Edgewise-Technik und Straight-Wire-Technik unterscheiden sich nicht signifikant, während bei der bioeffizienten Therapie weniger Wurzelresorptionen auftreten; zu begründen durch die Verwendung von superelastischen und dünneren Drähten [49].

Diesem Ergebnis widersprach eine neuere Studie, in der durch Verwendung superelastischer Drähte die Kraft länger aufrechterhalten wurde und dadurch mehr Wurzelresorptionen auftraten als bei Stahldrähten [113].

Werden die Lightwire-Technik nach Begg, die Standard-Edgewise-Technik nach Tweed und die Straight-Wire-Technik nach der Vorgabe von Roth miteinander verglichen, ergeben sich keine Unterschiede bei den Wurzelresorptionen [6, 84, 91].

Nur bei männlichen Patienten konnte nachgewiesen werden, dass die Edgewise-Technik mehr apikalen Wurzelabbau verursachte als die Speed-Apparatur [10].

Es konnten keine Resorptionsunterschiede zwischen kontinuierlichen Bögen und geteilten Bögen ermittelt werden [1].

Beim Vergleich von einphasiger und zweiphasiger Behandlung, zeigte die Therapie mit herausnehmbaren und festsitzenden Apparaturen gegenüber der Behandlung ausschließlich mit festsitzenden Geräten eine, wenn auch nur leichte, Erhöhung der Resorptionsrate [16].

- Auswirkungen einer Behandlungspause

In einer anderen Studie folgerten die gleichen Autoren, dass eine Behandlungsunterbrechung von einer Woche nach drei Wochen Therapiezeit die Resorptionen nicht zu verringern vermag [80].

LEVANDER, MALMGREN und ELIASSON bewiesen demgegenüber die resorptionsreduzierende Wirkung einer längeren Therapiepause von zwei bis drei Monaten nach halbjähriger Behandlungszeit [64].

- Applizierte Kräfte

OWMAN-MOLL, KUROL und LUNDGREN studierten das Verhalten von Wurzelresorptionen bei Verdopplung der angewendeten Kraft von 50 cN auf 100 cN [81].

Zwar stellten sie starke individuelle Variationen fest, insgesamt unterschieden sich die Resorptionsraten und Bewegungsausmaße der Zähne der beiden Kraftgrößen jedoch nicht signifikant [81].

Sie experimentierten ebenso mit Kräften von jeweils 50 cN und 200 cN. Im Vergleich ergaben sich jedoch keine Unterschiede bei den apikalen Wurzelverlusten, obwohl sich die Zähne bei 200 cN rascher weiter bewegen ließen [83].

Eine Studie des Jahres 1995 entdeckte dagegen eine Kraftabhängigkeit der Resorptionen, zumindest in den ersten sieben Wochen der Zahnbewegung [79].

- Wurzelmorphologie

Dentitionen mit Agenesien, Invaginationen und besonders mit Taurodontismus lassen ein spezielles Risiko für Resorptionen der Wurzeln erkennen. Auch Wurzellänge und –form spielen eine Rolle [56].

Im Gegensatz dazu fanden LEE et al. bei diversen dentalen Anomalien, wie Agenesie, Invagination, Taurodontismus, Pfahlform, ektopischer Eruption und verkürzten Wurzeln, keine Unterschiede im Resorptionsmuster gegenüber normalen Zähnen [61].

KUROL et al. merkten an, dass die Wurzellänge nicht im Zusammenhang mit den Resorptionsmustern steht [59].

Eine Fallstudie erläuterte die Unvorhersagbarkeit von Wurzelresorptionen. Bei verkürzten Wurzeln wurde eine orthodontische Behandlung abgelehnt, während sie in einem anderen Fall zu Resorptionen an den ohnehin schon kurzen Wurzeln führte [21].

KOOK, PARK und SAMESHIMA hielten pfahlförmige und kleine seitliche Schneidezahnwurzeln nicht für mehr resorptionsgefährdet als normal geformte Wurzeln [57].

Dem entgegen stand eine Studie, die bei pipettenförmigen und stumpfen Wurzelformen erhöhte Resorptionen maß [62, 63].

Eine weitere Studie bestätigte verstärkte Wurzelresorptionen an abnorm geformten Wurzeln [16].

- Alter bei Behandlungsbeginn

Bezüglich des Alters herrscht weitestgehend Einigkeit darüber, dass es keine oder lediglich eine sehr untergeordnete Rolle bei der Ausbildung von Wurzelresorptionen spielt [94, 42].

- Nicht abgeschlossene Wurzelentwicklung

GÖZ und RAKOSI beobachteten in Einzelfällen einen Wachstumsstillstand und zusätzlich Resorptionen an nicht vollständig entwickelten Wurzeln [38]. Doch dem widersprechen die meisten Studien und belegten deutlich weniger apikale Resorptionen bei nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum [28, 72, 114].

- Geschlechter

Mädchen schienen anfälliger für Wurzelresorptionen zu sein als Jungen [5, 50, 56]. Dies wurde jedoch kontrovers diskutiert, weil einige Studien das Ergebnis widerlegten [6, 42, 59, 84, 97].

2.6 Reparaturmechanismen

Apikale Wurzelresorptionen gelten weithin als irreversibel [38], während bei lateralen Resorptionen Reparaturmechanismen nach Beendigung der Kraftapplikation einsetzen [18].

Es wurde sogar über allmähliche Reparatur nach Trauma der parodontalen Membran und den damit verbundenen Resorptionen berichtet [8].

Die orthodontisch hervorgerufenen Wurzelresorptionen wurden fast ausschließlich mit zellulärem Zement repariert. Ein solcher Zement konnte schon eine Woche nach Ende der aktiven Behandlung ausgemacht werden. Etwa 75% der Resorptionslakunen zeigten Heilungsanzeichen, dennoch sind acht Wochen später 50% der Lakunen nicht repariert, oder zeigten nur eine leichte Bedeckung mit neuem Zement [82].

OWMAN-MOLL registrierte dagegen nach Ablauf von acht Wochen eine restitutio von 75% der Lakunen, während nach einer Woche nur 28% mit Sekundärzement versehen waren. Doch ähnlich den Wurzelresorptionen scheint es auch bei den Reparaturpotentialen große individuelle Unterschiede zu geben [79].

Im parodontalen epithelialen Netzwerk wurden regenerierende Odontoblasten mit vermehrten epidermalen Wachstumsfaktor-(EGF-)Rezeptoren in der Nähe der Resorptionslakunen entdeckt. Dies kann ein Mechanismus zur Induktion der Bildung von Reparaturzement sein [103].

Schon die Reduzierung auf sehr geringe Kräfte bewirkte Reparaturen, zumindest im Tierexperiment. Fibroblastenähnliche Zellen wanderten in die Resorptionsbereiche. Nach zehn Tagen konnten in der Peripherie der Lakunen neue zahnunterstützende Strukturen erkannt werden, während im Zentrum noch aktive Resorption stattfand. Nach Beendigung der Krafteinwirkung traten zu späteren Zeitpunkten Reparaturprozesse auf, die der Zementogenese bei der Zahnentwicklung entsprachen. Nach 21 Tagen entstand mineralisierter Zement und auch die Wiederherstellung des parodontalen Ligamentes war abgeschlossen [18].

In der Diskussion sind auch die Malassez-Epithelreste als potentieller Mediator der Reparaturzementogenese. Bedenkt man, dass der ursprüngliche Wurzelzement von Zellen der Hertwigschen Epithelscheide produziert wird, lässt sich die spätere Funktion der ehemaligen Hertwig-Zellen verstehen. In frühen Reparaturphasen produzieren diese Zellen Ameloblastin. Solche Schmelzmatrixproteine, die, zumindest im Tierversuch, von Malassez-Epithelzellen gebildet wurden, beeinflussen die Zahnmorphologie und Zementbildung, indem sie Mesenchymzellen induzieren, sich zu Zementoblasten zu differenzieren [44].

Auch Knochenmatrixproteine stammen von diesen Epithelzellen, wie zum Beispiel das bone morphogenetic protein-2 (BMP-2), das der mesenchymalen Umgebung möglicherweise signalisiert, am Reparaturprozess teilzunehmen. Auch entdeckten HASEGAWA et al. im Jahre 2003 das Osteoprotegerin als Produkt der Malassez-Epithelzellen. Weiterreichende Überlegungen wiesen darauf hin, dass diese Zellen sich auch transformieren und direkt am Reparaturprozess teilhaben [44].

2.7 Vorhersage von Wurzelresorptionen

Manche Autoren unterstrichen schlicht die Unvorhersagbarkeit von Wurzelresorptionen [21], während die meisten anderen nach Faktoren suchten, die prognostische Aussagen ermöglichen.

Laut KILLIANY (1999) existierte bisher kein Voraussagesystem zur Erkennung von Patienten, respektive Zähnen, die ein starkes Ausmaß (über 5 mm) an Wurzelresorptionen erfahren werden [53].

Messungen der dentoalveolären Strukturen und der Gesichtsformen vermittelten zwar Indizien, reichten aber nicht aus, um eine Vorhersage zu treffen [6, 107].

Auch wenn eine absolute Vorhersage nicht möglich war, erlaubten die Ergebnisse einiger Studien folgende Generalisationen [52, 97, 98]:

- Primär betroffen sind Oberkieferschneidezähne, besonders der seitliche Inzisivus.
- Abnorm geformte Wurzeln zeigen ebenfalls ein erhöhtes Risiko.
- In der Unterkieferfront haben erwachsene Patienten mehr Resorptionen als Kinder.
- Weiße und Hispanische Patienten weisen mehr radikulären Abbau auf als Asiaten.
- Starker Overjet führt vermehrt zu vorerwähnten Prozessen.
- Horizontale Zahnbewegung (besonders der Frontzahnspitzen der Maxilla) verursacht Wurzelresorptionen.
- Bei Extraktion von vier Prämolaren treten Resorptionen vermehrt auf.
- Je länger die Patienten aktiv behandelt sind, desto mehr Wurzelsubstanzverluste sind erkennbar.
- Praxisspezifische Unterschiede sind ebenfalls eindeutig belegt.

- Männliche und weibliche Patienten scheinen gleichen Risiken zu unterliegen.
- Es werden keine Zusammenhänge mit der Slotgröße, Typ des Drahtbogens, Gebrauch von Elastiks oder Expansionsarten entdeckt.

Probleme bei der Prognose manifestieren sich durch die starken intra- und inter-individuellen Variationen [12, 15, 79, 80, 83].

Abschließend war festzuhalten, dass einige Faktoren, wie Wurzelform, ethnische Herkunft des Patienten, Behandlungsdauer, Richtung der Zahnbewegung, Patientenalter (nur bezogen auf die Unterkieferfront) und die behandelnde Praxis, Wurzelresorptionen negativ beeinflussen [52, 97, 98]. Mit großer Übereinstimmung wurde konstatiert, dass traumatisierte Zähne eher zu stärkeren Resorptionen neigen [29, 30, 66, 93].

Indes ereigneten sich mitunter Fälle, für die keinerlei Ursachen gefunden wurden. Diese generalisierten idiopathischen Wurzelresorptionen ließen, wenn überhaupt, nur sehr zurückhaltende kieferorthopädische Korrekturen zu [26, 104].

Zur Vorhersage von Resorptionen schlug DE MUELENAERE vor, ein Röntgenbild vor der Behandlung zu erstellen, um Zähne mit hohem Risiko zu erkennen. Sind Wurzelresorptionen schon vor der Behandlung aufgetreten, so verstärken sie sich zumeist bei kieferorthopädischer Therapie [29].

LEVANDER und MALMGREN fanden ebenso einen neuen Ansatz, um durch kieferorthopädische Therapie provozierte Wurzelresorptionen abzuschätzen. Mittels intraoralen Röntgenaufnahmen, die sechs bis neun Monate nach Behandlungsbeginn angefertigt wurden, konnten sie richtungsweisende Prognosen aufstellen. Traten zu diesem Zeitpunkt bereits Resorptionsmuster auf, so war im weiteren Verlauf mit stärkeren Ausprägungen zu rechnen. Waren dagegen keine Anzeichen nach halbjähriger Therapie zu erkennen, so blieben auch bei Fortsetzung der Behandlung schwerwiegende Resorptionen aus [63].

2.8 Diagnostik

Wurzelresorptionen im allgemeinen ließen sich mittels Elektronen- oder Lichtmikroskop auch in schwächeren Formen entdecken [17, 18, 20, 32, 46, 58, 69, 79, 81, 83].

Der Vorteil dieser Methodik liegt darin, Wurzelresorptionen schon in frühen Stadien zu diagnostizieren, denn die nach sieben Wochen auftretenden, histologisch nachgewiesenen Resorptionen, sind röntgenologisch noch nicht erkennbar [59, 62].

Kürzlich wurde eine neue volumetrische Erfassung von Resorptionskratern vorgestellt, die mit Stereo-Raster-Elektronenmikroskop und darauf abgestimmter Bildanalyse-Software arbeitete [22].

Für solche Beurteilungsmethoden ist allerdings die Extraktion der entsprechenden Zähne eine *conditio sine qua non*. Für Routineuntersuchungen oder retrospektive Erhebungen sind sie daher nicht geeignet.

Röntgenologisch lassen sich seitliche Wurzelresorptionen nur sehr selten aufspüren, während apikale Formen gut zur Darstellung kommen [38].

Fernröntgenseitenbilder dienen nur sehr eingeschränkt einer Diagnose, geschweige denn einer metrischen Bestimmung von Wurzelresorptionen, da durch Überlagerungen die Apizes undeutlich abgebildet werden. Finden sie dennoch Verwendung, so kann zum Beispiel ein Minimalwert von 2 mm erkennbarer Resorption angenommen werden [38]. Sie kommen überwiegend bei gleichzeitiger Beurteilung der skelettalen Gesichtsstrukturen zum Einsatz [107].

Bewährt hat sich dagegen das intraorale Röntgen mittels Halbwinkeltechnik und zusätzlicher digitaler Rekonstruktion zum Ausgleich eventuell unterschiedlicher Einfallswinkel [90, 91].

Einen ähnlichen Erfolg liefern in Paralleltechnik belichtete Zahnfilme [10, 49], wobei ein spezieller Aufbissblock für jeden untersuchten Zahn [86] oder individuelle Filmhalter [64] hilfreich sind.

Eine diagnostische Gegenüberstellung zeigte die Überlegenheit der intraoralen Röntgenbilder gegenüber der Panoramaschichtaufnahme [33].

Für eine metrisch möglichst genaue Erfassung der apikalen Wurzelresorptionen eignen sich optimal intraorale Zahnfilmaufnahmen. Das bewies eine Arbeit, die zwischen Zahnfilmen und Orthopantomogrammen (OPG) verglich.

Während der Zahnfilm um etwa 5% vergrößerte, wurden im OPG schon generelle Vergrößerungen von 25-30% und bei der Wurzellänge etwa 5-20% gemessen. In der Panoramaaufnahme wurden quantitativ fast doppelt so starke Resorptionen festgestellt wie im Zahnfilm. Besonders die Beurteilung der Frontzähne stellte ein Problem dar. Selbst bei einer Korrektur der Werte um 20% ergaben sich mehr Wurzelresorptionen im OPG, besonders in der Unterkieferfront. Außerdem bot der Zahnfilm eine getreuer Darstellung der anomalen Zahnformen [96].

Neuere Methoden setzten digitales Röntgen ein, welches sich durchaus zur Diagnose von Wurzelresorptionen eignet [11] und sensitiver wird, je größer die resorbierte Kavität ist [62].

Bevorzugt war auch die digitale Subtraktionsradiographie wegen ihrer quantitativen Analyse auch kleinerer Veränderungen am Apex [47].

2.8.1 Neuste Entwicklungsansätze zur Diagnostik

Durch Dentinphosphoproteine, die bei Wurzelresorption in der zervikalen Gingivalflüssigkeit mit Hilfe von ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) nachgewiesen wurden, konnten Wurzelresorptionen laut MAH und PRASAD – als non-invasive Alternative zur Röntgendiagnostik – biochemisch untersucht werden. Es besteht jedoch noch Forschungsbedarf, inwiefern diese Methode zur quantitativen Bestimmung der Resorptionen Verwendung finden kann [71].

2.8.2 Allgemeine diagnostische Bedeutung des Orthopantomogramms

Die erste Panoramaschichtaufnahme fertigte PAATERO 1950 nach den Prinzipien der Tomographie an.

Sie gibt umfassend die Gesamtsituation und die Pathologien der Kiefer und Nachbarstrukturen (Kieferhöhle und Gelenkanteile) wieder.

Dies ist zur systematischen Befunderhebung sowohl in der Kieferorthopädie, als auch in der zahnärztlichen Praxis notwendig und hilfreich.

Sie hat allerdings keine sehr hohe Detailschärfe, besonders im Frontzahnbereich, bedingt durch den Schatten der Wirbelsäule. Nachteilig wirkt auch die systembedingte Vergrößerung. Dennoch kann das Orthopantomogramm eine rasche und strahlungsarme Übersicht geben und bleibt nicht umsonst Mittel der Wahl zur primären Befunderhebung und Diagnostik.

2.8.3 Einschätzung apikaler Wurzelresorptionen anhand der Panoramaschichtaufnahme

Übersichtsaufnahmen geben zur metrischen Auswertung nicht genug Präzision wieder und vergrößern zu stark, so dass hier eine Einteilung in Resorptionsstadien zumeist den Vorzug erhält.

Sowohl GÖZ und RAKOSI [38], REMINGTON et al. [89], KALEY und PHILLIPS [51], BRIN et al. [16] als auch ALEXANDER [1] stellten diverse Graduierungen der radikulären Resorptionen auf. Schließlich wurde das Schema nach LEVANDER und MALMGREN am häufigsten zitiert und auch bei Zahnfilmen verwendet [6, 40, 41, 49, 63, 65].

In anderen Studien wurde die Kronenlänge in Relation zur Wurzellänge gesetzt. So sollte die relative prozentuale Verkürzung durch Resorptionen ermittelt und damit die nicht direkt messbare Vergrößerung des Orthopantomogramms ausgeglichen werden [35].

Es ist jedoch zu beachten, dass die Schmelz-Zement-Grenze trotz Versuchen zur Standardisierung nicht präzise identifiziert wird [61].

Außerdem wird diese Methode beschränkt, da durch röntgenologische Kronenverkürzung, zum Beispiel verursacht durch eine angulierte Zahnstellung oder Projektionsfehler, die resorptive Wurzelverkürzung leicht überschätzt werden kann [75].

Metrische Messungen anhand von Orthopantomogrammen führen zu unpräzisen und nicht rekonstruierbaren Ergebnissen.

Die Schematisierung jedoch begünstigt die objektive Abschätzung der Wurzelresorptionsausmaße.

Somit empfiehlt es sich, in dieser Untersuchung auf die Interpretation mittels Resorptionsgraden zurückzugreifen.

2.9 Konsequenzen und Prävention von Wurzelresorptionen

Überraschenderweise stehen in der Literatur wenig Angaben über die Folgen von Wurzelresorptionen zur Verfügung. Es wurde auch in Langzeitauswertungen an keiner Stelle über Zahnverluste berichtet, die bei durch orthodontische Behandlung verursachten Resorptionen eintraten [111]. Als ungünstigster Befund wurde Hypermobilität bei wenigen Zähnen konstatiert [89].

Die Resorptionen finden überwiegend in klinisch unauffälligen Bereichen statt. Umso mehr müssen Fälle schwerwiegenden Ausmaßes im Auge behalten und dafür Behandlungspläne erarbeitet werden [111].

In mikroskopischen Graden treten Wurzelresorptionen bei jeder orthodontischen Behandlung auf, aber auch physiologisch bei nicht behandelten Zähnen [53, 111].

Einem Fallbericht zufolge, waren selbst stark resorbierte und zusätzlich traumatisierte Zähne noch lange Zeit in Funktion und Ästhetik zu erhalten [30].

BREZNIAK und WASSERSTEIN äußerten in ihrem Literaturrückblick ebenfalls, dass trotz apikaler Prozesse bei kieferorthopädischer Behandlung die Langlebigkeit und Funktion der Zähne nicht beeinträchtigt wird [14].

Ein Zusammentreffen von apikalen Wurzelresorptionen mit marginalem Knochenabbau läuft allerdings mit weniger harmlosen Folgen ab [111].

Laut BENENATI ist eine Wurzelkanalbehandlung indiziert, wenn die Resorptionen die Pulpa pathologisch verändern oder die Kronen-Wurzel-Relation beeinträchtigt wird [7].

In der Literatur werden Ratschläge zur Prävention erteilt, wie das Einhalten von kurzen Behandlungszeiten, die Verwendung von schwachen, intermittierenden Kräften, die Kontrolle von Habits, die Beachtung der medizinischen Krankengeschichte und familiärer Tendenzen. Jedoch gibt es keine Anhalte, dass diese Methoden eine definitiv präventive Strategie zur Reduktion der Inzidenz von Resorptionen repräsentieren.

Neuere Studien zeigten als protektive Faktoren nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum und endodontische Behandlung nicht traumatisierter Zähne. Diese Umstände beeinflussten positiv das Auftreten und den Grad der Resorptionen [111].

Die bessere Prognose endodontisch behandelter Zähne gegenüber vitalen wurde mehrfach bestätigt [75, 76, 105].

Bei bestimmten Bewegungsrichtungen, wie etwa Intrusion, ist darauf zu achten, schwache Kraft zu applizieren, um apikalen Geschehnissen vorzubeugen, respektive sie gering zu halten [25].

Auch Behandlungsunterbrechungen und Pausen von etwa drei Monaten wurden vorgeschlagen, um Zeit für Reparaturen zu gewinnen oder den Resorptionsprozess zu stoppen. Da der Sekundärzement resistenter gegen Resorptionen zu sein scheint, stellt diese Therapieform eine echte Alternative bei schon eingetretenen Wurzelresorptionen dar [111].

3. Zielstellung

In dieser Studie soll untersucht werden, ob ein Orthopantomogramm als Kontrollaufnahme nach etwa 6-monatiger Therapie einen Ansatz zur Bewertung der Progredienz von Wurzelresorptionen liefern kann.

Dabei soll gleichzeitig die Frage geklärt werden, ob für die Röntgenaufnahme zur Wurzelresorptionskontrolle nach einem halben Therapiejahr Notwendigkeit besteht.

Ein weiteres Ziel der Arbeit stellt die Überprüfung des möglichen Einflusses unterschiedlicher Merkmale, sowohl der Zähne, als auch der Patienten selbst auf die Ausprägung der Wurzelresorptionen dar.

Hierzu zählen:

- Extraktions- und Non-Extraktionsfälle
- Wurzelform
- Geschlecht
- Anzahl der Bogenwechsel
- Behandlungsdauer

Eine Studie kann selbstverständlich nicht sämtliche Risikofaktoren berücksichtigen, zumal diese Untersuchung retrospektiv ist und somit die auswertbaren Daten begrenzt sind.

Zudem wird der Frage nachgegangen, ob sich unterschiedliche Resorptionsraten beim Vergleich der Seiten, Quadranten und Kiefer ergeben.

Ein anderes Ziel der Untersuchung ist, herauszufinden, welche Zähne besonders von apikalen Resorptionen betroffen sind. Mögliche Hypothesen zur Begründung werden aufgestellt.

Selbstverständlich interessiert gleichwohl die Analyse der Häufigkeit und des Schweregrades der Wurzelresorptionen in der Poliklinik für Kieferorthopädie Düsseldorf.

Zusätzlich wird die Verteilung von Extraktions- und Non-Extraktionsfällen unter Berücksichtigung vorliegender Aplasien veranschaulicht.

4. Material und Methoden

4.1 Allgemeine Kriterien

Das Patientengut dieser Studie bestand aus 81 Patienten der Poliklinik für Kieferorthopädie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Archiviert wurden die Akten im Jahre 1997 bis 2003.

Die Untersuchung bezog Patienten mit Aplasien, Freilegungsoperationen und Extraktionen bleibender Zähne mit ein.

Jedoch schloss eine geplante Umstellungsosteotomie einige Patientendaten wieder aus.

Ebenso konnten keine Spaltpatienten miteingebunden werden.

Es wurde kein Mindestzeitraum für die Dauer der Multiband-Therapie aufgestellt.

Durch die Auswahlkriterien kam es mitunter vor, dass nur ein Kiefer oder nur einzelne Zähne pro Patient überprüft werden konnten.

Jedoch erfasste die Untersuchung, bei Erfüllung aller Kriterien, die Zähne 16 bis 26 und 36 bis 46. Insgesamt berücksichtigte die Studie 1538 Zähne.

Im Einzelfall fielen die Zähne 34 und 33 aus der Bewertung heraus, da Verdacht auf ein Zementom apikal des Zahnes 34 bestand. Es verursachte eine apikale Opazität, die eine korrekte Analyse der Wurzelspitzen unmöglich machte.

Alle Patienten wurden einheitlich mit der Straight-Wire-Technik behandelt.

4.2 Auswahl und Erstellung der Orthopantomogramme

Die Wurzelresorptionen wurden anhand von Orthopantomogrammen (OPG) zu drei verschiedenen Zeitpunkten untersucht.

Dazu war als erstes eine Aufnahme vor Beginn der Behandlung mit festsitzender Apparatur notwendig. Diese war in den meisten Fällen vorhanden, da gewöhnlich ein OPG bei der Erstvorstellung eines Patienten zur Basisdiagnostik nötig war.

Zunächst sollte ein weiteres Röntgenbild fünf bis neun Monate nach Beginn der Therapie angefertigt worden sein. Dann stellte sich heraus, dass dieses Kriterium die Patientenzahl zu stark reduzierte. Deshalb wurde die neu gewählte Zeitspanne der zweiten Röntgenaufnahme auf vier bis zehn Monate mit einem beidseitigen Spielraum von 20 Tagen festgesetzt.

Auch das Kriterium für das dritte OPG schloss zu viele Patienten aus, da es mindestens ein Jahr nach Entbänderung erstellt worden sein sollte. Somit wurde dieser Röntgenzeitpunkt auf maximal einen Monat und 20 Tage vor der Entbänderung festgelegt. Es wurde davon ausgegangen, dass in dieser Zeit, zum Ende der Therapie hin, keine Veränderungen mehr zu erwarten sind.

Das Fehlen einzelner Röntgenbilder, die trotz Vermerk in den Akten nicht aufzufinden waren, reduzierte noch einmal die endgültige Patientenzahl.

Die Mehrzahl der OPGs fertigten Mitarbeiter der Röntgenabteilung der Westdeutschen Kieferklinik mit Programm 1 des Geräts Orthophos CD¹ an. Die Filmgröße betrug einheitlich 15x30 cm. Die Röntgenfilme Dentus Ortholux² wurden mit Verstärkerfolien Agfa Regular versehen, die der Empfindlichkeitsklasse 400 angehören.

Bei erwachsenen Patienten fanden Folien namens Agfa Medium der Empfindlichkeitsklasse 200 Anwendung.

Die Statur der Patienten bestimmte die Röhrenspannung zwischen den Grenzwerten 62 kV und 90 kV. Die Belichtungszeit betrug stets 14,1 Sekunden, entsprechend der Umdrehungszeit des Röntgengerätes.

Die Patienten konnten mittels Lichtvisier und Kopfstütze bezogen auf Mittellinie und Frankfurter Horizontale zumeist korrekt positioniert werden. Der Patient trug dabei eine Strahlenschutzschürze und stand in Wasserschuhhaltung, so dass er den Nacken überstreckte. Die Zunge lag während der Aufnahme am Gaumen.

Durch die Möglichkeit alio loco angefertigte OPGs in der Westdeutschen Kieferklinik zu kopieren, konnten sie dort sogleich archiviert werden. Zur Anfertigung dieser Kopien wurde ein Röntgenbildkopierer³ und entsprechende Filme⁴ verwendet.

Regelmäßige Konstanzprüfungen und Wartungsmaßnahmen sowie strikte Einhaltung der Röntgenverordnung und Strahlenschutzbestimmungen sorgten für Erhaltung der Qualität der Röntgenbilder und für die Sicherheit von Personal und Patienten.

4.3. Vorgehensweise zur Datenerhebung

Zunächst wurden die Informationen in einfachen, vordruckten Tabellen zu Papier gebracht.

Für die digitale Speicherung und einen geringen Teil der Verarbeitung der gesammelten Daten wurde ein Tabellenkalkulationsprogramm gewählt.

¹: Orthophos CD der Firma Siemens, bzw. Sirona Dental Systems, Bensheim

²: Dentus Ortholux der Firma Agfa Deutschland Vertriebsgesellschaft mbH&Cie. KG, Köln

³: Röntgenbildkopierer BXR MK II Radiograph Duplicator Printer der Firma Blu-Ray Incorporated (Essex, Connecticut, U.S.A.)

⁴: Filme der Firma Kodak GmbH (Stuttgart) namens Duplicating/RA Dental Film

Der Versuch, alle Fälle in einer einzigen Tabelle unterzubringen, führte zu unbeabsichtigter Unübersichtlichkeit. Deshalb erhielt die Einzeldarstellung aller 81 Patienten auf je einem Blatt der Arbeitsmappe des Programms den Vorzug.

4.3.1 Persönliche Angaben zu den Patienten:

Vor- und Nachname, Geburtstag und die Röntgennummer wurden für jeden Untersuchten festgehalten.

4.3.2 Alter:

Es gab keine Beschränkungen bezogen auf das Alter der Patienten. Im Durchschnitt betrug es 12,8 Jahre mit einem Minimum von 8,6 Jahren und einem Maximum von 27,6 Jahren.

4.3.3 Geschlecht:

Jeder Zahn bekam einen Wert zugeordnet, der dem Geschlecht des Patienten entsprach. Den Wert „1“ erhielten Zähne von männlichen und „2“ Zähne von weiblichen Patienten. Spätere Analysen bezogen sich also auf die Zähne, denen ein Geschlecht zugeordnet war.

Der Anteil der männlichen Patienten belief sich auf 32 (39,5 %), der der weiblichen Patienten auf 49 (60,5 %).

4.3.4 Extraktionsfall / kein Extraktionsfall:

Ähnlich verschlüsselten sich die Extraktionsfälle und Non-Extraktionsfälle. Den Wert „1“ bekamen Zähne, sobald im zugehörigen Kiefer mindestens ein Zahn extrahiert wurde oder mindestens eine Aplasie vorlag, die einen Lückenschluss nach sich zog. Gab es keine Extraktionen oder Aplasien im entsprechenden Kiefer, so erhielt der Zahn den Wert „0“.

4.3.5 Datum pro OPG:

Den Entstehungsdaten der drei OPGs wurden die zeitlich aufeinanderfolgenden Namen T1, T2 und T3 zugeordnet. Daneben wurden die entsprechenden Datumsangaben notiert.

Zur Kontrolle wurde noch vermerkt, welcher Abstand von T2 in Monaten und Tagen zu T1 bestand.

4.3.6 Bogenwechsel, Drahtlegierungen und Drahtdurchmesser:

Zu jedem Fall wurden Beginn und Ende der Therapie mit festsitzender Apparatur und das Datum eines jeden Bogenwechsels angegeben. Für jeden Kiefer gab es eine separate Zeile, falls Ober- und Unterkiefer voneinander abwichen.

Dazugehörige Durchmesser und Legierungen der verwandten Drähte wurden dementsprechend eingetragen.

4.3.7 Auffälligkeiten:

Eventuelle Besonderheiten, wie zum Beispiel Aplasien oder Mesiodentes, fanden zur besseren Auffindung ihren Platz im unteren Teil der Tabelle.

Diese Informationen (Punkt 4.3.1 bis 4.3.7) ergaben sich aus den Eintragungen in den Behandlungskarten der Patienten.

Zum Teil fehlten Angaben über die Beschaffenheit der einligierten Drähte. Dies zog jedoch keine Konsequenzen für die Untersuchung nach sich, da lediglich die Anzahl der Bogenwechsel Berücksichtigung fand.

4.4 Berechnungen

4.4.1 Alter:

Durch Tabellenkalkulationsoptionen ließ sich das Alter der Patienten aus deren Geburtsdatum und dem Datum der zeitlich gesehen ersten untersuchten Röntgenaufnahme (T1) mit einer Funktion errechnen. Bei zwei Patienten wurden Geburtsdatum und Beginn der kieferorthopädischen Therapie zugrunde gelegt, weil kein oder kein genaues Datum auf dem alio loco angefertigten Röntgenbild, beziehungsweise auf der T1-Aufnahme des Hauses, zu erkennen war.

Die dadurch ermittelten Tage dividierte ein üblicher Taschenrechner durch 360, so dass sich eine Jahreszahl ableitete, die somit das Alter der Patienten angab.

4.4.2 Bogenwechsel:

Die Anzahl der Bogenwechsel wurde anhand der Eintragungen addiert.

4.4.3 Behandlungsdauer:

Die Behandlungsdauer in Tagen ergab sich aus den Daten für den Beginn der Therapie mit festsitzender Apparatur und der Multibandentfernung. Hier musste darauf geachtet werden, dass einige Zähne oder die beiden Kiefer eventuell verschiedene Therapiezeiten erkennen ließen. Dies wurde gegebenenfalls separat notiert.

Die Berechnung dazu konnte die gleiche Funktion des Tabellenkalkulationsprogramms übernehmen, die auch bei der Altersbestimmung zum Tragen kam.

Als geringste Behandlungsdauer ergaben sich 261 Tage, während die längste Therapie bei 2370 Tagen lag. Die durchschnittliche Therapiedauer betrug etwa 642 Tage.

4.5 Auswertungen pro Zahn

An einem Röntgenbetrachtungsgerät¹ konnten die einzelnen OPGs beurteilt werden. Die Analyse führte stets derselbe Untersucher durch.

4.5.1 Wurzelformen:

Sechs Wurzelformen konnten unterschieden und den aufgestellten Werten zugeordnet werden (siehe Tabelle 1 und Grafik 1).

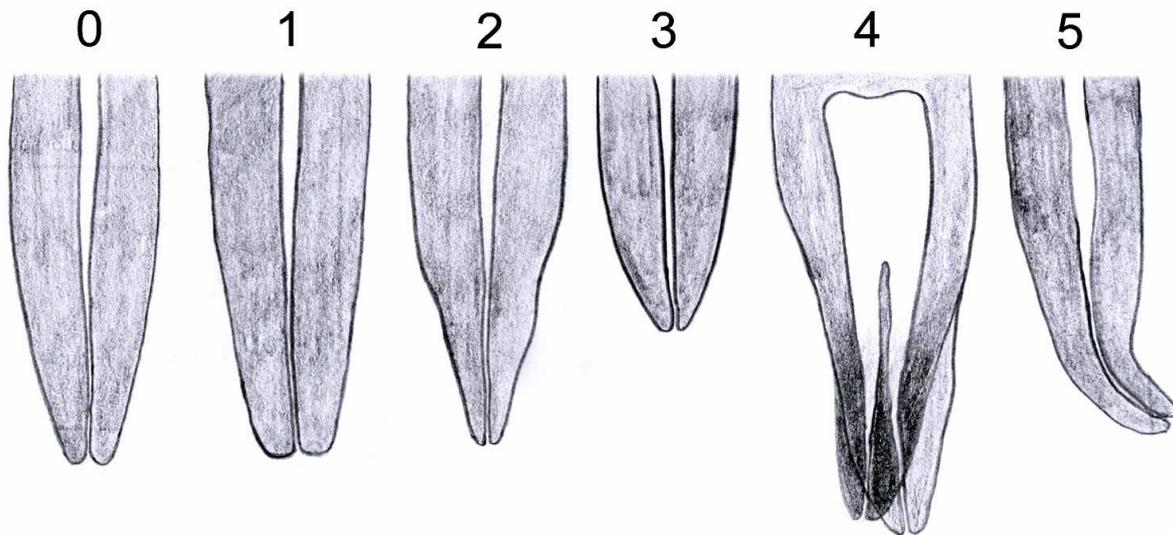
Wurzelformen und zugehörige Werte

Tabelle 1

Wert	Wurzelform
0	normal
1	stumpf
2	pipettenförmig
3	verkürzt
4	Taurodontismus
5	mit apikalem Knick

¹: Röntgenbetrachtungsgerät namens Rex der Firma Messinstrumentebau GmbH (Erlangen)

Schema zu den Wurzelformen



Grafik 1: verschiedene Wurzelformen:

0: normale Wurzel; 1: stumpfe Wurzel; 2: pipettenförmige Wurzel;
3: verkürzte Wurzel; 4: Taurodontismus; 5: Wurzel mit apikalem Knick
(modifizierte und erweiterte Skizze basierend auf einer Vorlage von LEVANDER,
MALMGREN, 1988 [63])

Repräsentative Beispiele der Wurzelformen: (Bild 1-7)

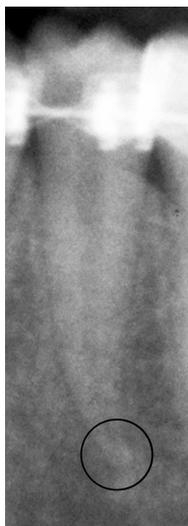


Bild 1: Zahn 35:
normale Wurzelform

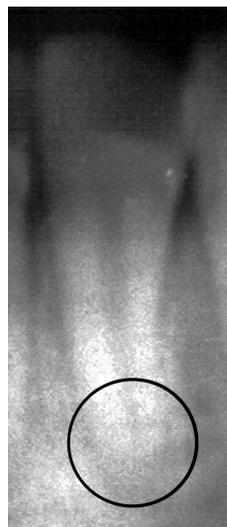


Bild 2: Zahn 32:
stumpfe Wurzel



Bild 3: Zahn 24:
pipettenförmige Wurzel



Bild 4: Zahn 36: pipettenförmige Wurzel bei einem Molaren

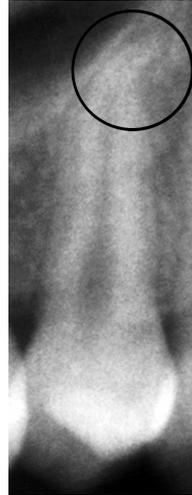


Bild 5: Zahn 15: Wurzel mit apikalem Knick

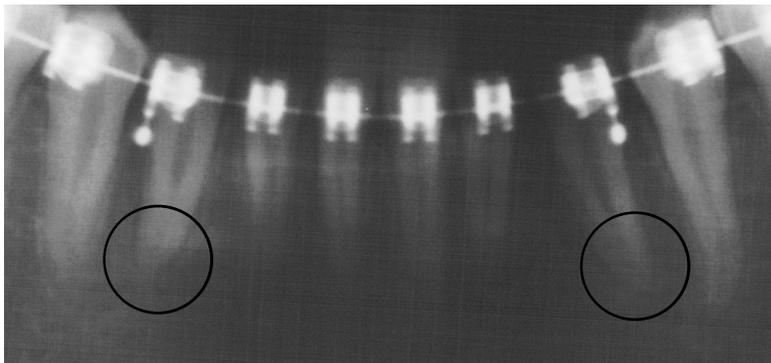


Bild 6: Zähne 33 und 43: verkürzte Wurzeln (vergleiche Wurzellänge der Prämolaren)

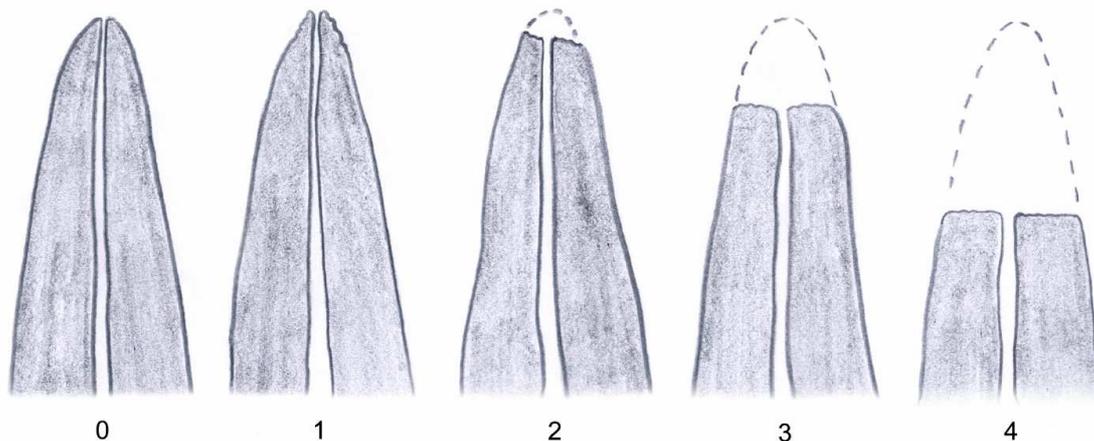


Bild 7: Zähne 16 und 26: Taurodontismus

4.5.2 Grade der Wurzelresorptionen:

Die Wurzelresorptionsgrade klassifizierten sich in Anlehnung an das Verfahren von LEVANDER und MALMGREN [63] (siehe Grafik 2).

Schema der diversen Wurzelresorptionsgrade



Grafik 2: Grade zur quantitativen Analyse von Wurzelresorptionen

- 0: Grad 0: keine Resorptionen;
- 1: Grad 1: unregelmäßige Wurzelspitze;
- 2: Grad 2: geringe Wurzelresorptionen: weniger als 2 mm;
- 3: Grad 3: starke Wurzelresorptionen: 2 mm bis zu einem Drittel der ursprünglichen Wurzellänge;
- 4: Grad 4: extreme Wurzelresorptionen von mehr als einem Drittel der Wurzellänge (umgezeichnet nach LEVANDER, MALMGREN 1988 [63])

Eine Spalte in jeder Patiententabelle listet die einzelnen zu untersuchenden Zähne der Reihenfolge nach auf. Zu jedem Zahn wurden die Grade der Wurzelresorptionen zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3 sowie die Wurzelformen niedergeschrieben. Der Untersucher hielt sich dabei stets die Schemata (siehe Grafik 1 und 2) vor Augen. Zähne mit offenem Foramen apicale, das auf ein nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum hindeutet, erhielten Grad Null als Bewertung bezüglich der Resorptionen.

Eine Lupe diente zur genaueren Betrachtung bei fragwürdigen Zähnen oder aufgehellten Teilen des Röntgenbildes.

Nach der schriftlichen Fixierung wurden die gewonnenen Daten in eine entsprechende Tabelle übertragen und gespeichert.

Eine komplette Tabelle enthält somit alle notwendigen Daten für einen Patienten (Beispiel: Tabelle 2).

Tabelle 2: Beispiel einer Tabelle für einen Patienten mit komplettem Datensatz

Patient	Zahn	T1	T2	T3	Wurzelform	sex	Extraktionsfall
34	16	0	0	0	0	2	1
34	15	0	0	/	5	2	1
34	14						
34	13	0	0	0	0	2	1
34	12	2	2	2	0	2	1
34	11	/	2	/	0	2	1
34	21	/	/	1	0	2	1
34	22	2	2	2	0	2	1
34	23	/	0	0	0	2	1
34	24						
34	25	/	0	1	0	2	1
34	26	0	/	2	0	2	1
34	36	1	1	0	0	2	1
34	35	0	0	0	0	2	1
34	34						
34	33	0	/	1	0	2	1
34	32	0	1	2	0	2	1
34	31	/	0	0	0	2	1
34	41	0	0	0	0	2	1
34	42	0	1	1	5	2	1
34	43	/	0	0	0	2	1
34	44						
34	45	0	0	0	5	2	1
34	46	0	0	0	0	2	1
34							14,24,34,44-ex
34	Datum	Röntgen	Drahtdurchmesser	Drahtlegierung	Dauer (Tage)		
34							
34	03.06.1996	OK-Brackets	14	Sentalloy	138	OK	
34	26.08.1996	UK-Brackets	14	Sentalloy	55	UK	
34	21.10.1996		16	Sentalloy	48	UK	112 für OK
34	09.12.1996	UK	16x16	Sentalloy	216	UK	
34	13.02.1997	OK	16x16	Stahl	152	OK	
34	15.07.1997	MB-ex			402	OK	
34					319	UK	
34	16.10.1995	T1					
34	13.01.1997	T2	OK: 7Mon+10Tage	UK: 4 Mon + 17 Tage			
34	28.06.1999	T3					
34							
34	Nachname	Vorname	*Geburtsdatum		Bogenwechsel		
34				OK	2		
34	Rö: 501/92		14,24,34,44-ex	UK	2		

4.5.3 Fehlende Werte:

Fehlende Werte ergaben sich bei Zähnen, deren Wurzeln oder deren Apizes aus der röntgenologisch definierten Schicht herausragten und somit unscharf zur Darstellung kamen.

Ein solches Schichtartefakt wird gekennzeichnet durch einen nicht durchgängig verfolgbaren Parodontalspalt (veranschaulicht in Bild 8).

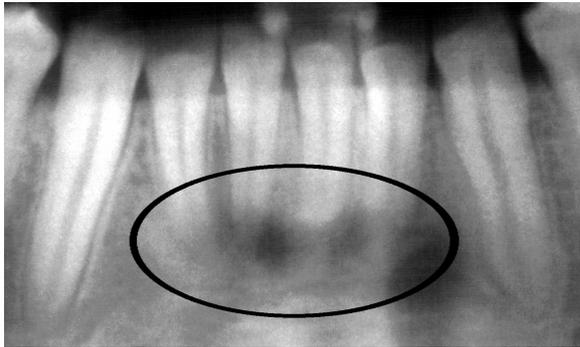


Bild 8: Schichtartefakt bei den Zähnen 42 bis 32

Diese Unschärfen traten gehäuft im Frontzahnbereich des Ober- und Unterkiefers und bei mehrwurzligen Zähnen auf.

Oberkiefermolaren zeigten häufiger eine unklare Abzeichnung der Wurzeln als die Molaren des Unterkiefers. Es ging jedoch nur dann ein fehlender Wert daraus hervor, wenn keine der Wurzelspitzen des jeweiligen Molaren zu erkennen war.

4.5.4 Bildbearbeitung:

Fünfzehn ausgewählte OPGs scannte der Durchlichtscanner der Firma Hewlett-Packard GmbH (Böblingen) namens HP ScanJet 6100 C/T mit einer Auflösung von 400 dpi (dots per inch) ein.

Daraus filterte der Untersucher einige Beispiele zu den verschiedenen Wurzelformen (siehe Bilder 1-7), Resorptionsgraden (siehe Bild 9-18 in der Diskussion) und ein Schichtartefakt (siehe Bild 8) heraus. Hierbei kam das Grafikprogramm Photoshop® Version 7.0 der Firma Adobe® Systems GmbH (Unterschleißheim) zur Anwendung.

Die Ausschnitte konnten mittels Gamma-Verschiebung und automatischer Umverteilung der Tonwerte weiterbearbeitet und somit optisch kontrastreicher gestaltet werden.

4.6 Statistik

4.6.1 Verwendete Software:

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Programm SPSS für Windows (Statistical Package for the Social Sciences) Version 10.0.5 (<http://www.spss.com>) unter Befolgung der Ratschläge und Erläuterungen des zugehörigen Buches [19] vorgenommen.

Die entsprechenden Daten konnten via Kopieren und Einfügen von der Ursprungs- in die SPSS-Tabelle übertragen werden. Nachträglich erforderte dies aber eine Überarbeitung der Variablen und deren Eigenschaften.

Für sämtliche Signifikanzniveaus wurde als Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,05$ gewählt.

4.6.2 Variablendefinitionen:

Patientennummer, Alter, Behandlungsdauer in Tagen und die Anzahl der Bogenwechsel bildeten metrische Variablen.

Nominal skalierte Variablen stellten die Variable zur Bezeichnung der Zähne nach dem internationalen Zahnschema, die Geschlechtsvariable, die Wurzelformvariable und die Variable zur Unterscheidung von Extraktions- und Non-Extraktionsfällen dar.

Eine ordinale Skalierung erhielten die kategorischen Variablen für die Wurzelresorptionsgrade und Variablen für die verschiedenen aus den gerade genannten Stammvariablen geschaffenen Kategorien.

4.6.3 Statistische Tests:

4.6.3.1 Prüfung auf Normalverteilung:

Zunächst stellte sich durch Anwendung des Kolmogorov-Smirnov-Tests heraus, ob es sich bei den folgenden Parametern um eine Normalverteilung handelte:

- Wurzelresorptionsgrade zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3
- Wurzelform
- Geschlecht
- Extraktions-/Non-Extraktionsfall
- Behandlungsdauer
- Alter
- Anzahl der Bogenwechsel

4.6.3.1.1 Mittelwerte und Häufigkeiten:

Mittelwerte und Häufigkeitsverteilungen zu den Wurzelresorptionen zu den drei Zeitpunkten, zu den Wurzelformen, zur Verteilung der Geschlechter, zu den Extraktions- und Non-Extraktionsfällen (mit und ohne Aplasien), zum Alter, zur Behandlungsdauer und zu den Bogenwechseln gaben deskriptive Statistiken wieder.

4.6.3.2 Geschlechtsunterschiede:

Der Mann-Whitney-U-Test für zwei unabhängige Stichproben diente dazu, herauszufinden, ob Unterschiede zwischen den Geschlechtern, bezogen auf die diversen Variablen, vorlagen.

4.6.3.3 Verteilung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle:

Durch den Chi-Quadrat-Test verdeutlichte sich die Verteilung der männlichen und weiblichen Patienten auf die Extraktions- und Non-Extraktionsfälle.

4.6.3.3.1 Vergleich der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle:

Mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests und den zugehörigen Mittelwerten konnte nachvollzogen werden, wie sich die Behandlungsdauer, bezogen auf die Extraktions- und Non-Extraktionsfälle, verhielt.

4.6.3.4 Allgemeiner Wurzelresorptionsvergleich:

Den Vergleich der Wurzelresorptionen zwischen T1 und T2, zwischen T1 und T3 und zwischen T2 und T3 vollzog der Wilcoxon-Test, da es sich hierbei um abhängige Variablen handelte.

4.6.3.5 Wurzelformvergleich:

Weiterhin stellte der Mann-Whitney-U-Test fest, ob sich die verschiedenen abweichenden Wurzelformen bei den Resorptionen von den normalen Wurzeln signifikant unterschieden.

4.6.3.6 Analyse der einzelnen Zähne:

4.6.3.6.1 Untersuchung auf Normalverteilung:

Die Analyse der einzelnen Zähne verlangte den Kolmogorov-Smirnov-Test, um zu erfahren, ob die Resorptionen bei dem jeweiligen Zahn normalverteilt waren.

4.6.3.6.2 Vergleich der Wurzelresorptionen zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3:

Der Wilcoxon-Test wurde herangezogen, um die Wurzelresorptionen zwischen den drei Zeitpunkten zu vergleichen.

4.6.3.6.3 Behandlungsdauer:

Die Untersuchung schloss auch den Mann-Whitney-U-Test ein, der zwischen langer und kurzer Behandlungsdauer verglich.

Dazu wurde die Variable der Behandlungsdauer in zwei Gruppen kategorisiert. In der ersten Kategorie befanden sich Zähne mit einer Therapiedauer von 261 bis 610 Tagen und in der zweiten solche, die 611 bis 2370 Tage behandelt wurden.

Notizen über Besonderheiten bei Zähnen mit auffälligen Ergebnissen ergänzten die Statistik.

4.6.3.6.4 Vergleich der Wurzelresorption einzelner Zähne gegenüber den restlichen Zähnen:

Um festzustellen, welche Zähne besonders stark oder aber kaum von Wurzelresorptionen befallen wurden, errechnete das SPSS-Programm den Mittelwert der Resorptionen bei dem zu untersuchenden Zahn und verglich diesen mittels Mann-Whitney-U-Test mit dem Mittelwert der restlichen Zähne. Dieses Prozedere erfuhr jeder Zahn einzeln.

4.6.3.7 Vergleich der Wurzelresorptionen verschiedener Zahngruppierungen:

Des Weiteren fand der Mann-Whitney-U-Test Anwendung in der Untersuchung der Wurzelresorptionen zu den drei Zeitpunkten bei verschiedenen Zahngruppen. Miteinander verglichen wurden Ober- und Unterkiefer, rechte und linke Seite und die einzelnen Quadranten in allen sechs möglichen Kombinationen.

4.6.3.8 Bogenwechsel:

Um Wurzelresorptionsunterschiede bei unterschiedlich häufigen Bogenwechseln zu überprüfen, wertete der Mann-Whitney-U-Test jeweils Ober- und Unterkiefer, lange und kurze Behandlungsdauer, die Geschlechter und die Extraktions- und Non-Extraktionsfälle aus.

Mit Hilfe der Mittelwerte konnte ermittelt werden, wo mehr oder weniger Bogenwechsel auftraten.

4.6.3.8.1 Vergleich der Wurzelresorptionen bezogen auf die Anzahl der Bogenwechsel:

Außerdem ergab sich eine Kategorie mit durchschnittlich 0 bis 5,5 Bogenwechseln während der gesamten Therapie und eine andere mit 5,51 bis 11 Bogenwechseln pro Behandlung und Patient.

Diese Gruppen wurden mittels Mann-Whitney-U-Test und Mittelwertbestimmung bezüglich der Schwere, beziehungsweise des Vorkommens von Wurzelresorptionen, getestet.

4.6.3.8.2 Vergleich diverser Einteilungen von Zähnen:

Zusätzlich kategorisierte SPSS die Zähne, je nach Anzahl der Bogenwechsel, in vier, fünf, sechs und sieben Gruppen. Somit konnten von diesen Gruppierungen jeweils die niedrigste und höchste Kategorie im Mann-Whitney-U-Test bezogen auf die Wurzelresorptionen verglichen werden.

4.6.3.9 Behandlungsdauer:

4.6.3.9.1 Kurze und lange Therapien:

Eine Arbeitsweise teilte die Zähne durch den Mittelwert der Behandlungsdauer (642,42 Tage) in zwei Gruppen auf. Eine Einheit enthielt Zähne, bei denen eine kürzere Behandlung stattfand und die zweite Gruppe die Zähne, die länger therapiert wurden (siehe Tabelle 3).

Für beide dieser Gruppen wurden separat alle drei Paare aus T1, T2 und T3 nach Wilcoxon getestet.

Kategorieneinteilung und prozentuale Verteilung der Zähne

Tabelle 3

Kategorie	Minimum	Maximum	Prozent der Zähne
1	261 Tage	642,42 Tage	50,6 %
2	642,42 Tage	2370 Tage	49,4 %

4.6.3.9.2 Vergleich zwischen langen und kurzen Therapiezeiten:

Diese Unterteilung durch den Mittelwert der Behandlungsdauer erschien ebenfalls sinnvoll, um die zwei Gruppen dann im Mann-Whitney-U-Test gegenüberzustellen.

Für eine in fünf Kategorien aufgeteilte Therapiezeit stellten die jeweils höchste und niedrigste Kategorie die Basis dar, um ebenfalls den Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich heranzuziehen.

4.6.3.10 Vergleich verschiedener Patientengruppen:

4.6.3.10.1 Gruppierung durch das Vorhandensein von Resorptionen bei T2:

Eine Aufteilung der Patienten entschied sich über das Vorhandensein von Resorptionen.

Die erste Gruppe enthielt nur Patienten ohne jegliche Wurzelresorptionen zum Zeitpunkt T2, während die zweite Gruppe Patienten mit allen Resorptionsgraden über Null zu T2 aufwies.

Hier zeigte der Wilcoxon-Test ebenfalls, ob Resorptionsunterschiede zwischen den Zeitpunkten T2 und T3 bestanden.

Die Mittelwerte zu T2 und T3 erläuterten dann, wo vermehrte Resorptionen auftraten.

4.6.3.10.2 Aufteilung der Patienten nach dem Mittelwert von T2:

Zwei weitere Gruppen von Patienten resultierten aus der Aufspaltung durch den Mittelwert von T2, so dass in einer Gruppe nur wenige oder keine Resorptionen vorlagen, während in der anderen jedoch einige oder starke Resorptionsvorgänge zu beobachten waren.

Bei diesen Gruppen verglich der Wilcoxon-Test die Wurzelresorptionen bei T2 und T3. Ergänzend wurden die Mittelwerte pro Gruppe festgehalten, um zu sehen, zu welchem Zeitpunkt mehr oder weniger Resorptionen auftraten.

4.6.3.10.3 Strukturierung der Patienten nach dem Mittelwert von T3:

Ähnlich konnten zwei Gruppen analysiert werden, die sich nach dem Mittelwert der Resorptionsgrade bei T3 aufspalteten. Die Mittelwertbestimmung für T2 und T3 in jeder Gruppe und der Wilcoxon-Test für das Gegenüberstellen von T2 und T3 in den beiden Gruppen vermittelten auch hier die wichtigsten Ergebnisse bezüglich vermehrten oder reduzierten Wurzelresorptionen.

4.7 Kontrolluntersuchung und Fehlerabschätzung

4.7.1 Auswahl der Kontrolldaten:

Mit Hilfe des Zufalls wurde von 25 der insgesamt 81 Patienten je ein Röntgenbild für die Kontrollanalyse herangezogen. Falls solche Patienten getroffen wurden, die nur einzelne Zähne zur Kontrolluntersuchung hätten beitragen können, fiel die Wahl auf die nächst höhere Patientennummer.

Damit die drei Röntgenzeitpunkte sich gleichmäßig verteilten, sollte T1 neun Mal, T2 acht Mal und T3 ebenfalls acht Mal vorkommen. Dementsprechend wurden diese Röntgenzeitpunkte willkürlich auf die 25 Patienten verteilt.

Diese 25 ausgesuchten Röntgenbilder wurden im Mindestabstand von einer Woche nach der letzten Untersuchung unter gleichen Bedingungen und durch denselben Untersucher erneut auf Wurzelresorptionen überprüft.

Insgesamt unterlagen 485 Zähne der Kontrolluntersuchung. Dies entspricht einem Anteil an der Gesamtanzahl der erstuntersuchten Zähne von 31,53 %.

Die Ergebnisse der Zweituntersuchung wurden zunächst in separaten Tabellen schriftlich fixiert und alsbald als Dokument des Tabellenkalkulationsprogramms gesichert.

4.7.2 Statistische Auswertung der Kontrollanalyse:

4.7.2.1 Prozentuale Übereinstimmung der Analysen:

Eine erste grobe Übersicht über die Ergebnisabweichung lieferte SPSS durch die prozentuale Berechnung der übereinstimmenden, fehlenden und differierenden Werte. Nach Abzug der fehlenden Werte, konnte auf gültige Prozente umgerechnet werden.

Fehlende Werte wurden angegeben, wenn in einer der beiden Untersuchungen ein fehlender Wert ersichtlich war.

4.7.2.2 Wilcoxon-Test zwischen erster und Kontrolluntersuchung:

SPSS stellte nun die Daten der ersten und die der Kontrollanalyse nebeneinander und führte zum Vergleich sowohl für jeden einzelnen Patienten, als auch für alle Zähne zusammen den Wilcoxon-Test durch.

4.7.2.3 Überprüfung nach Dahlberg:

Mittels der Dahlberg-Formel wurde der Methodenfehler eruiert.

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

σ : Methodenfehler

d: Differenz zwischen zwei Werten

n: Anzahl der untersuchten Zähne

[DAHLBERG, 1940 [27]]

5. Ergebnisse

5.1 Prüfung auf Normalverteilung

Der Kolmogorov-Smirnov-Test stellt klar, dass bei der Wurzelform, der Behandlungsdauer, den Bogenwechseln und den Vorkommen der Wurzelresorptionen bei T1, T2 und T3 keine Normalverteilungen vorliegen. Lediglich das Alter ist normalverteilt.

5.2 Geschlechtsunterschiede

Der nun folgende Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben, deckt Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Patienten auf. Er zeigt, dass nur die Extraktions- und Non-Extraktionsfälle signifikant (***) verschieden auf die Geschlechter verteilt sind.

Zur Kontrolle wird der Chi-Quadrat-Test herangezogen. Dabei stellt sich heraus, dass ein signifikanter (***) Unterschied zwischen der Anzahl der männlichen und der weiblichen Patienten und auch zwischen den Extraktions- und den Non-Extraktionsfällen besteht.

Des Weiteren errechnet der Chi-Quadrat-Test sowohl bei den Extraktionsfällen einen signifikanten (***) Unterschied in der Verteilung von männlichen und weiblichen Patienten, als auch bei den Non-Extraktionsfällen. Dort liegt das Signifikanzniveau bei $p < 0,1$ (**).

Die prozentualen Angaben (siehe Tabelle 4) zeigen ein Überwiegen der weiblichen Patienten in beiden Fällen.

Verteilung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle auf die Geschlechter

Tabelle 4

Geschlecht	Extraktionsfälle	Non-Extraktionsfälle
männlich	27,5 %	45,2 %
weiblich	72,5 %	54,8 %

5.3 Verteilung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle

An der Westdeutschen Kieferklinik, Düsseldorf, werden laut dieser Studie in 33,3 % der Fälle Extraktionen von bleibenden Zähnen vorgenommen. Darin enthalten sind allerdings auch Aplasien. Der prozentuale Wert bezieht sich jeweils auf die untersuchten Kiefer. Durch Herausrechnen der Aplasien, sinkt der Wert auf 28,7 % (siehe Diagramm 1).

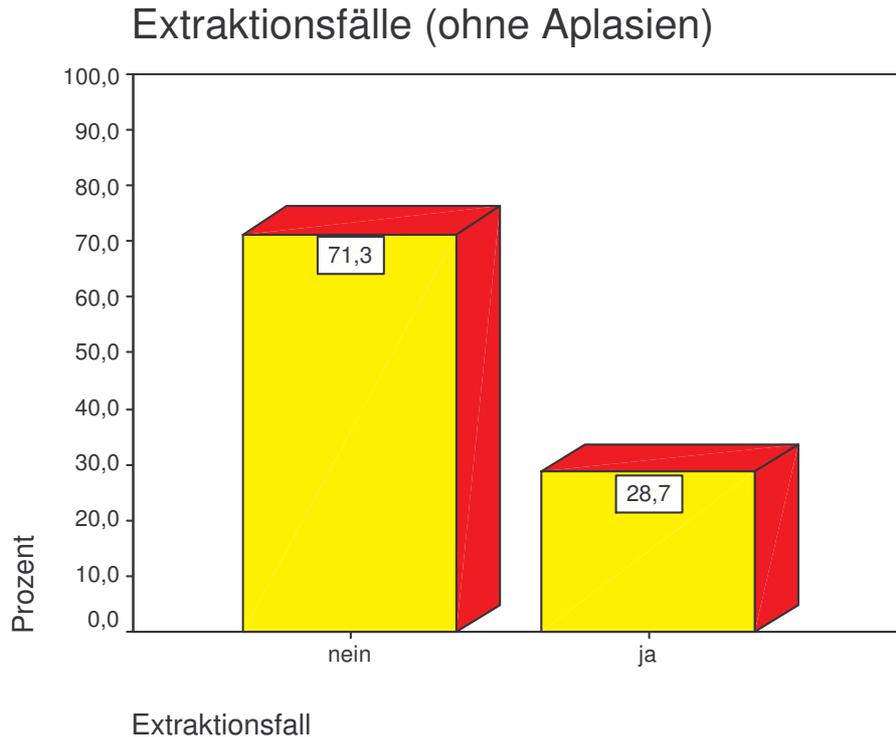


Diagramm 1: Balkendiagramm zur prozentualen Verteilung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle in der Poliklinik für Kieferorthopädie der Westdeutschen Kieferklinik, Düsseldorf

5.3.1 Vergleich der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle:

In der Gegenüberstellung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle durch den Mann-Whitney-U-Test zeigt sich nur bei der Behandlungsdauer und beim Geschlecht ein signifikanter (***) Unterschied.

Der Chi-Quadrat-Test bestätigt eine signifikant (***) ungleiche Verteilung der kurzen und langen Behandlungen auf die Extraktions- und Non-Extraktionsfälle. Die Mittelwerte (siehe Tabelle 5) bezeugen, dass mehr längere Therapien bei den Extraktionsfällen und mehr kürzere Behandlungen bei den Non-Extraktionsfällen vorkommen.

Mittelwerte der Therapielänge für Extraktions- und Non-Extraktionsfälle

Tabelle 5

	Mittelwert der Behandlungsdauer
Extraktionsfall	818 Tage/27 Monate
kein Extraktionsfall	555 Tage/18 Monate
gesamt	642 Tage/21 Monate

5.4 Allgemeiner Wurzelresorptionsvergleich

Werden alle in Frage kommenden Paare aus T1, T2 und T3 dem Wilcoxon-Test unterzogen, so konstatiert dieser signifikante (***) Unterschiede zwischen T1 und T2, zwischen T2 und T3 und zwischen T1 und T3.

Mittelwerte der Wurzelresorptionsgrade zu den drei untersuchten Zeitpunkten

Tabelle 6

Zeitpunkt	Mittelwert der Wurzelresorptionsgrade
T1	0,0036
T2	0,42
T3	0,47

Durch die Mittelwerte (siehe Tabelle 6) zeigt sich, dass bei T3 mehr Resorptionsvorgänge als bei T1 und T2 vorliegen und dass sich bei T2 mehr Resorptionsvorgänge als bei T1 abspielen.

5.5 Wurzelformvergleich

Die einzelnen Wurzelformen sind unterschiedlich häufig vertreten. Überwiegend werden normale Wurzelformen beobachtet (siehe Diagramm 2).

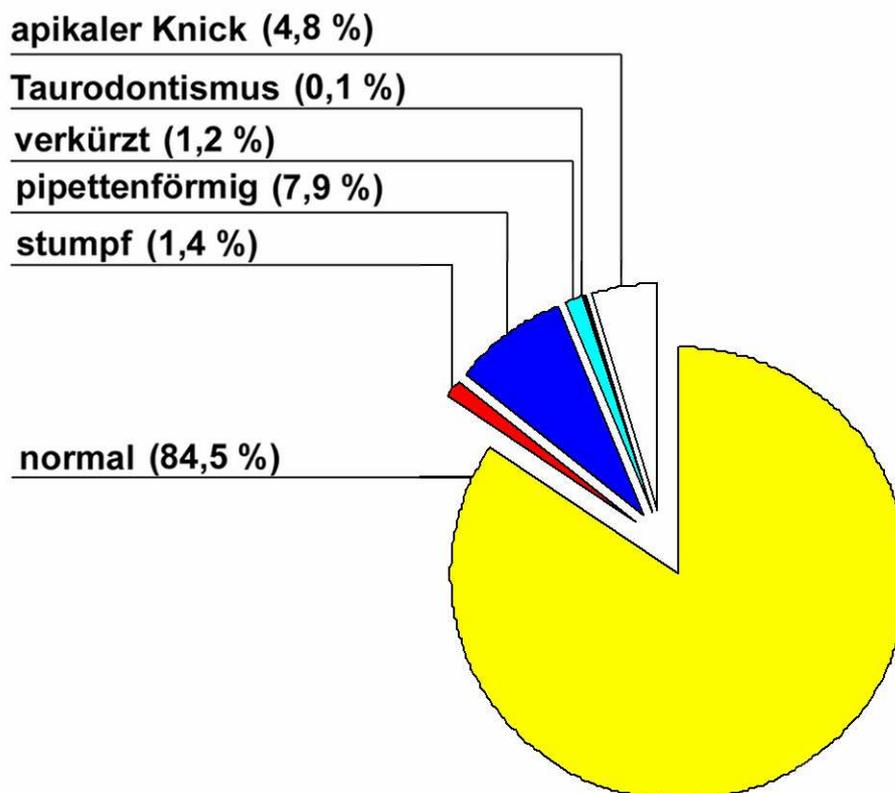


Diagramm 2: Kreisdiagramm zur Verteilung der Wurzelformen in Prozent

Mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests werden jeweils Zähne mit normaler Wurzel gegen solche mit abweichenden Wurzelformen getestet.

Es wird der Mittelwert der Wurzelresorptionsgrade zu den einzelnen Zeitpunkten T1, T2 und T3 der verschiedenen Wurzelformen miteinander verglichen.

Bei der Gegenüberstellung von stumpfen und normalen Wurzeln wird kein signifikanter Unterschied angezeigt.

Dasselbe Bild manifestiert sich sowohl beim Vergleich der normalen Wurzeln mit den pipettenförmigen, als auch mit den verkürzten Wurzeln, als auch mit solchen, die einen apikalen Knick besitzen.

Die Ausnahme bilden Wurzeln mit Taurodontismus. Bei T2 und bei T3 offenbaren sich jeweils signifikante (*) Unterschiede.

Dies bedeutet unter Beachtung der Mittelwerte (siehe Tabelle 7) eine erhöhte Wurzelresorptionsrate bei Zähnen mit Taurodontismus.

Mittelwerte der Wurzelresorptionsgrade bei Taurodontismus und normaler Wurzel zu den Zeitpunkten T2 und T3

Tabelle 7

Wurzelform:	Taurodontismus	normale Wurzel
Mittelwert zum Zeitpunkt T2	1,50	0,42
Mittelwert zum Zeitpunkt T3	1,50	0,48

5.6 Analyse der einzelnen Zähne

5.6.1 Untersuchung auf Normalverteilung:

Der Kolmogorov-Smirnov-Test ermittelt speziell zu jedem Zahn, dass die Wurzelresorptionen zu den drei Zeitpunkten, die Wurzelformen, die Verteilung der Geschlechter und der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle nicht der Normalverteilung entsprechen.

Lediglich die Behandlungsdauer pro Zahn zeigt sich normalverteilt.

5.6.2 Vergleich der Wurzelresorptionen zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3:

Der Wilcoxon-Test gibt Aufschluss darüber, ob der Vergleich der Wurzelresorptionsgrade zu den einzelnen Zeitpunkten signifikante Unterschiede aufzeigt.

Bei den Zähnen 11-16, 21, 22, 24-26, 31-34, 36 und 41, 43-46 liegen signifikante Unterschiede zwischen T1 und T2 und zwischen T1 und T3 vor.

Gegenüber T1 überwiegt jeweils die Resorptionsrate bei T2 und T3.

T3 dagegen differiert nicht signifikant von T2.

Zahn 23 und Zahn 35 zeigen signifikante Unterschiede zwischen T1-T2, T1-T3 und auch zwischen T2-T3. Die Mittelwerte verteilen sich in der Art, dass T1 weniger Resorptionen als T2 und T3 aufweist, bei T3 jedoch mehr Resorptionen zu erkennen sind als bei T2.

Einzig bei Zahn 42 tauchen laut Wilcoxon-Test keine signifikanten Unterschiede zwischen T1-T2, T1-T3 und T2-T3 auf.

5.6.3 Behandlungsdauer:

Um den Einfluss der Behandlungsdauer herauszufinden, stellt der Mann-Whitney-U-Test bei jedem Zahn hohe und niedrige Werte der Therapiedauer gegenüber.

Bei fast allen Zähnen stellen sich keine signifikanten Unterschiede bei T1, T2 oder T3 heraus.

Lediglich bei den Zähnen 12, 16, 22, 36 und 44 ist eine signifikante (*) Differenz bei T2 zu verzeichnen.

Die Mittelwerte der Zähne 12, 16, 22 und 36 weisen aus, dass bei längerer Behandlung weniger Resorptionen bei T2 eintreten.

Die zugehörigen Mittelwerte erklären die signifikante (*) Diskrepanz bei Zahn 44 dahingehend, dass dieser Zahn zum Zeitpunkt T2 mehr Resorptionsvorgänge bei längerer Therapie vorweist.

5.6.4 Vergleich der Wurzelresorption einzelner Zähne gegenüber den restlichen Zähnen:

Die überwiegende Anzahl der untersuchten Zähne zeigt keine signifikanten Unterschiede beim Mann-Whitney-U-Test im Hinblick auf die Wurzelresorptionen jedes einzelnen Zahnes gegenüber dem Resorptionsdurchschnitt der jeweils restlichen Zähne.

Im Folgenden werden daher nur die Zähne aufgelistet, die signifikant mehr oder weniger Resorptionen aufweisen (siehe Tabelle 8).

Vergleich der Wurzelresorptionen je eines Zahns gegenüber dem
Resorptionsdurchschnitt der restlichen Zähne:

Tabelle 8

Zahn	Signifikanzen und Mittelwerte	T1	T2	T3	Kommentar
13	Signifikanzniveau		***	***	<u>weniger</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 13		0,14	0,18	
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,44	0,49	
12	Signifikanzniveau		*		<u>mehr</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 12		0,64		
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,41		
11	Signifikanzniveau		**	*	<u>mehr</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 11		0,75	0,71	
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,41	0,46	
21	Signifikanzniveau		***	***	<u>mehr</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 21		0,85	0,87	
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,40	0,45	
22	Signifikanzniveau	*	**	***	<u>mehr</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 22	0,11	0,72	0,80	
	Mittelwert der restlichen Zähne	0,03	0,41	0,46	
23	Signifikanzniveau		**	*	<u>weniger</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 23		0,18	0,29	
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,44	0,48	
25	Signifikanzniveau		*		<u>weniger</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 25		0,23		
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,43		
34	Signifikanzniveau		**	**	<u>mehr</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 34		0,71	0,76	
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,41	0,46	
42	Signifikanzniveau		*	**	<u>weniger</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 42		0,21	0,21	
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,43	0,48	
44	Signifikanzniveau		***	**	<u>mehr</u> Resorptionen als im Durchschnitt
	Mittelwert von Zahn 44		0,74	0,72	
	Mittelwert der restlichen Zähne		0,41	0,46	

5.7 Vergleich der Wurzelresorptionen verschiedener Zahngruppierungen

5.7.1 Oberkiefer – Unterkiefer:

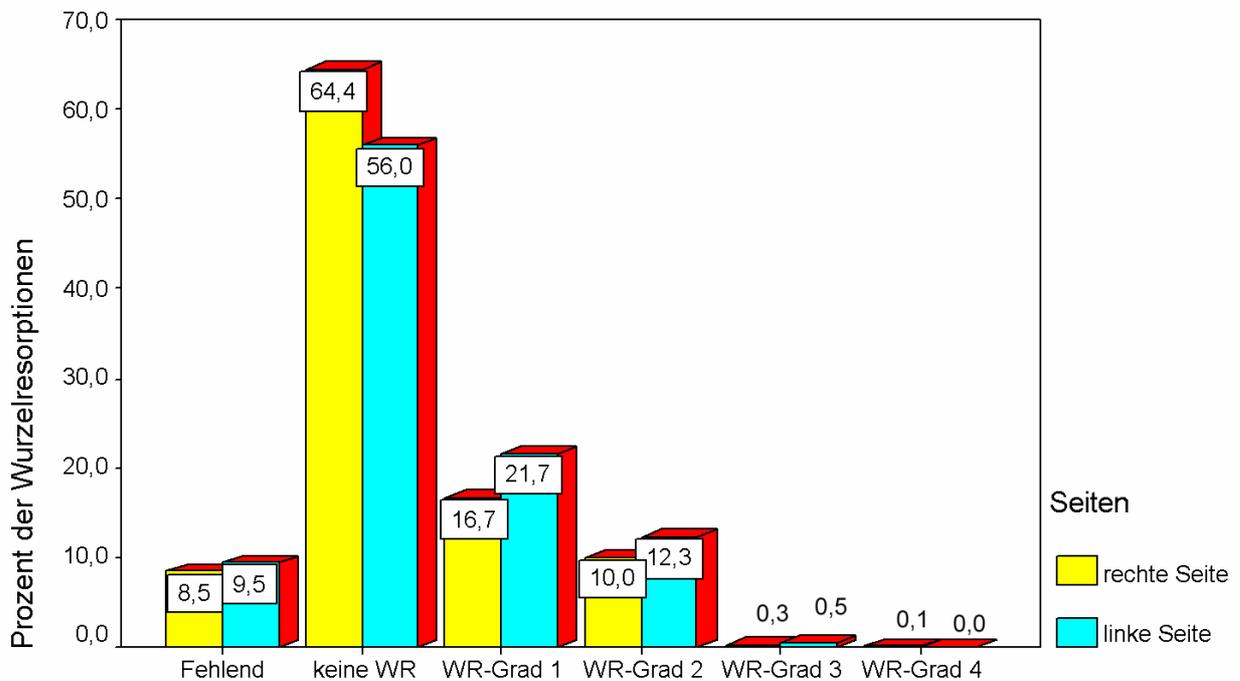
Bei der Gegenüberstellung des Ober- und Unterkiefers errechnet der Mann-Whitney-U-Test keine signifikanten Unterschiede bei T1, T2 und T3.

5.7.2 Rechte Seite – linke Seite:

Rechte und linke Seite dagegen differieren signifikant (**), jedoch nur zum Zeitpunkt T3.

Die Resorptionen treten links in ausgeprägterem Maße auf (vergleiche Diagramm 3).

Vergleich der Wurzelresorptionen der rechten und linken Seite



T3 (nach Behandlungsende)

Diagramm 3: Balkendiagramm zur Darstellung der Resorptionsunterschiede zwischen der rechten und linken Seite zum Zeitpunkt T3

5.7.3 Quadrantenvergleich:

Durch das Nebeneinanderstellen der einzelnen Quadranten im Mann-Whitney-U-Test stellt sich des Weiteren heraus, dass weder signifikante Resorptionsunterschiede bei T1, T2 oder T3 zwischen dem ersten und vierten, noch zwischen dem zweiten und dritten, noch zwischen dem zweiten und vierten Quadranten auftreten.

Untermuert werden die Seitenunterschiede durch die signifikanten Unterschiede zwischen den restlichen Quadrantenkombinationen (siehe Tabelle 9).

Vergleich der Resorptionen bei den seitenverschiedenen Quadranten

Tabelle 9

Quadranten im Vergleich	Signifikanz des Unterschieds	Mittelwerte		Fazit
1. + 2.	*	0,42	0,51	mehr Resorptionen im 2. Quadranten (links)
1. + 3.	* *	0,42	0,55	mehr Resorptionen im 3. Quadranten (links)
3. + 4.	*	0,55	0,41	mehr Resorptionen im 3. Quadranten (links)

5.8 Bogenwechsel

5.8.1 Oberkiefer – Unterkiefer:

Im Unterkiefer sind mit durchschnittlich 3,65 nach dem Mann-Whitney-U-Test signifikant (***) weniger Bogenwechsel zu verzeichnen als im Oberkiefer mit 4,14 im Durchschnitt.

Dennoch zeigen sich keine signifikanten Unterschiede bei der Wurzelresorption zwischen Ober- und Unterkiefer (siehe Punkt 5.7.1).

5.8.2 Extraktionsfall – Non-Extraktionsfall:

Der Mann-Whitney-U-Test verdeutlicht bei den Extraktions- und Non-Extraktionsfällen einen signifikanten (***) Unterschied in der Anzahl der Bogenwechsel.

Die Extraktionsfälle weisen mit einem Mittelwert von 4,57 mehr Bogenwechsel vor als die Non-Extraktionsfälle mit durchschnittlich 3,56 Bogenwechseln.

5.8.3 Geschlechter:

Auch verneint der oben angegebene Test eine signifikant unterschiedliche Anzahl der Bogenwechsel bei den Geschlechtern.

5.8.4 Lange – kurze Behandlungsdauer:

Der gleiche Test weist eine signifikante (***) Diskrepanz zwischen länger und kürzer behandelten Zähnen nach. Bei längerer Therapiedauer befindet sich der Mittelwert der Bogenwechsel bei 5,31, während kürzere Behandlungen eine durchschnittliche Anzahl von nur 2,52 aufzeigen.

Längere Behandlung bedeutet also eine erhöhte Anzahl der Bogenwechsel.

5.8.5 Vergleich der Wurzelresorptionen bezogen auf die Anzahl der Bogenwechsel:

Bei der Aufteilung der Patienten in zwei Kategorien berichtet der Mann-Whitney-U-Test einen signifikanten (*) Unterschied der Wurzelresorptionen bei T2. Die Mittelwerte bezeugen gesteigerte Resorptionsvorgänge bei weniger Bogenwechseln (siehe Tabelle 10).

Vergleich der Wurzelresorptionen bei unterschiedlicher Anzahl von Bogenwechseln durch Einteilung der Patienten in zwei Kategorien

Tabelle 10

Kategorie	Durchschnittliche Anzahl der Bogenwechsel	Mittelwert der Wurzelresorptionen bei T2
1	0 – 5,5	0,44
2	5,51 – 11	0,35

5.8.6 Vergleich diverser Einteilungen von Zähnen:

Bei der Einteilung der Zähne in vier, fünf, sechs oder sieben Kategorien von Bogenwechseln stellt der Mann-Whitney-U-Test bei Gegenüberstellung der jeweils höchsten und niedrigsten Kategorie keine signifikanten Unterschiede fest.

5.9 Behandlungsdauer

5.9.1 Kurze Therapien:

Mittels Wilcoxon-Test lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen T2 und T3 ableiten. Jedoch weichen die Partner der Paare T1 – T2 und T1 – T3 signifikant (***) voneinander ab.

Weniger Wurzelresorptionen sind in beiden Fällen zum Zeitpunkt T1 durch die Mittelwerte verzeichnet (vergleiche Diagramme 4, 5 und 6).

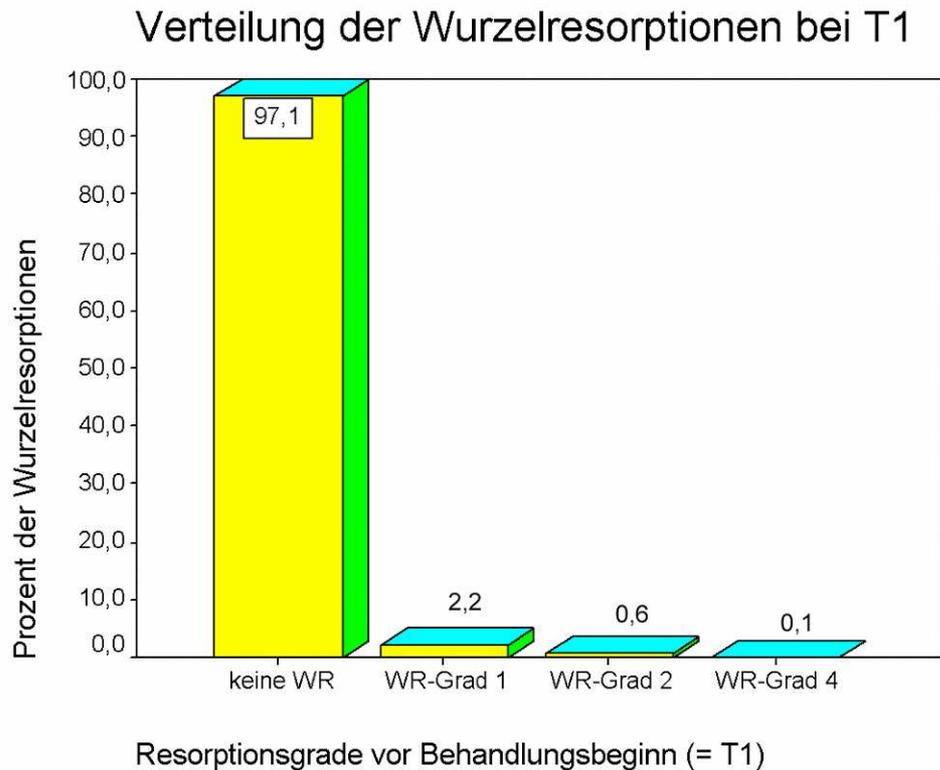


Diagramm 4: Balkendiagramm zur prozentualen Verteilung der Wurzelresorptionen bei kurzen Behandlungen zum Zeitpunkt T1

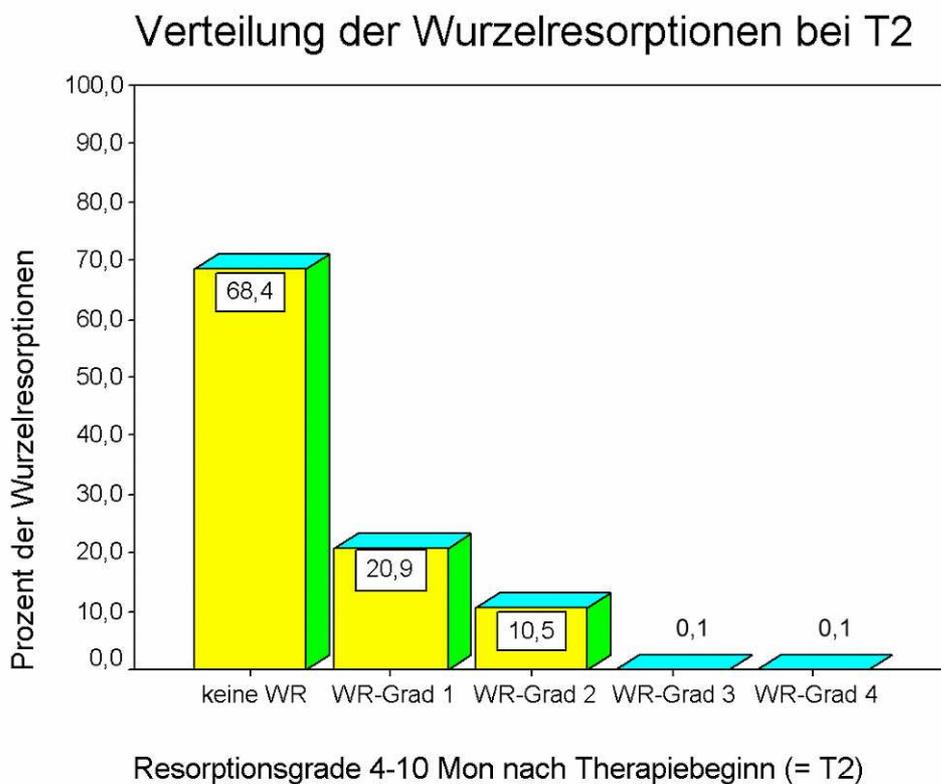


Diagramm 5: Balkendiagramm zur prozentualen Verteilung der Wurzelresorptionen bei kurzen Behandlungen zum Zeitpunkt T2

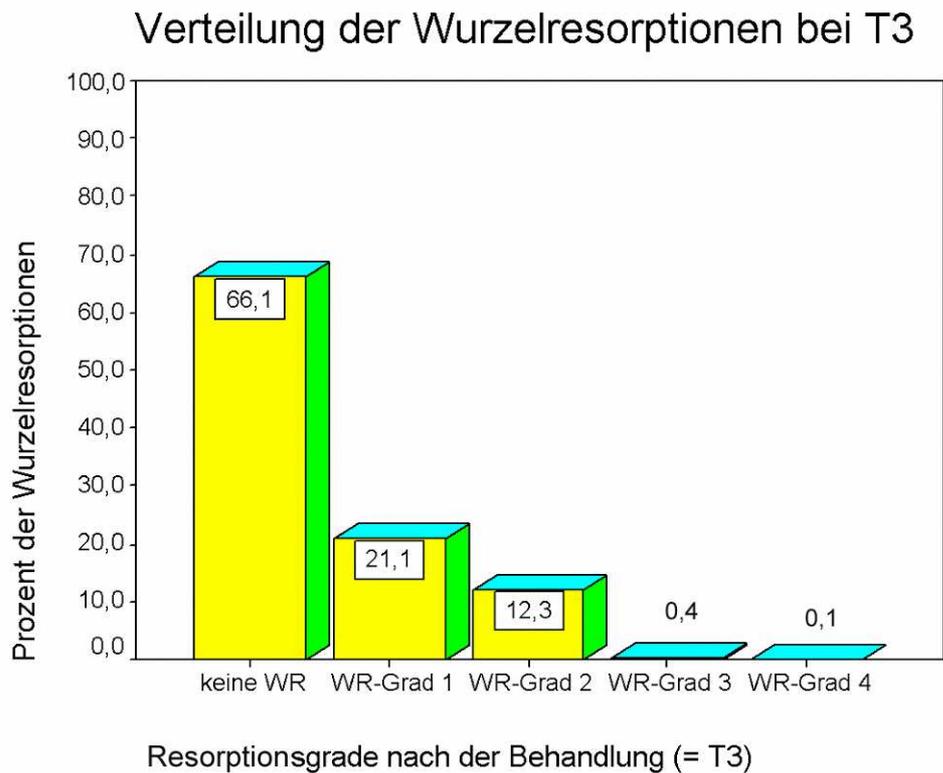


Diagramm 6: Balkendiagramm zur prozentualen Verteilung der Wurzelresorptionen bei kurzen Behandlungen zum Zeitpunkt T3

5.9.2 Lange Therapien:

Signifikante (***) Unterschiede unterstreicht der Wilcoxon-Test sowohl zwischen T1 und T2 als auch zwischen T1 und T3.

Im Gegensatz zu den kurzen Therapiezeiten beschreibt der Wilcoxon-Test hier jedoch ebenfalls eine signifikante (**) Differenz zwischen T2 und T3.

Die Mittelwerte erläutern, dass bei T3 mehr Resorptionen stattfinden als bei T2 und T1 und, dass bei T2 ebenfalls mehr Wurzeln von Resorptionen betroffen sind als bei T1 (siehe Diagramme 16-18, Punkt 6.9.2).

5.9.3 Vergleich zwischen langen und kurzen Therapiezeiten:

Bei obiger Aufteilung in zwei Kategorien nach dem Mittelwert stellt der Mann-Whitney-U-Test keine signifikante Diskrepanz bei T1, T2, T3 oder den Geschlechtern fest.

Lediglich die Extraktions- und Non-Extraktionsfälle differieren signifikant (***) voneinander (siehe auch Punkt 5.3.1).

Zudem berichtet der Mann-Whitney-U-Test beim Vergleich der höchsten und niedrigsten Kategorie einer Gruppierung in fünf Einheiten über einen signifikanten (*) Unterschied bei T2.

In Kategorie eins, also bei kürzeren Behandlungen mit 261 bis 402 Tagen, beträgt der Mittelwert der Resorptionen 0,43.

Dagegen weist Kategorie fünf, also bei einer längeren Behandlungsdauer von 838 bis 2370 Tagen, einen niedrigeren Wert von 0,32 auf.

Es sind keine signifikanten Unterschiede bei T1, T3 und beim Geschlecht zu beobachten.

5.10 Vergleich verschiedener Patientengruppen

5.10.1 Gruppierung der Patienten durch das Vorhandensein von Resorptionen bei T2:

Beim Vergleich der Wurzelresorptionen zu den Zeitpunkten T2 und T3 bei Patienten, die bei T2 keine Wurzelresorptionen aufweisen, zeigt sich durch den Wilcoxon-Test kein signifikanter Unterschied.

Stellt der Wilcoxon-Test jedoch die Resorptionen zu T2 und T3 bei den Patienten gegenüber, die bei T2 schon Resorptionen offenbaren, so ergibt sich ein signifikanter (**) Unterschied.

Durch die Mittelwerte der Resorptionsgrade für T2 bei 0,44 und für T3 bei 0,48 wird klar, dass sich bei T3 vermehrt Wurzelresorptionen zeigen.

5.10.2 Aufteilung der Patienten nach dem Mittelwert von T2:

Die erste Gruppe enthält Patienten, bei denen der Mittelwert von T2 unter oder gleich 0,42 ist.

Der Wilcoxon-Test ermittelt in dieser Gruppe mit reduzierter Resorptionsaktivität einen signifikanten (***) Unterschied zwischen T2 und T3. Aus den Mittelwerten, 0,27 für T2 und 0,36 für T3, wird das Überwiegen der Resorptionen bei T3 ersichtlich.

In der zweiten Einheit finden sich Patienten, deren Durchschnittsresorptionen zu T2 den Mittelwert aller Patienten zu T2 (= 0,42) übersteigen. Als Mittelwerte dieser Gruppe ergeben sich 0,58 für T2 und 0,59 für T3.

Mit Hilfe des Wilcoxon-Tests ist hier kein signifikanter Unterschied zwischen T2 und T3 zu entdecken.

5.10.3 Strukturierung der Patienten nach dem Mittelwert von T3:

In einer Gruppe befinden sich Patienten, deren Mittelwert der Wurzelresorptionen bei T3 kleiner oder gleich 0,47 ist.

Der Wilcoxon-Test ermittelt hier keinen signifikanten Unterschied der Resorptionen zwischen T2 und T3.

Eine zweite Gruppe bilden Patienten mit einem Mittelwert bei T3, der den Durchschnittswert aller Patienten (0,47) überschreitet.

Einen signifikanten (***) Unterschied leitet der Wilcoxon-Test zwischen T2 und T3 ab. Der Mittelwert bei T2 beträgt 0,50. Mehr Resorptionen liegen demnach bei T3 vor, denn hier liegt der Durchschnitt bei 0,64.

5.11 Kontrolluntersuchung und Ergebnisse

5.11.1 Prozentuale Übereinstimmung der Analysen:

Um einen ersten Überblick der Entsprechung der beiden Untersuchungsergebnisse zu erhalten, werden die stimmigen und unstimmigen Daten in von-Hundert-Werten nebeneinandergestellt (siehe Tabelle 11).

Prozentuale Verteilung der zutreffenden und falsch liegenden Werte

Vergleich der ersten Untersuchung und der Kontrollanalyse

Tabelle 11

Werte		Häufigkeit	Prozent	gültige Prozente
gültig	nicht übereinstimmend	106	21,9 %	26,3 %
	übereinstimmend	297	61,2 %	73,7 %
	Gesamt	403	83,1 %	100 %
fehlend		82	16,9 %	

5.11.2 Wilcoxon-Test zwischen Erst- und Kontrolluntersuchung:

Bei der Durchführung eines Wilcoxon-Tests, der beim einzelnen Patienten jeweils die Mittelwerte der Erst- und der Kontrolluntersuchung vergleicht, werden keine signifikanten Unterschiede gefunden.

Dieses Ergebnis bestätigt ein weiterer Wilcoxon-Test, der alle 25 Patienten gleichzeitig umfasst.

5.11.3 Überprüfung nach Dahlberg:

Zur weiteren Überprüfung der Validität der untersuchten Ergebnisse, findet die Dahlberg-Formel Anwendung, bei der sich ein Methodenfehler von $\sigma = 0,45$ ergibt.

6. Diskussion

6.1 Prüfung auf Normalverteilung

Nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test zur Überprüfung der Verteilungsform entspricht ausschließlich das Alter der Gauß-Verteilung. Wurzelform, Behandlungsdauer, Bogenwechsel und Auftreten von Wurzelresorptionen bei T1, T2 und T3 sind nicht normalverteilt. Hier wird zu Gunsten von Stadien auf eine metrische Einordnung der Daten verzichtet. Dementsprechend werden die Variablen ordinal skaliert.

Somit kommen bei der statistischen Analyse der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben, der Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben und zusätzlich der Chi-Quadrat-Test zur Anwendung. Diese nichtparametrischen Tests bieten den Vorteil, unempfindlicher gegen Ausreißer zu sein, da nicht die Werte per se, sondern Rangplätze verrechnet werden [19].

6.2 Geschlechtsunterschiede

In dieser Studie überwiegen weibliche Patienten, sowohl bei den Extraktionsfällen, als auch bei den Non-Extraktionsfällen (siehe Diagramm 7). Es wird angenommen, dass zufälligerweise mehr weibliche Patienten (60,7% der Patienten) den Auswahlkriterien dieser Arbeit entsprechen, deshalb wird dieser Bewandtnis nur eine niedrigere Bedeutung zugeordnet.

Verteilung der Geschlechter auf Extraktions- und Non-Extraktionsfälle

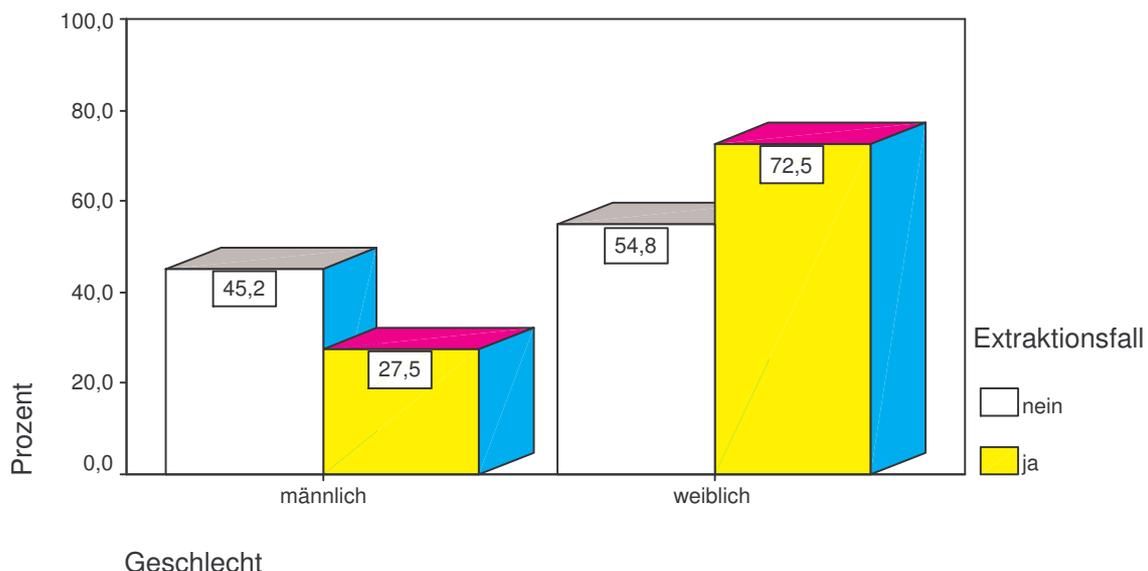


Diagramm 7: Balkendiagramm zur Verteilung der Geschlechter auf Extraktions- und Non-Extraktionsfälle

Jedoch ist festzuhalten, dass bezüglich der Wurzelresorptionen keine signifikanten Differenzen auftauchen. Dies stimmt mit den Ergebnissen diverser Untersucher überein [6, 40, 42]. Auch endodontisch behandelte Zähne werden laut SPURRIER et al. bei beiden Geschlechtern gleich stark resorbiert [105].

KJAER konstatiert dagegen, dass weibliche Patienten eher zu apikalen resorptiven Vorgängen neigen als männliche [56]. Ein anderer Autor findet mehr Resorptionen bei männlichen Patienten, jedoch entbehren seine Ergebnisse statistischer Signifikanz [97].

Diese Studie kann keine der beiden letzteren Positionen explizit bestätigen.

6.3 Verteilung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle

Subtrahiert man die Aplasien, so zeigt sich, dass bei 28,7% der Kiefer von den Patienten in der Poliklinik für Kieferorthopädie Düsseldorf Zähne extrahiert werden mussten.

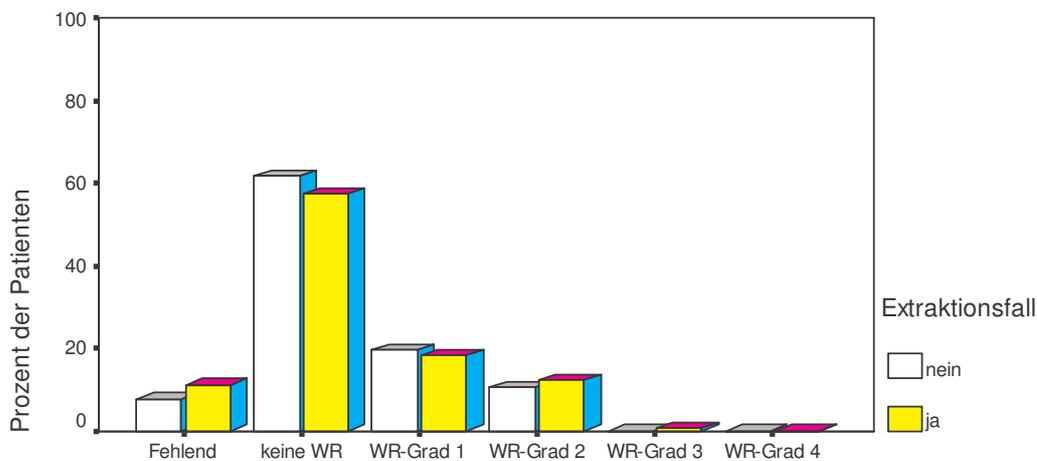
6.3.1 Vergleich der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle:

Hoch signifikante Unterschiede zwischen den Extraktions- und den Non-Extraktionsfällen lassen sich lediglich bei der Behandlungsdauer und den Geschlechtern (siehe ebenso Punkt 6.2) ermitteln.

Längere Therapien erfolgen bei Extraktionsfällen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Zähne eine größere Distanz bis zum Lückenschluss zurücklegen müssen. Da zur Resorptionsminimierung kleine Kräfte verwendet werden – weil höhere Kräfte auch mehr apikale Resorptionen verursachen würden [15] – dauert die Behandlung entsprechend länger. Eine der Studien bestätigt dazu auch, dass eine bestimmte Variation von Wurzelresorptionen maßgeblich durch die behandelnde Praxis oder Klinik bestimmt wird [98].

Diese Arbeit kommt zu dem Schluss, dass keine unterschiedlich ausgeprägten Resorptionen zwischen den verschiedenen Gruppen zu den drei Zeitpunkten auftreten (als Beispiel dient Diagramm 8).

Vergleich der Wurzelresorptionen bei T3 zwischen Ex- und Non-Ex-Fällen



ab 1 Mon + 14 Tage vor Multiband (MB)-ex (T3)

Diagramm 8: Balkendiagramm zum Vergleich der Wurzelresorptionen bei T3 zwischen Extraktions- und Non-Extraktionsfällen

JANSON et al. bekräftigen dies in ihrer Arbeit mit der Feststellung, dass sie bei gleicher Anzahl an Extraktionsfällen verschieden starke resorptive Wurzelverkürzungen entdecken. Demnach bietet der Extraktionsfall keine Erklärung für erhöhte Wurzelresorptionen [49].

Nach SAMESHIMA und SINCLAIR unterliegen Patienten mit vier Prämolarextraktionen stärkeren Wurzelresorptionen, während solche mit zwei im Oberkiefer extrahierten Prämolaren keine Unterschiede zu Non-Extraktionsfällen aufweisen [98].

Auch KOOK et al. finden bei Patienten mit Extraktionen mehr Resorptionen an den seitlichen Oberkieferschneidezähnen [57].

Dieser Angabe können auch JIANG et al. zustimmen [50].

Im Konsens damit geben HARRIS et al. an, dass auf Grund des längeren Weges durch den Alveolarknochen bei Prämolarenextraktion in der Maxilla mehr apikale Resorptionen auftreten [40].

6.4 Allgemeiner Wurzelresorptionsvergleich

Vor Behandlungsbeginn mit festsitzender Apparatur (T1) liegen bei nur 2,9% der Zähne Wurzelresorptionen vor.

Dass apikale Resorptionsprozesse im Laufe der kieferorthopädischen Zahnbewegung auftreten, ist hinlänglich bekannt [4, 14, 15, 25, 38, 40, 75, 89, 94]. Insofern verwundert es nicht, dass sich hoch signifikante Unterschiede zwischen den Resorptionen am Anfang (T1) und nach halbjähriger Therapie (T2) mit 31,6% betroffener Zähne, beziehungsweise zwischen Beginn (T1) und Ende der Behandlung (T3) mit 33,9% resorbierter Apizes ergeben (siehe Diagramme 9-11).

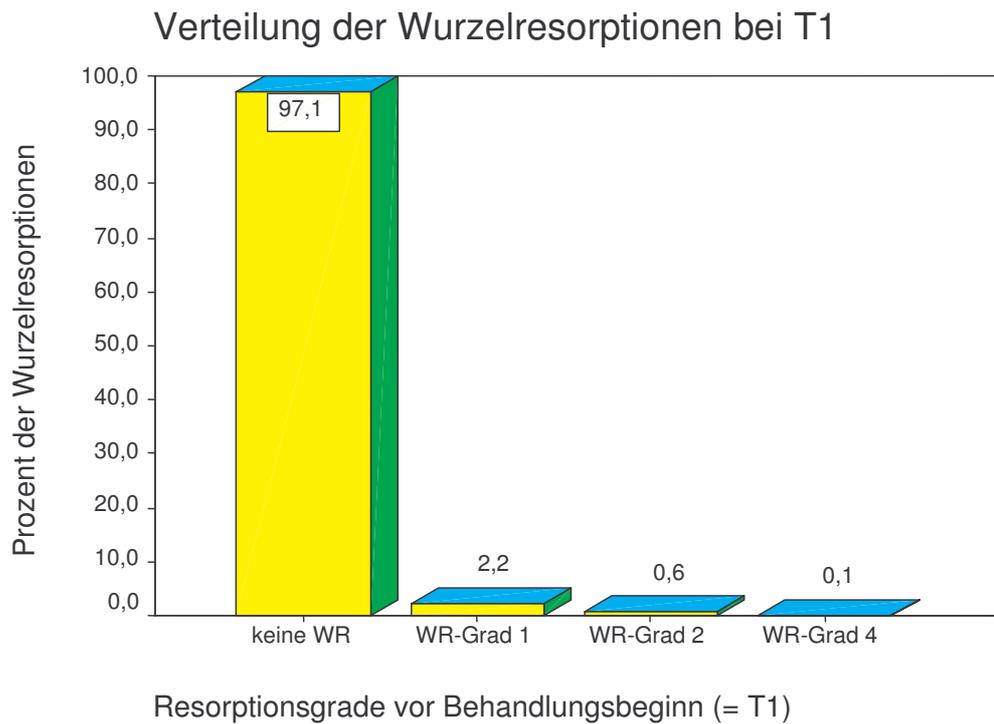


Diagramm 9: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen vor Beginn der Therapie mit festsitzender Apparatur (T1)

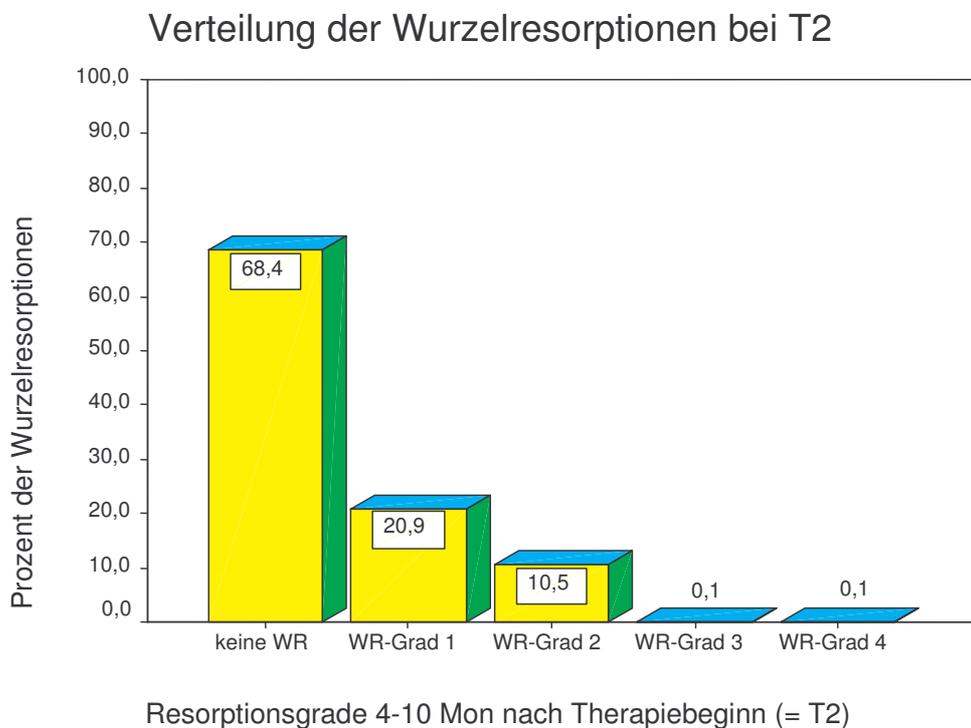


Diagramm 10: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen nach etwa einem halben Behandlungsjahr (T2)

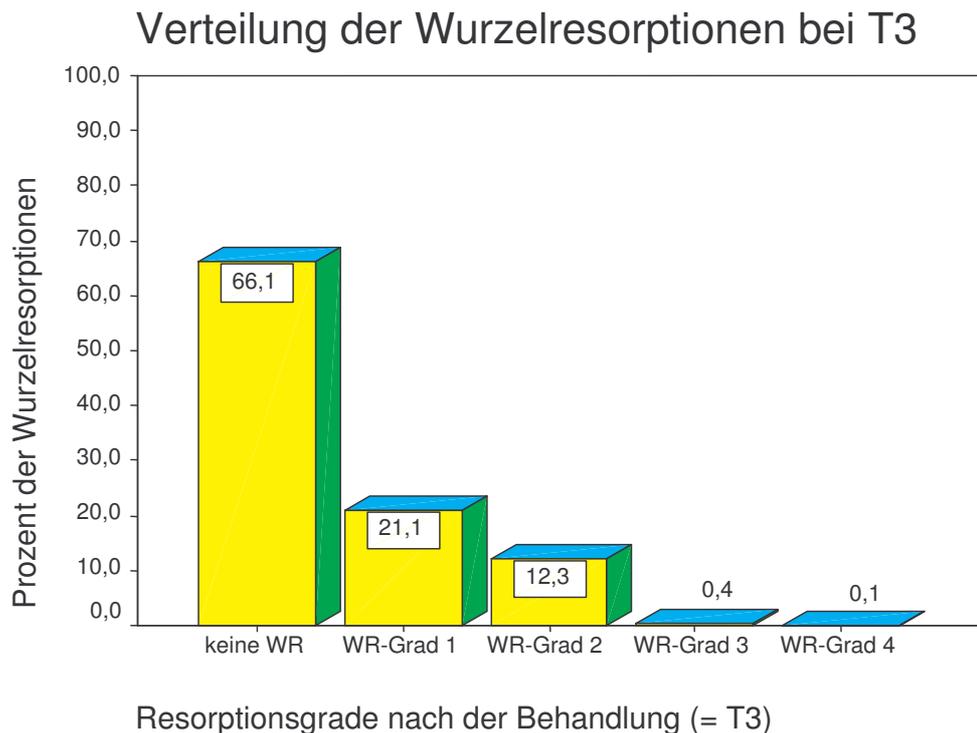


Diagramm 11: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen zum Behandlungsende (T3)

Diese Zunahme der apikalen Resorptionen bestätigen diverse Arbeiten [41, 63, 70, 72, 75, 91, 96, 113].

GÖZ und RAKOSI geben an, die meisten kieferorthopädisch induzierten apikalen Resorptionen erreichen Grad eins bis zwei, beziehungsweise liegen oftmals unterhalb von 2 mm [38]. Dies untermauert auch die aktuelle Untersuchung.

Die Resorptionswerte variieren stark, sowohl bei den Patienten, als auch bei den verschiedenen Untersuchungen (vergleiche auch 2.3).

LEVANDER und MALMGREN erachten nach etwa einem halben Therapiejahr 34% der Zähne für angegriffen und nach Ende der Behandlung sogar 56% [63]. Allerdings erklären sich diese höheren Werte dadurch, dass die Autoren lediglich Inzisivi untersuchen, die bekanntermaßen eher zu Wurzelresorptionen neigen (vergleiche auch 6.6.4).

Bei FRITZ et al. erweisen sich nach der Behandlung 82% der Zähne als resorptionsfrei [35], während WEHRBEIN et al. an 40% der Zähne Wurzelresorptionen feststellen [112]. Nicht zum Vergleich eignen sich hier histologische Studien, weil sich in diesen laut ROBERTS-HARRY und SANDY jeder Zahn als, wenn auch nur leicht, von Resorptionen befallen darstellt [92].

Es tauchen nach Behandlungsende (T3) signifikant mehr apikale Resorptionen auf als nach halbjähriger Therapie (T2) (vergleiche Diagramme 10 und 11). Dies kann mit der längeren Behandlungszeit zusammenhängen. Dem stimmen LEVANDER et al. und andere Autoren zu [16, 25, 65, 107].

Bei der Interpretation der Ergebnisse bezüglich der Therapiedauer wird auf dieses Phänomen noch ausführlicher eingegangen (siehe 6.9).

Es sollte auch nicht außer Acht gelassen werden, dass einige andere Faktoren ebenfalls Einfluss auf das Resorptionsausmaß nehmen. Als Beispiele sind Kraftapplikation, Art der Apparatur oder der Bewegungsrichtung zu nennen.

Diese können jedoch auf Grund des expandierenden Umfangs der Studie und des begrenzten Auswertungsmaterials nicht untersucht werden.

BECK und HARRIS schlagen vor, nicht allein die Behandlungsdauer zu berücksichtigen, sondern besonders die Korrekturen, die in dieser Zeit vorgenommen werden, da diese wesentlichen Einfluss auf die Wurzelresorptionen nehmen [6].

Andere Autoren ermitteln keine oder nur prozentuale Angaben und verzichten auf Mittelwerte der Resorptionsgrade [6, 38, 40, 41, 65, 89], so dass ein diesbezüglicher Vergleich hier nicht stattfinden kann.

6.5 Wurzelformvergleich

Pipettenförmige Wurzeln sind mit 7,9% am häufigsten vertreten, gefolgt von 4,8% apikal abgeknickter Wurzeln. Weniger oft werden stumpfe (1,4%) oder verkürzte (1,2%) Wurzeln entdeckt. Lediglich ein Patient weist einen Taurodontismus der Oberkiefermolaren auf (0,1%). Etwa 84,5% der Wurzeln sind normal ausgebildet (siehe Diagramm 2, Punkt 5.5).

Etwa vergleichbare Ergebnisse liefert eine Studie von LEVANDER und MALMGREN mit 63% normal geformten Wurzeln. Sie finden jedoch vermehrt Wurzeln mit apikalem Knick und stumpfem Apex, weniger verkürzte und selten pipettenförmige Wurzeln [63].

LEVANDER et al. legen vor, dass geringgradig sowohl apikale abgeknickte Wurzeln [63, 65], als auch stumpfe und pipettenförmige einem höheren Risiko von Resorptionen unterliegen [62, 63].

Diese Untersuchung bestätigt, dass stumpfe Wurzeln in den ersten Behandlungsmonaten zu stärkeren Resorptionen tendieren. Diese Unterschiede relativieren sich jedoch zum Ende der Therapie.

Im Gegensatz zur Feststellung von LEVANDER et al. zeigen pipettenförmige Wurzeln in vorliegender Arbeit durchschnittlich etwa gleich viele Resorptionen wie normale Wurzeln.

Dieses Ergebnis geht auch konform mit der Behauptung von KOOK et al., pfahlförmige (vergleichbar mit der Pipettenform) und kleinere seitliche Inzisivi kommen nicht eher durch apikale Verkürzungen zu Schaden als normale Wurzeln [57].

Verkürzte Wurzeln zeigen sich in einer weiteren Studie unauffällig [63]. Damit stimmen die gewonnenen Informationen aus dieser Arbeit überein.

Laut TAITHONGCHAI et al. erfahren jedoch kürzere Wurzeln ein größeres relatives Ausmaß an Wurzelresorptionen [107].

Tendenziell stärkere Resorptionen bei Taurodontismus stellt eine Studie von KJAER fest [56]. Generell treten Taurodontismen mit einer Häufigkeit von 1,4% (männliche Patienten) bis 5,8% (weibliche Patienten) auf [56].

In dieser Arbeit waren 0,1% der Zähne, jedoch 1,2% der Patienten betroffen, so dass die Werte annähernd vergleichbar sind, obwohl kein weiblicher Patient diese Anomalie zeigt.

In der aktuellen Studie werden ebenfalls stärkere apikale Wurzelverkürzungen bei Taurodontismus gegenüber normalen Wurzelformen festgestellt (Beispiel: Bild 9).

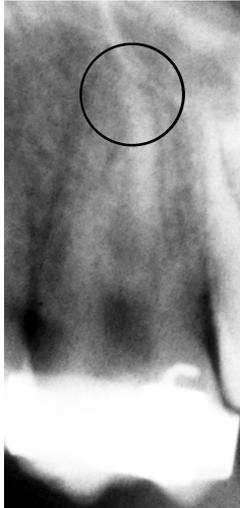


Bild 9: Zahn 26 (Taurodontismus): Wurzelresorptionsgrad 2

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass lediglich ein Patient diese Wurzelanomalie aufwies, so dass dieses Ergebnis zurückhaltend zu deuten ist.

MIRABELLA und ARTUN zeigen, dass im Allgemeinen anomal geformte Wurzeln einem höheren Risiko apikaler Abbauvorgänge unterliegen [76].

Die vorliegende Studie kann dieser allgemeinen Behauptung nicht zustimmen: die Auswirkung auf anomal geformte Wurzeln scheint eher gering (vergleiche hierzu Diagramm 12).

Vergleich der Wurzelresorptionen zu T1, T2 und T3 bei den verschiedenen Wurzelformen

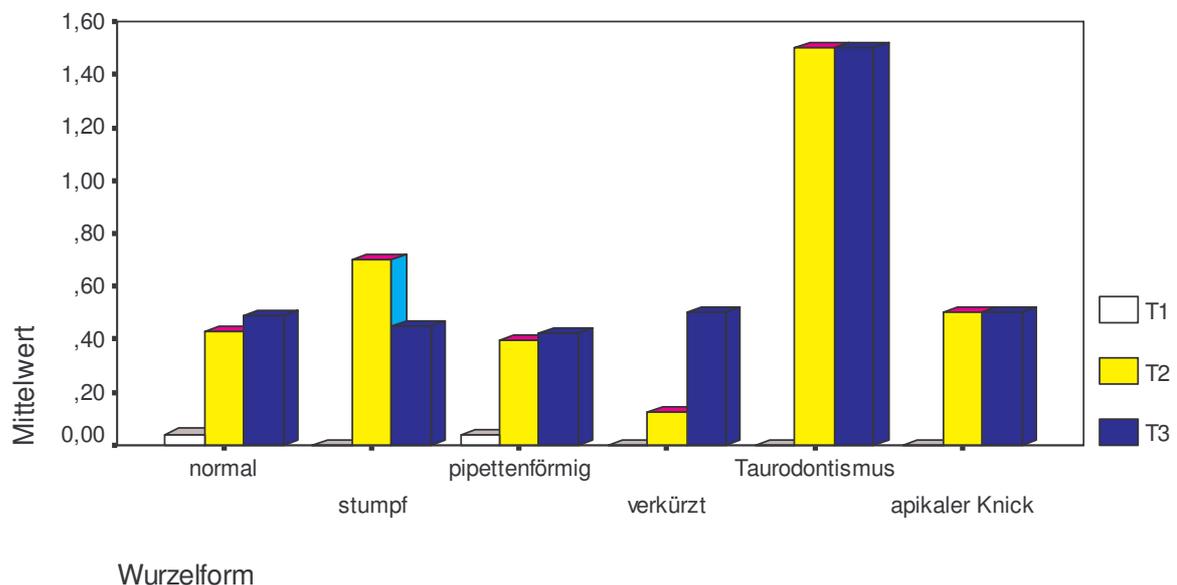


Diagramm 12: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen zu den verschiedenen Wurzelformen bei T1, T2 und T3

BRIN et al. teilen Wurzeln in normale und ungewöhnliche Formen ein. Sie halten diesen Faktor nicht für geeignet, um Wurzelresorptionen vorherzusagen zu können, obwohl sie zum Behandlungsende tendenziell stärkere Resorptionen bei ungewöhnlicher Wurzelform bemerken [16].

Beachtung finden muss auch, dass auf Panoramaschichtaufnahmen die verschiedenen Wurzelformen nicht immer ausreichend präzise zur Darstellung kommen. Deshalb lassen sich hier möglicherweise weniger abnorm geformte Wurzeln erkennen als de facto vorliegen. Die Ergebnisse müssen daher mit Vorsicht bewertet werden.

Um mehr Klarheit auf diesem Gebiet zu erlangen, wäre eine Studie sinnvoll, die sich auf abnorme Wurzelformen konzentriert und deren Einfluss auf das Resorptionsausmaß, möglichst anhand von Zahnfilmen, genauer bestimmt.

6.6 Analyse der einzelnen Zähne

Diverse Studien demonstrieren, dass die unterschiedlichen Zahnarten verschieden starke Resorptionssensibilitäten aufweisen [16, 40, 42, 97]. Dies wird anhand des vorliegenden Patientengutes überprüft.

6.6.1 Untersuchung auf Normalverteilung:

Da sich nur die Behandlungsdauer als normalverteilt darstellt, müssen auch für diese Analysen nichtparametrische Tests (vergleiche auch 6.1) eingesetzt werden.

6.6.2 Vergleich der Wurzelresorptionen zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3:

Die Zähne 11-16, 21, 22, 24-26, 31-34, 36, 41, 43-46 zeigen bei T2 und T3 mehr Resorptionen als bei T1, was auf die kieferorthopädische Behandlung zurückzuführen ist. Nach Beendigung der Behandlung weisen sie jedoch nicht signifikant mehr Resorptionen auf, als schon zum Zeitpunkt T2.

Tendenziell steigern sich jedoch die Resorptionen zum Ende der Therapie hin.

Die Zunahme der Resorptionen im Laufe der Behandlung ist seit geraumer Zeit bekannt.

So werden in einer Untersuchung von LEVANDER und MALMGREN nach etwa sechs Monaten Therapie 33% der Zähne von Resorptionen befallen, während zum Behandlungsende 66% betroffen sind [63].

Auch LUPI et al. stellen fest, dass sich das anfängliche Resorptionsvorkommen von etwa 15% nach Ende der Behandlung auf 73% steigert [70].

Dies deutet darauf hin, dass eine Röntgenaufnahme nach etwa einem halben Therapiejahr durchaus in der Lage ist, Wurzelresorptionen aufzuzeigen und in gewissem Rahmen auch vorherzusagen. Auf diese interessante Fragestellung wird noch verschiedentlich eingegangen (besonders bei Punkt 6.10).

Der linke Oberkiefereckzahn und der linke zweite Prämolare der Mandibula werden bei T2 und T3 ebenfalls deutlich gegenüber T1 resorbiert. Der Vorgang erfährt zusätzlich eine Steigerung nach der ersten Behandlungsphase (T2) bis zum Therapieende (T3).

KJAER stellt in seiner Arbeit ebenfalls heraus, dass die zweiten Prämolaren im Unterkiefer stärkeren Resorptionen unterliegen [56].

Kritisch zu betrachten ist, dass es sich um einzelne Zähne und nicht um Zahngruppen handelt. Somit findet dieses statistische Ergebnis keine wesentliche Berücksichtigung, kann allerdings, in Anlehnung an KJAER, auf eine höhere Sensibilität dieser Zähne hinweisen.

Werden die speziellen Beobachtungen an diesen zwei Zähnen berücksichtigt, so zeigt sich als mögliche Erklärung, dass bei ihnen eine zum Teil stark rotierte oder angulierte Lage korrigiert wurde.

Lediglich Zahn 42 zeigt zu keinem der drei Messungszeitpunkte signifikante Unterschiede der resorptiven Prozesse, obwohl bei T2 und T3 tendenziell mehr Wurzelresorptionen zu verzeichnen sind als bei T1. Dies liegt zum einen vermutlich an statistisch ungünstig verteilten fehlenden Werten, zum anderen werden in manchen Studien die seitlichen Unterkieferschneidezähne als relativ resorptionsresistent angesehen.

So stellt eine Untersuchung der Frontzähne von JANSON et al. eine Reihenfolge nach der Resorptionsanfälligkeit dieser Zähne auf. Als letztes wird der seitliche untere Inzisivus genannt [49]. Auch eine weitere Studie nach SAMESHIMA und SINCLAIR nennt diesen Zahn in einer solchen Aufzählung als vorletzten [97].

Andererseits dürfen die recht häufigen Schichtartefakte im Frontzahnbereich des Unterkiefers und die daraus resultierenden fehlenden Werte als Ursache dieses Ergebnisses nicht unbeachtet bleiben (siehe Bild 8, Punkt 4.5.3).

6.6.3 Behandlungsdauer:

Da jedem Zahn die Behandlungsdauer zugeordnet wurde, kann ein Vergleich zwischen langer und kurzer Therapie bezogen auf einen Zahn erstellt werden. Fast alle untersuchten Zähne verhielten sich bei langer und kurzer Behandlungszeit zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3 ähnlich.

Lediglich die lateralen Inzisivi der Maxilla und Zahn 16 und 36 zeigen bei T2 nach kürzerer Therapie mehr Resorptionen als nach längerer Behandlungszeit.

Dies kann zum einen durch die häufig minderwertige Abbildung der Frontzahnspitzen im Orthopantomogramm verursacht sein, zum anderen werden bei längerer Behandlung die Kräfte besser verteilt. Dadurch kann allgemein behutsamer behandelt werden.

Die Molaren werden möglicherweise ebenfalls in kurzer Therapiezeit zu forciert bewegt, so dass diese Diskrepanz zur längeren Behandlung entsteht.

Der rechte erste Prämolare der Mandibula weist bei T2 mehr Resorptionen bei längerer Behandlung vor. Hier ergibt die genauere Untersuchung speziell dieses Zahnes teils eine stark gekrümmte Wurzel, teils eine deutliche Angulation, die in der beobachteten Zeitspanne korrigiert wird. Da das Bewegungsausmaß direkt mit dem Grad der Wurzelresorptionen zusammenhängt [6, 84], bietet ein solcher Befund eine mögliche Erklärung. Ansonsten erscheint der Zahn 44 auf den Panoramaschichtaufnahmen unauffällig. Erneut wird hier jedoch auf die Beschränkung dieser Röntgentechnik hingewiesen; nicht alle Wurzelanomalien oder Kippstände werden exakt dargestellt.

In der Literatur wird der Einfluss der Behandlungsdauer stets kontrovers diskutiert. So erläutern JANSON et al. die Therapiezeit ist kein risikoe erhöhender Faktor für Wurzelresorptionen [49].

Sie erhalten jedoch alsbald Widerspruch durch eine Arbeit von GÖZ und RAKOSI, die sehr wohl eine Abhängigkeit der apikalen Resorptionen von der Dauer der Therapie nachweisen [38].

Bezüglich einzelner Zähne gibt es kaum Vergleichsmöglichkeiten. Deshalb wird auf dieses Thema in allgemeinerem Kontext noch einmal detailliert eingegangen (siehe auch 6.9).

6.6.4 Vergleich der Wurzelresorption einzelner Zähne gegenüber den restlichen Zähnen:

Die meisten Zähne werden während kieferorthopädischer Behandlung nicht stärker resorbiert als der Durchschnitt. Nachfolgend werden deshalb nur Zähne besprochen, deren Wurzelresorptionswerte signifikant über oder unter dem Durchschnitt liegen (vergleiche Diagramme 13-15; siehe auch Tabelle 8, Punkt 5.6.4).

Vergleich der Wurzelresorptionen bei T1 zwischen den verschiedenen Zähnen

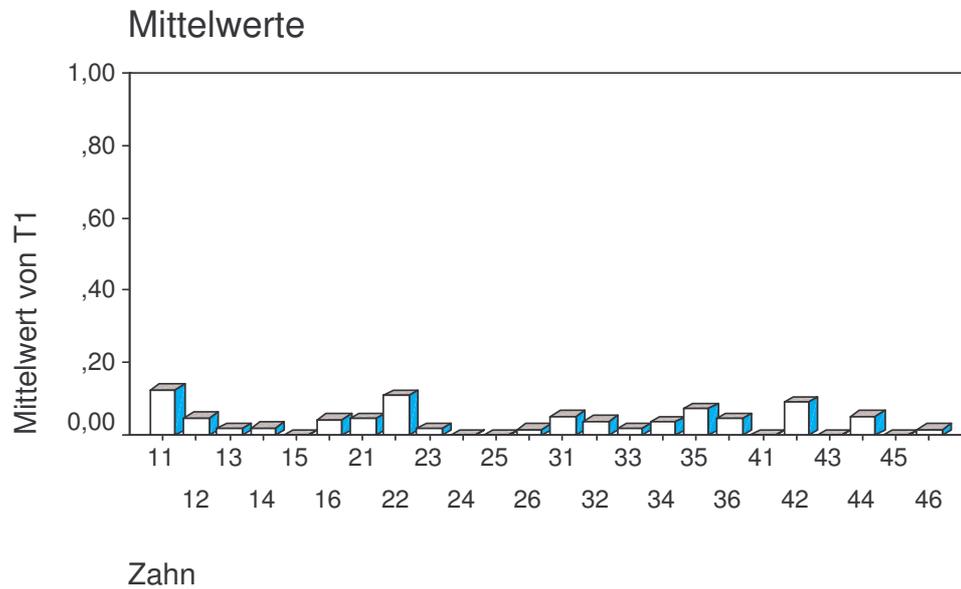


Diagramm 13: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen der einzelnen Zähne bei T1

Vergleich der Wurzelresorptionen bei T2 zwischen den verschiedenen Zähnen

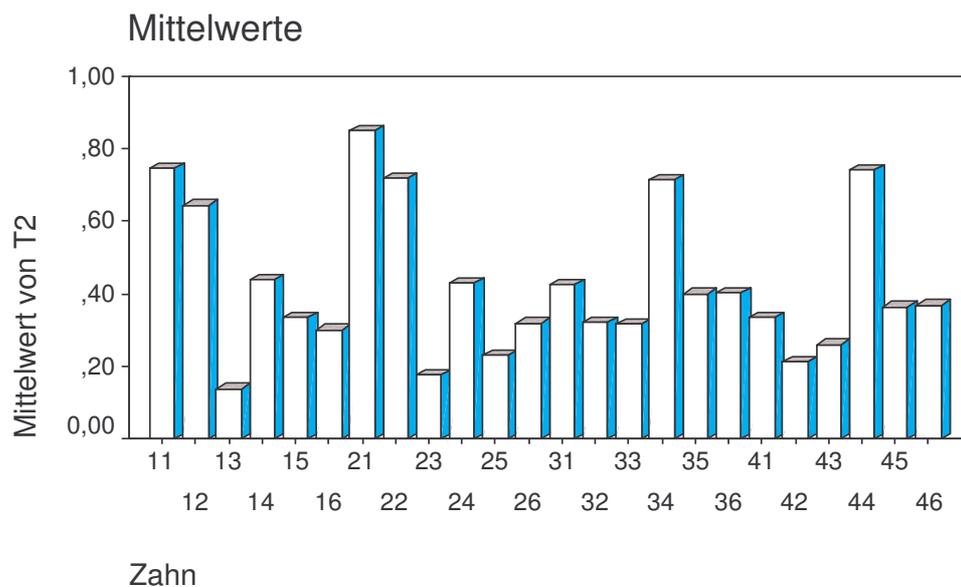


Diagramm 14: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen der einzelnen Zähne bei T2

Vergleich der Wurzelresorptionen bei T3 zwischen den verschiedenen Zähnen

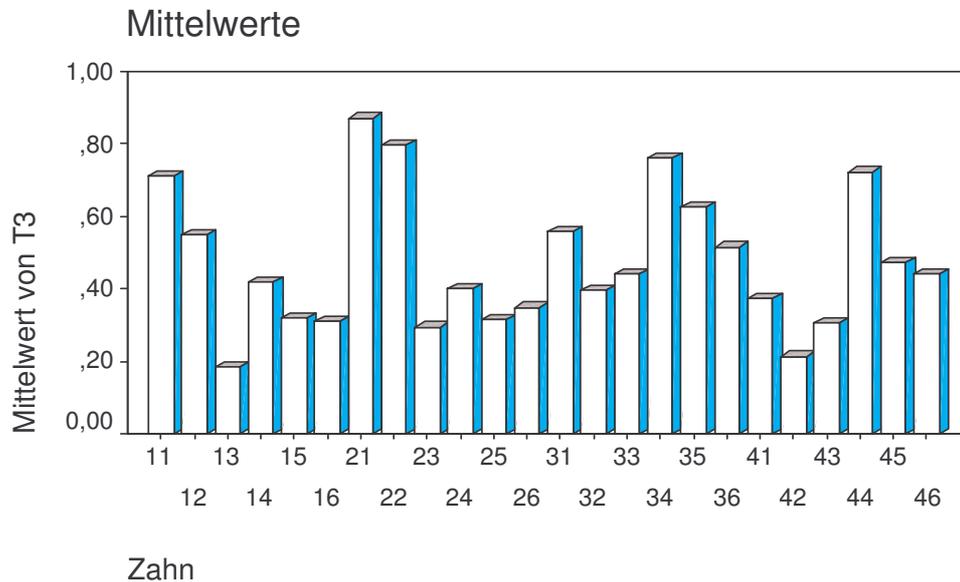


Diagramm 15: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen der einzelnen Zähne bei T3

Die mittleren Inzisivi der Maxilla werden signifikant häufiger resorbiert als die Vergleichszähne.

Bei einem Patienten zeigt sich Resorptionsgrad 4 am Zahn 11, allerdings schon vor Behandlungsbeginn (siehe Bild 10).



Bild 10: Zahn 11: Resorptionsgrad 4

Hierzu liegen keine Informationen bezüglich eines möglichen Traumas oder anderweitigen Ursachen für dieses heftige Resorptionsgeschehen vor, so dass auf eine Interpretation verzichtet werden muss.

Es kann lediglich bezeugt werden, dass diese massive Verkürzung bei der Behandlung mit Multibandapparatur nicht wesentlich fortschreitet.

Die Autoren stimmen weitestgehend überein, dass Frontzähne resorptionssensitiver als Seitenzähne sind [38, 40, 50]. Dies kann anhand dieser Studie belegt werden. Exemplarisch werden Resorptionen im Stadium 2 am Zahn 21 veranschaulicht (siehe Bild 11).



Bild 11: Zahn 21: Resorptionsgrad 2

Obwohl besonders die Frontzähne im OPG nicht immer präzise abgebildet sind, und so einige Werte verloren gehen, werden genügend Zähne mit Resorptionen registriert, um zu untermauern, wie stark die Oberkieferfront von Wurzelresorptionen betroffen ist.

Auch die lateralen Inzisivi des Oberkiefers zeigen deutlich mehr Resorptionen als der Durchschnitt. Als Beispiel dient hier Zahn 12, der resorptive Prozesse des Grades 1 erfährt (vergleiche Bild 12).



Bild 12: Zahn 12: Resorptionsgrad 1

ALEXANDER und FRITZ et al. unterstreichen ebenfalls die deutliche Resorptionssensibilität der Front, besonders im Oberkiefer [1, 35].

ALEXANDER hebt zusätzlich die besondere Anfälligkeit der seitlichen Oberkiefer-schneidezähne hervor [1]. Zustimmung erhält er von verschiedenen anderen Autoren [10, 89, 97].

Obwohl in dieser Studie keine spezielle Reihenfolge gebildet wird, weisen Tendenzen darauf hin, dass die mittleren vor den seitlichen Oberkiefer-schneidezähnen die stärksten Wurzelresorptionen erfahren. Das gleiche Fazit ziehen auch BECK und HARRIS [6], ebenso wie JANSON et al. [49] und HARRIS et al. [42]. Dagegen sprechen jedoch SAMESHIMA und SINCLAIR [97], so wie ALEXANDER [1] und BLAKE et al. [10], die den lateralen Inzisivus der Maxilla als anfälligsten deklarieren. Dagegen konstatieren KOOK et al. in ihrer Studie, kleine seitliche Inzisivi unterliegen keinem erhöhten Resorptionsrisiko [57].

Zumal die Reihenfolge stets umstritten ist, kann jedoch recht eindeutig festgehalten werden, dass die Inzisivi der Maxilla sehr empfindlich auf kieferorthopädische Therapie reagieren. Dies liegt wahrscheinlich teilweise an der Kraftapplikation, denn häufig muss auf Grund von Tiefbissen eine Frontintrusion erfolgen. Diese Art der Zahnbewegung gilt als besonders resorptionsfördernd [6, 25, 32, 84].

Aber auch die zum Teil langen Strecken, die die Front verschoben werden muss, sind verantwortlich für verstärkte Resorptionsmuster in dieser Region. Auf die Frontretraktion als Erklärungsmöglichkeit weisen auch SAMESHIMA und SINCLAIR [97], HARRIS et al. [42] und BLAKE et al. [10] hin.

Im Gegensatz zu den Inzisivi weisen die Eckzähne der Maxilla durchschnittlich deutlich weniger Resorptionen als die restlichen Zähne auf, sowohl nach etwa einem halben Behandlungsjahr, als auch nach Ende der Therapie. Als Veranschaulichung wird der Zahn 23 exemplarisch herangezogen (siehe Bild 13).



Bild 13: Zahn 23: keine Resorptionen (Grad 0)

Dieses schwach-resorptionssensitive Verhalten der Oberkiefereckzähne bestätigen unterschiedliche Arbeiten [86, 75, 97].

Verminderte Resorptionsmuster lassen sich am Zahn 25 beobachten. In der Literatur finden sich hierzu nur allgemeine Aussagen, dass Seitenzähne weniger stark resorbiert werden [38, 40, 50]. Dieser zufällige Befund tritt nur zum Zeitpunkt T2 auf. Am Behandlungsende entsprechen die Resorptionen dem Durchschnitt.

Eine mögliche Begründung könnte das häufige Auftreten von Überlagerungen mit Kieferhöhlenstrukturen sein, wodurch die Wurzel unklar abgebildet wird und fehlende Werte entstehen. Des weiteren erfährt dieser Zahn kaum nennenswerte orthodontische Bewegung. Dennoch stellt sich die Frage, wieso diese Minderresorption nur linksseitig auftritt.

Verstärkte apikale Wurzelverkürzungen sind in dieser Arbeit bei den beiden ersten Prämolaren der Mandibula zu verzeichnen. Resorptionsgrad 1 am Zahn 44 wird in einem Beispiel verdeutlicht (siehe Bild 14).



Bild 14: Zahn 44: Wurzelresorptionsgrad 1

In der Literatur werden die ersten Prämolaren gern zur histologischen Untersuchung herangezogen, so dass keine Vergleiche mit den anderen Zähnen möglich sind. Weiterhin beschränken sich die meisten Studien auf die Analyse weniger Zähne (meist Frontzähne), so dass sich die Vergleichsmöglichkeiten weiter einschränken. Eine Studie von McNAB et al. beschäftigt sich mit dem Vergleich einzelner posteriorer Zähne und stellt heraus, dass die ersten Prämolaren des Unterkiefers zwar stärker resorbiert werden als Prämolaren im Oberkiefer, jedoch unterliegen hier besonders die Unterkiefermolaren den stärksten Resorptionsprozessen [73]. Dagegen sprechen SAMESHIMA und SINCLAIR, die für erste und zweite Prämolaren keine Unterschiede feststellen und generell nur dezente Resorptionen bei den Seitenzähnen messen [97].

Eine Front- und Seitenzähne umfassende Studie, die weitere Variablen miteinbezieht, zum Beispiel Behandlungsmethoden, Apparaturen, Kraftapplikation und Bewegungsausmaß für die einzelnen Zähne, wäre in der Lage hierzu nähere Erklärungen zu geben.

Die Molaren zeigen in dieser Arbeit ebenfalls nur unauffällige, durchschnittliche Resorptionsmuster. Sowohl unbeschädigte Wurzeln, zum Beispiel des Zahns 46 (siehe Bild 15), als auch resorptive Veränderungen, beispielsweise am Zahn 36, können veranschaulicht werden (siehe Bild 16).



Bild 15: Zahn 46, keine Resorptionen (Grad 0)



Bild 16: Zahn 36: Resorptionsgrad 2

Bei Zahn 42 erweisen sich die Wurzelresorptionen als geringer verglichen mit dem Durchschnitt.

Dieses Ergebnis geht konform mit dem Befund der Studie von JANSON et al. [49]. Die Autoren finden den seitlichen unteren Schneidezahn als am geringsten resorbiert, beschränkten die Gegenüberstellung jedoch auf die Inzisivi beider Kiefer [49].

Dieser Aussage von JANSON et al. stimmen auch SAMESHIMA und SINCLAIR zu [97]. BLAKE et al. finden dagegen geringfügig mehr Resorptionen bei lateralen unteren Schneidezähnen als bei den zentralen [10].

Verwunderlich bleibt aber, wieso in der vorliegenden Studie lediglich der rechte laterale Unterkieferinzisivus heraussticht. Anzumerken ist, dass die Unterkieferfront im Orthopantomogramm oft unscharf zur Darstellung kommt [16, 96], mit der Folge, dass einige Werte fehlen. Durch das Verwenden fehlender Werte bei nicht klar erkennbarem Parodontalspalt wird die Resorptionsrate nicht überschätzt, sondern der Mittelwert der Wurzelresorptionen sinkt.

Im Großen und Ganzen gibt es nur wenige Studien, die eine große Auswahl von Zähnen miteinander vergleichen. Überwiegend gestaltet sich ein direkter Vergleich als schwierig, da spezielle Gruppen herausgefiltert werden, bedingt durch die geringe Anzahl vorhandener Röntgenbilder, beziehungsweise eine restriktive Anfertigung derselben aus strahlenhygienischen Gründen.

Festzuhalten bleibt jedoch, dass in dieser Studie vorherige Ergebnisse [1, 35, 89, 97] insofern bestätigt werden, dass die Inzisivi der Maxilla am schwersten von Wurzelresorptionen beeinträchtigt werden.

6.7 Vergleich der Wurzelresorptionen verschiedener Zahngruppierungen

Um herauszufinden, ob sich Seitenunterschiede oder Diskrepanzen zwischen den beiden Kiefern oder den einzelnen Quadranten ergeben, prüft der Mann-Whitney-U-Test die Resorptionsverteilung dieser Gruppen.

6.7.1 Oberkiefer – Unterkiefer:

Zwischen Maxilla und Mandibula werden keine signifikanten Unterschiede errechnet (siehe Tabelle 12).

Vergleich der Mittelwerte der Wurzelresorptionen des OK und UK

Tabelle 12

	T1	T2	T3
Oberkiefer	0,039	0,45	0,46
Unterkiefer	0,034	0,40	0,48

Diese Aussage stimmt auch mit den Ergebnissen von GÖZ und RAKOSI überein [38]. In einer Studie erläutern SAMESHIMA und SINCLAIR, dass sie bei den Seitenzähnen ebenfalls keine Unterschiede zwischen Ober- und Unterkiefer ausmachen, die Frontzähne jedoch im Oberkiefer mehr resorbiert werden [97].

Dieses Resümee kann auch die aktuelle Arbeit ziehen, denn allgemein ergeben sich keine Unterschiede zwischen den Kiefern. Jedoch stellt die nähere Untersuchung einzelner Zähne die Oberkieferinzisivi als die meist betroffenen heraus (vergleiche 6.6.4).

Dass Frontzähne des Oberkiefers mehr resorbieren als die der Mandibula, bestätigen diverse Studien [1, 35, 49, 89, 96, 97]. Jedoch werden nur selten die kompletten Kiefer gegenübergestellt.

McNAB et al. untersuchten Seitenzähne. In ihrer Ergebnisliste werden Unterkiefermolaren als tendenziell stärker resorbiert herausgestellt [73].

6.7.2 Rechte Seite – linke Seite:

Diese Untersuchung beschreibt einen signifikanten Seitenunterschied zum Ende der Behandlungsphase (T3) mit festsitzenden Geräten. Stärkere Wurzelverkürzungen treten auf der linken Seite auf (vergleiche Diagramm 3, Punkt 5.7.2).

SAMESHIMA und SINCLAIR dagegen halten beide Seiten für gleich resorptions-sensibel [97]. McNAB et al. finden bei Unterkiefermolaren Diskrepanzen der beiden Seiten, die sie jedoch durch statistische Artefakte erklären, denn die Werte der restlichen Zähne deuten nicht auf Seitendifferenzen hin [73].

Seitenunterschiede lassen sich kaum durch intraindividuelle Schwankungen erklären, insofern sich nicht Traumata oder ähnliche Ausnahmen ereignen. Als Erklärung wird hier angenommen, dass es sich eher um Behandlungsfolgen handelt.

Da die meisten Behandler rechtshändig arbeiten, bleibt die linke Seite stets schwieriger einzusehen, beziehungsweise zu erreichen als die rechte. Deshalb kommt es vermutlich links eher zu Klebefehlern der Brackets. Diese müssen korrigiert werden, wodurch diese Zähne letztlich mehr bewegt werden. Auf diese Weise erklären sich die links häufiger auftretenden Wurzelresorptionen.

6.7.3 Quadrantenvergleich:

Der Vergleich der Quadranten dient lediglich als Bestätigung, dass links mehr apikale Resorptionen als auf der rechten Seite erscheinen. So überwiegen die Wurzelverkürzungen im zweiten und dritten Quadranten gegenüber denen im ersten. Auch treten im dritten Quadranten signifikant mehr resorptive Prozesse auf als im vierten (vergleiche auch Tabelle 9, Punkt 5.7.3). Zusätzlich untermauert diese Aussage, dass Ober- und Unterkiefer im Ganzen betrachtet keinem signifikanten Unterschied bei resorptiven Geschehnissen unterliegen (siehe ebenso 6.7.1).

6.8 Bogenwechsel

Die Anzahl der Bogenwechsel gibt oft einen Hinweis darauf, wie umfangreich die Behandlung im Einzelfall ausfällt. So wird nicht nur auf die Behandlungsdauer, sondern partiell auch auf die Komplexität eingegangen.

Zum Einfluss der Bogenwechsel werden in der Literatur keine Angaben gemacht.

6.8.1 Oberkiefer – Unterkiefer:

Im Unterkiefer finden im Durchschnitt 3,65 Bogenwechsel statt. Im Oberkiefer dagegen werden mit einem Wert von 4,14 die Bögen deutlich häufiger ausgetauscht. Dieser Unterschied liegt wahrscheinlich an der schwierigeren Einordnung, beziehungsweise Retraktion der Inzisivi der Maxilla, da mehr Zahnbewegung erfolgen muss, besonders bei Extraktionsfällen.

Diese Arbeit kann jedoch ebenfalls zeigen, dass dadurch nicht vermehrt Wurzelresorptionen auftreten, denn es liegen keine allgemeinen Resorptionsunterschiede zwischen den beiden Kiefern vor (vergleiche 6.7.1).

6.8.2 Extraktionsfall – Non-Extraktionsfall:

Ein Mittelwert von 4,57 ergibt sich für die Bogenwechsel bei den Extraktionsfällen, während bei Non-Extraktionsfällen mit 3,56 signifikant weniger Bogenwechsel stattfinden. Es zeigen sich jedoch keine resorptiven Differenzen bei Extraktions- und Non-Extraktionsfällen (vergleiche 6.3.1). Es ist einsichtig, dass bei der komplizierteren Behandlungsaufgabe eines Extraktionsfalles öfter Bogenwechsel erfolgen als bei einfacheren Therapien.

Sowohl der Vergleich des Ober- und Unterkiefers, als auch die Gegenüberstellung der Extraktions- und Non-Extraktionsfälle zeigt, dass zumindest bei gering differierender Anzahl von Bogenwechseln (+/- 1) nicht mehr Wurzelverkürzungen zu erwarten sind.

6.8.3 Geschlechter:

Der Geschlechtsunterschied bedingt keine Auswirkung auf die Anzahl der Bogenwechsel. Dieses Ergebnis ist auch zu erwarten, weil bei den Resorptionsmustern keine Unterschiede in Erscheinung treten (vergleiche 6.2).

6.8.4 Lange – kurze Behandlungsdauer:

Grundsätzlich legt diese Studie eine hoch signifikant größere Anzahl durchschnittlicher Bogenwechsel bei langer Therapiedauer (5,31) gegenüber kurzer Behandlungszeit (2,52) dar.

Im Mittel ergeben sich bei langer Therapiedauer mehr als doppelt so viele Bogenwechsel wie bei kurzer Behandlungszeit. Dieser eklatante Unterschied passt zu dem vorherigen Ergebnis, dass mehr Bogenwechsel bei Extraktionsfällen vorkommen als bei Non-Extraktionsfällen (siehe 6.8.2) und dass die Extraktionstherapie mehr Zeit in Anspruch nimmt (vergleiche 6.3.1). Längere Therapien auf Grund von Prämolarextraktionen heben auch SAMESHIMA und SINCLAIR hervor [98].

6.8.5 Vergleich der Wurzelresorptionen bezogen auf die Anzahl der Bogenwechsel:

Laut Mann-Whitney-U-Test erfolgen bei Messung zum Zeitpunkt T2 bei 0-5,5 Bogenwechseln mehr Resorptionsvorgänge als bei 5,51-11 Bogenwechseln (vergleiche Tabelle 10, Punkt 5.8.5).

Beim Vergleich diverser anderer Einteilungen der Bogenwechsel in Kategorien, kann jedoch nicht verifiziert werden, dass bei mehr Bogenwechseln weniger Resorptionen auftreten. Ergo wird davon ausgegangen, dass es sich um ein statistisches Artefakt handelt. Dennoch wird das Phänomen der gesteigerten Resorptionen bei T2, obwohl weniger Bogenwechsel vorgenommen werden und die Therapiezeit entsprechend kürzer ist, bei der Untersuchung der Therapiedauer noch aufgegriffen (siehe 6.9.3).

Somit konstatieren die Resultate bezüglich der Bogenwechsel, dass zwar bei Extraktionsfällen und im Oberkiefer häufiger Bogenwechsel stattfinden, dies jedoch ohne Einfluss auf die Wurzelresorptionen bleibt.

Die Auswirkung der erhöhten Anzahl der Bogenwechsel und die damit verbundene längere Behandlungsdauer auf das Ausmaß der Wurzelresorptionen, behandelt folgender Absatz.

6.9 Behandlungsdauer

6.9.1 Kurze Therapien:

Bei kurzen Therapien legt die vorliegende Arbeit signifikante Unterschiede zwischen den Wurzelresorptionen zu Beginn der Behandlung und nach ungefähr halbjähriger Behandlung, beziehungsweise Abschluss der Therapie, offen. Zu T1 lassen sich wesentlich weniger apikale Verkürzungen erkennen, als jeweils zu T2 und T3.

Diese beiden Zeitpunkte (T2 und T3) differieren untereinander bezüglich der Resorptionsprozesse nicht signifikant (vergleiche Diagramme 4-6, Punkt 5.9.1).

Kurze Therapien dauern etwa 261 bis 642 Tage, wobei letzterer Wert etwa den Mittelwert der Behandlungsdauer aller Zähne ausmacht.

Diese Ergebnisse lassen folgern: Wurzelresorptionen, die nach etwa einem halben Jahr vorliegen, werden im Durchschnitt nicht oder nicht wesentlich weiter fortschreiten, wenn die Therapiezeit kurz (id est unter zwei Jahren) bleibt. Jedoch sollte der Behandler stets sein Augenmerk auf den Umfang anfänglicher Resorptionen und auch auf die großen individuellen Schwankungen richten.

Die Tendenz zum Fortschreiten der Wurzelresorptionen zu untersuchen, ist ebenfalls Ziel dieser Studie (siehe dazu 6.10).

In der Literatur wird nicht explizit auf lange oder kurze Behandlungen im Besonderen eingegangen, sondern lediglich auf den Vergleich (siehe 6.9.3).

6.9.2 Lange Therapien:

Bei langen Behandlungen zeigen sich ebenfalls hoch signifikante Unterschiede zwischen Therapiebeginn und T2, beziehungsweise T3.

Zusätzlich liegen hier jedoch mehr apikale Resorptionen zum Ende der Therapie vor als nach halbjähriger Behandlung (siehe Diagramme 16-18).

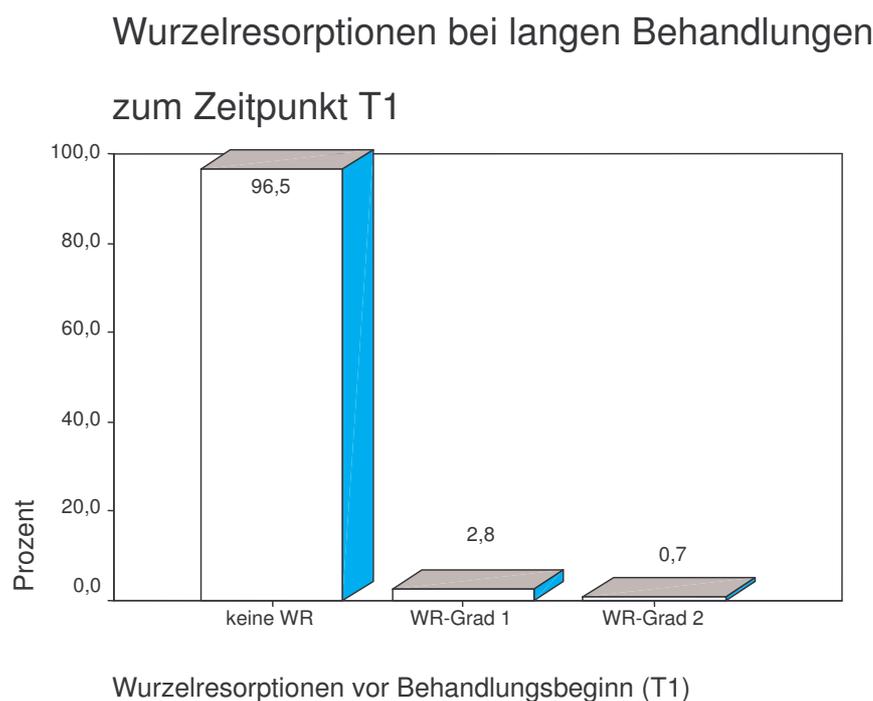
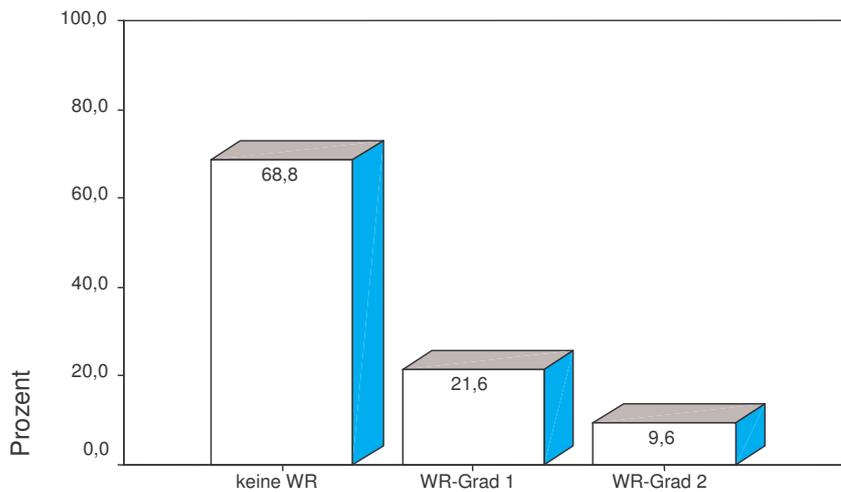


Diagramm 16: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen bei langen Behandlungen zum Zeitpunkt T1

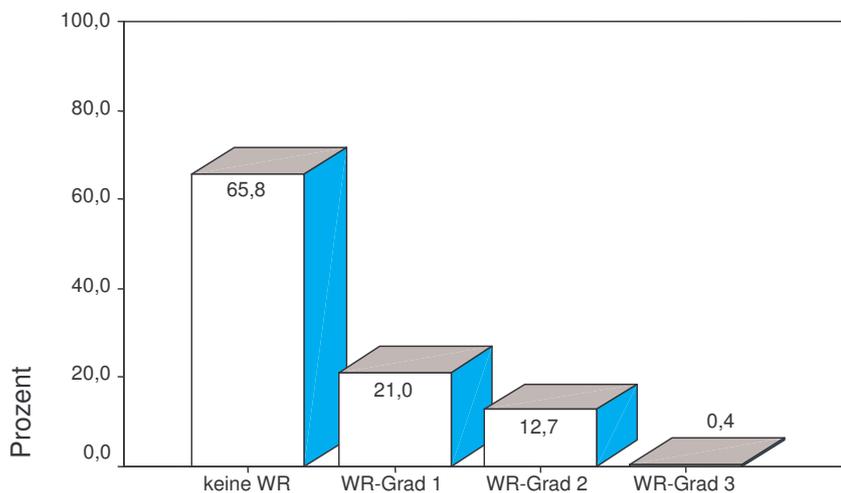
Wurzelresorptionen bei langen Behandlungen zum Zeitpunkt T2



Wurzelresorptionen 4-10 Mon nach Behandlungsbeginn (+/-20Tage) (T2)

Diagramm 17: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen bei langen Behandlungen zum Zeitpunkt T2

Wurzelresorptionen bei langen Behandlungen zum Zeitpunkt T3



Wurzelresorptionen ab 1 Mon + 14 Tage vor Multiband (MB)-ex (T3)

Diagramm 18: Balkendiagramm der Wurzelresorptionen bei langen Behandlungen zum Zeitpunkt T3

Diese Beobachtung wird durch das Gesamtergebnis dieser Studie bestätigt (vergleiche 6.4).

Eine diesbezügliche Übereinstimmung ergibt sich mit GÖZ und RAKOSI, in deren Studie eine längere Behandlung das Risiko für Wurzelresorptionen erhöht [38].

Zustimmen können hier TAITHONGCHAI et al., die ebenfalls eine signifikante Verknüpfung von Therapiezeit mit Wurzelresorptionen feststellen. Sie legen dar, dass dieser Umstand zwar am besten geeignet ist, um Resorptionsgeschehen vor der Behandlung abzuschätzen, jedoch nur ein geringes Ausmaß der Variabilität der Resorptionen bedingt [107].

Ähnlich argumentieren auch COSTOPOULOS und NANDA. Sie erkennen lediglich einen schwachen Zusammenhang zwischen längeren Behandlungszeiten und erhöhten Resorptionen bei Intrusion und vermuten deshalb, dass zusätzlich diverse andere Faktoren verantwortlich sind [25].

Es ist also besonders bei abzusehender längerer Behandlung darauf zu achten, dass anfängliche Wurzelresorptionen – die auf der Kontrollaufnahme nach einem halben Therapiejahr erscheinen – höchstwahrscheinlich fortschreiten werden. Welches Ausmaß diese resorptiven Aktivitäten annehmen, bleibt sehr variabel, da viele weitere Faktoren mitwirken.

6.9.3 Vergleich zwischen langen und kurzen Therapiezeiten:

Beim Vergleich der oben genannten zwei Kategorien, werden bezüglich der Wurzelresorptionen keine Diskrepanzen festgestellt. Lediglich die Extraktions- und Non-Extraktionsfälle unterscheiden sich hier signifikant, da bei Extraktionsfällen durchschnittlich länger behandelt wird (vergleiche 6.3.1).

Dieses Ergebnis findet breite Zustimmung in der Literatur. So können JANSON et al. keine von der Therapiedauer abhängige Steigerung der resorptiven Prozesse aufdecken [49].

Auch FRITZ et al. beschreiben bei Behandlung in Lingualtechnik keine Resorptionsmaximierung bei längerer Behandlung [35].

Andere Autoren, zum Beispiel BRIN et al., erläutern im Gegensatz dazu eine Erhöhung der Wurzelresorptionsrate bei längerer Therapiezeit [16].

Wird die Behandlungsdauer in dieser Studie in fünf Kategorien unterteilt und die jeweils höchste (838–2370 Behandlungstage) und niedrigste (261–402 Behandlungstage) Kategorie verglichen, so ergibt sich lediglich bei T2 ein signifikanter Unterschied. Kurze Therapien erscheinen hier mit mehr Wurzelresorptionen als lange Behandlungen.

In dieser Arbeit relativiert sich nach Beendigung der Therapie der Unterschied zwischen langer und kurzer Behandlung wieder, denn bei T3 lassen sich auch in dieser Kategorisierung keine Differenzen mehr erkennen.

RUPP berichtet in seinem Literaturreückblick über diverse Autoren (wie etwa BECK und HARRIS [6] oder LINGE und LINGE [66]), die keine Resorptionsunterschiede bei langer und kurzer Therapie feststellen, aber auch über eine andere Studie, die von verstärkten resorptiven Wurzelverkürzungen bei längerer Therapie berichtet [94].

Dass erhöhte Wurzelresorptionen bei kürzerer Behandlungszeit entsprechend weniger Bogenwechsel (vergleiche 6.8.5) auftreten, wird in der Literatur nicht bestätigt. Ebenso widerlegt vorliegende Studie selbst dieses Resultat, denn bei zwei Kategorien fallen im Vergleich die Resorptionsausmaße nicht signifikant unterschiedlich aus. Vermutlich ist dieses Ergebnis sowohl auf statistische Artefakte durch die verschiedentliche Kategorisierung, als möglicherweise auch auf anfänglich reduzierte Kraftapplikation bei längeren Therapien zurückzuführen.

Denn bei Extraktionsfällen (ergo längerer Behandlung) werden die größten und damit laut PARKER und HARRIS resorptionsprovozierendsten Zahnbewegungen [84] erst nach Entfernung der entsprechenden Zähne erfolgen. Dies geschieht jedoch nicht unbedingt zu Beginn der Multibandtherapie. Dadurch erhöht sich erstens die Therapiezeit und zweitens treten Wurzelresorptionen vermutlich erst später, bei erhöhter Zahnbewegung und Kraftaufwendung, vermehrt auf.

Bei kurzen Therapien konzentrieren sich alle Kraftapplikationen und Zahnbewegungen stärker auf die erste Therapiezeit. Einige Studien bestätigen, dass erhöhte Kraftausübung [15, 41] sowie gesteigerte Zahnbewegung [56, 66] Wurzelresorptionen anregen.

REMINGTON et al. berichten über Reparaturen, Remodellation rauer Kanten und Wiederherstellung der physiologischen Breite des Parodontalspaltes nach Ende der Therapie [89]. Diese Prozesse zusammengenommen mit einer radiologisch etwas anderen oder ungenaueren Abbildung können ebenfalls schnell zur Fehleinschätzung apikaler Resorptionen führen. Darauf gründen sich geringere Werte für T3, so dass längere Behandlungen gefahrloser zu sein scheinen.

In dieser retrospektiven Untersuchung wird auf Grund des ansehnlichen Umfangs nicht zusätzlich auf die verwendeten Behandlungstechniken und Drahtbeschaffheiten und deren Anwendungszeit eingegangen, was jedoch für die Erläuterung solcher Befunde sinnvoll wäre.

So schließt sich diese Arbeit der Aussage von LEVANDER et al. an, die ihre Ergebnisse dahingehend interpretieren, dass die Gesamtbehandlungszeit nicht ausschlaggebend ist, sondern eher die Behandlungsdauer mit den einzelnen Geräten [65] und auch die Art der Behandlung.

Jedoch sollte bei langen Behandlungen (mehr als zwei Jahre Therapie mit feststehendem Gerät) beachtet werden, dass Wurzelresorptionen, wenn sie sich schon nach einem halben Jahr ankündigen, in den meisten Fällen fortschreiten. So muss ein Therapiekonzept für längere Behandlungen dieses Risiko von Beginn an einbeziehen und die gesamte Behandlung darauf ausgerichtet sein, massive Wurzelverkürzungen zu vermeiden.

6.10 Vergleich verschiedener Patientengruppen

Um das Fortschreiten der Wurzelresorptionen nach einem halben Jahr Therapiedauer abzuschätzen, werden nachfolgend diverse Patientengruppen untersucht. Dies geschieht sowohl ausgehend vom Zeitpunkt T2, als auch retrospektiv von der Resorptionssituation am Ende der Therapie (T3).

6.10.1 Gruppierung der Patienten durch das Vorhandensein von Resorptionen bei T2:

Patienten ohne Wurzelresorptionen nach halbjähriger Therapie, erwiesen sich auch zum Ende der Behandlung als weitestgehend resorptionsfrei.

Hier muss jedoch beachtet werden, dass sich lediglich eine sehr geringe Patientenzahl absolut resorptionsfrei (bei keinem Zahn Resorptionen ersichtlich) zum Zeitpunkt T2 zeigt. Demnach ist dieses Ergebnis mit Vorsicht zu interpretieren. Es kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass jeder Patient, der anfänglich keine resorptiven Prozesse aufweist, den weiteren Verlauf der Behandlung ohne apikale Wurzelschäden übersteht. Allerdings gibt dieses Ergebnis einen Hinweis darauf, dass das Risiko starker Resorptionen bei solchen Patienten als geringer einzuschätzen ist.

Ein damit korrespondierendes Resultat erzielt eine Studie, in der ebenfalls keine markanten Resorptionen am Behandlungsende zu finden sind, wenn nach ungefähr einem halben Therapiejahr keine resorptiven Wurzelverkürzungen vorliegen [63].

Dem gegenüber stehen in dieser Arbeit solche Patienten, die bei T2 schon Wurzelresorptionen entwickelt haben. Sie demonstrieren am Ende der Behandlung mehr Resorptionen als nach halbjähriger Therapie.

Diese Entwicklung von Wurzelresorptionen nach halbjähriger Therapie bis zum Behandlungsende bestätigen LEVANDER und MALMGREN [63].

Eine weitere Studie ermittelt ähnliche Ergebnisse des Verlaufs apikaler Resorptionsvorgänge bei halbzeitiger Messung und Prüfung nach Therapieende [84].

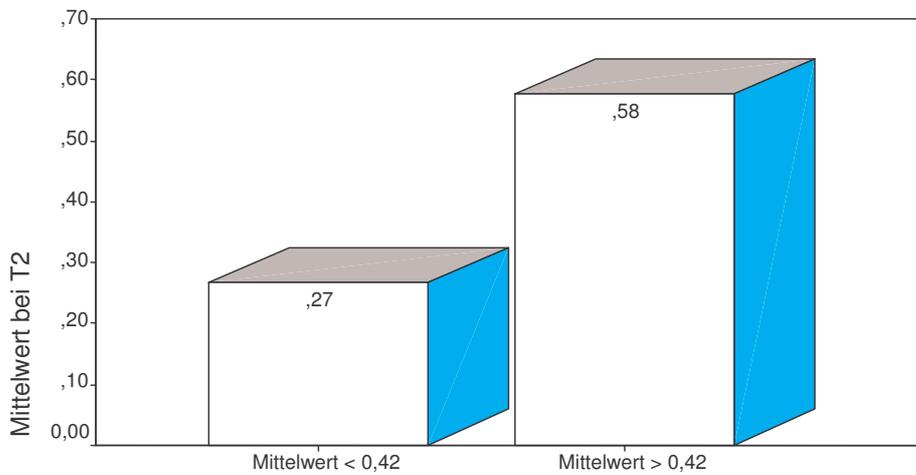
Somit ist festzuhalten, dass in den meisten Fällen anfängliche Wurzelresorptionen (bei T2) Fortschreitendstendenzen (bei T3) erkennen lassen.

Eine statistisch günstigere Aufteilung aus dem Blickwinkel einer ausgeglicheneren Patientenzahl bildet nachstehende Einteilung und Analyse der Patienten.

6.10.2 Aufteilung der Patienten nach dem Mittelwert von T2:

In der ersten Gruppierung sind Patienten mit durchschnittlichen Wurzelresorptionen unterhalb oder gleich dem Mittelwert der Resorptionen aller Patienten bei T2 (0,42) enthalten. Bei diesen Patienten mit reduziertem Resorptionsvorkommen steigern sich die anfänglichen Resorptionen von 0,27 im Mittel noch bis zum Ende der Therapie signifikant auf einen durchschnittlichen Wert von 0,36 (siehe Diagramme 19 und 20).

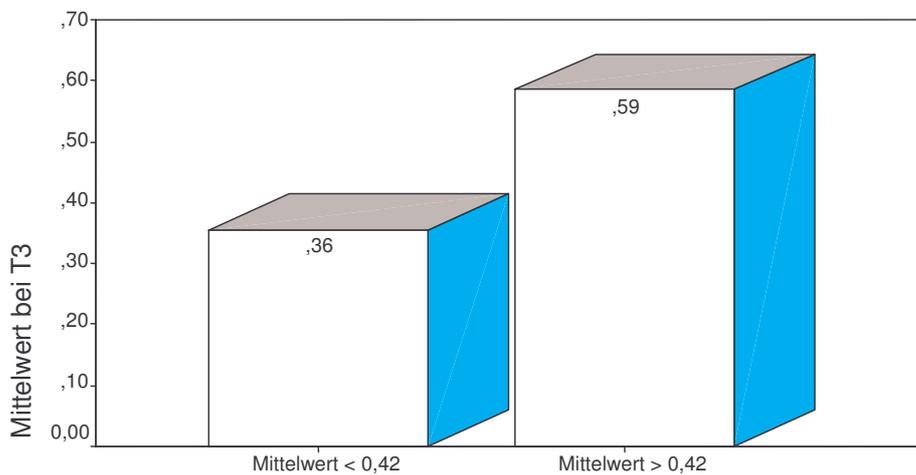
Vergleich der Wurzelresorptionen bei T2 zwischen Patienten mit mehr oder weniger Resorptionen



Zwei Kategorien für Patienten durch den Mittelwert bei T2

Diagramm 19: Balkendiagramm zum Vergleich der Wurzelresorptionen bei T2 zwischen Patienten mit geringen und stärkeren apikalen Resorptionsprozessen zu T2

Vergleich der Wurzelresorptionen bei T3 zwischen Patienten mit mehr oder weniger Resorptionen



Zwei Kategorien für Patienten durch den Mittelwert bei T2

Diagramm 20: Balkendiagramm zum Vergleich der Wurzelresorptionen bei T3 zwischen Patienten mit geringen und stärkeren apikalen Resorptionsprozessen zu T2

Dies bedeutet, dass selbst anfänglich geringe Wurzelresorptionen bis zum Therapieende fortschreiten werden. Somit gelten reduzierte Wurzelresorptionen nach einem halben Therapiejahr nicht als Indiz für generell dezente resorptive Prozesse der Zahnwurzel.

Auch LEVANDER und MALMGREN bestätigen ein Risiko starker Resorptionen, auch, wenn nur leichte Resorptionen nach etwa halbjähriger Therapie vorliegen [63].

Eine anders angelegte Studie von PARKER und HARRIS legt dar, dass sich Wurzelresorptionen, ungefähr zur mittleren Behandlungszeit erfasst, bis zum Ende hin fast verdoppeln [84].

Eine solch exorbitante Progression zeigt vorliegende Untersuchung nicht.

In der resorptionsstärkeren Einheit liegen zum Zeitpunkt T2 schon mehr Wurzelresorptionen vor, als im Gesamtdurchschnitt. Hier ergibt sich jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den resorptiven Prozessen nach halbjähriger (0,58) und nach Beendigung der Therapie (0,59) (vergleiche Diagramme 19 und 20).

Dieses Ergebnis legt nahe, dass stärkere Resorptionsvorgänge nach halbjähriger Therapie bis zum Ende nicht wesentlich fortschreiten. Jedoch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass hier nur die Mittelwerte verglichen werden. Es wäre vorschnell, daraus zu schließen, dass ein individuell geringeres Risiko für ein Fortschreiten der Resorptionen besteht, wenn nach halbjähriger Therapie schon deutliche resorptive Prozesse zu verzeichnen sind.

Auch andere Studien belegen die Progredienz von während der Behandlung entdeckten Wurzelresorptionen [63, 84]. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass die individuelle Variabilität sehr hoch ist und apikale Resorptionsprozesse nicht vorhersagbar sind [53].

Im Zusammenhang mit den anderen Ergebnissen zeigt sich hier lediglich eine Bestätigung anderer Arbeiten, in denen festgehalten wird, dass die ausgeprägtesten Resorptionen häufig zu Beginn der Therapie anfallen [41], da zu diesem Zeitpunkt die Zahnbögen ausgerichtet und die Zähne in eine Reihe gebracht werden, während später nur noch geringere Korrekturen nachfolgen [6].

6.10.3 Strukturierung der Patienten nach dem Mittelwert von T3:

Die Patienten mit weniger apikalen Resorptionen zum Abschluss der Behandlung (unterhalb des Mittelwertes von 0,47) bilden eine Gruppe, in der rückblickend nach halbjähriger Therapie nicht signifikant differierende Resorptionswerte vorliegen.

Dies ergänzt und bestätigt die Ergebnisse des obigen Abschnittes (siehe 6.10.1), die auch LEVANDER und MALMGREN errechnen [63].

Treten in vorliegender Untersuchung zum Behandlungsende mehr Resorptionen als im Durchschnitt auf (über dem Mittelwert von 0,47), so wird retrospektiv für diese Patienten ein geringerer Wert von 0,50 bei T2 errechnet.

Hier erhöhen sich also die Wurzelresorptionen von T2 noch weiter bis zum Therapieende auf durchschnittlich 0,64.

Es zeigt sich also hier abermals (vergleiche 6.10.1), dass deutliche apikale Resorptionen zu T2 im Laufe der weiteren Behandlung fortschreiten und erhöhte Wurzelverkürzungen nach sich ziehen. Dies verdeutlicht sehr anschaulich ein Beispiel des Zahnes 46 einer Patientin. Nach einem halben Jahr Behandlung sind nur dezente apikale Veränderungen (Grad 1) zu sehen, die sich bis zum Zeitpunkt T3 zu Grad 3 weiterentwickeln (vergleiche Bilder 17 und 18).

Auch hier stimmt das Fazit mit anderen Untersuchungen überein [63, 84].



Bild 17: Zahn 46:
Resorptionsgrad 1

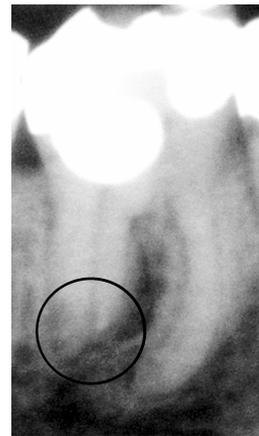


Bild 18: Zahn 46:
Resorptionsgrad 3

Da wenige Studien sich mit der Erfassung von Resorptionen zu bestimmten Zeitpunkten während der kieferorthopädischen Behandlung befassen und dann meist nur ausgewählte Zähne auswerten, ist hier lediglich der Vergleich mit einer entsprechend geringen Anzahl möglich. Dennoch stimmen die Ergebnisse weitestgehend überein, so dass sie aussagekräftig werden.

6.11 Kontrolluntersuchung, Fehleranalyse, Validität

Es handelt sich in der vorliegenden Studie um die subjektive Beurteilung eines einzigen Untersuchers, die mit Zurückhaltung zu akzeptieren ist, auch wenn stets gewissenhaft Genauigkeit und Objektivität gewahrt werden.

Ein Vorteil nur eines Untersuchers für die Analyse zu allen drei Zeitpunkten bleibt jedoch die bessere Vergleichbarkeit der Daten untereinander, da nicht zusätzlich die Variable verschiedener Untersucher berücksichtigt werden muss.

Ein Teil der Variabilität bei den Ergebnissen der Resorptionswerte hängt von der Untersuchungsmethode ab. Bei Zahnfilmen wird detaillierter resorptives Geschehen aufgedeckt als bei Panoramaschichtaufnahmen. Auf letzteren kann das Ausmaß der Resorptionen, auch durch den aufnahmebedingten Vergrößerungsfaktor, leicht überschätzt werden [96].

Histologisch gesehen, ist fast jeder Zahn betroffen [92].

Periapikale Zahnfilme sind in der Literatur als überlegenes Röntgenverfahren angegeben [15]. Diese lagen in dieser retrospektiven Arbeit jedoch nur sehr vereinzelt vor, so dass auf die Übersichtsaufnahme zurückgegriffen wird. Fehlende Werte durch Verzerrungsfehler, Überlagerungen anderer Strukturen und andere Abbildungsfehler sind in Kauf zu nehmen, da aus strahlenhygienischen Gründen nicht bei jedem Patienten zu diversen Zeitpunkten ein kompletter Zahnstatus auf Zahnfilmen angefertigt wird, insbesondere nicht bei Kindern.

Die Standardisierung der Röntgenmethode bei den Panoramaschichtaufnahmen garantiert nicht, dass jeder Zahn präzise abgebildet wird. Besonders Zähne in Kippständen begründen Artefakte und verleiten zu falschen Ergebnissen (vergleiche Bild 8, Punkt 4.5.3). In dieser Untersuchung wird stets auf die durchgängige Erkennbarkeit des Parodontalspaltes geachtet, um Resorptionen von Abbildungsfehlern zu unterscheiden.

Auf einem Röntgenbild erkennbare Resorptionen haben meist schon ein gewisses Stadium erreicht [15]. Das bedeutet, dort entdeckte Resorptionen liegen dann auch real vor. Werden apikale Wurzelresorptionen auf einem Panoramaschichtbild nicht entdeckt, so ist immer noch eine gewisse Wahrscheinlichkeit gegeben, dass trotzdem apikale Resorptionsprozesse stattfinden.

Um diese röntgenologisch aufzuspüren, müsste man jedoch Zahnfilme untersuchen. Diese Röntgentechnik wird aber sparsam angewendet, um die Strahlungsbelastung besonders junger Menschen gering zu halten.

Wird letztlich Wert auch auf kleinste resorptive Veränderungen gelegt, so müssen histologische Studien durchgeführt werden.

6.11.1 Prozentuale Übereinstimmung der Analysen:

Bei der Ermittlung der gültigen Prozente, ergibt sich ein Wert von 73,7% der übereinstimmenden Werte (siehe Tabelle 11, Punkt 5.11.1).

Eine Untersuchung mit apikalen Zahnfilmen erreichte eine etwas höhere, jedoch vergleichbare Übereinstimmungsrate von 84% [65]. Da Zahnfilme den Apex detailgetreuer darstellen als Orthopantomogramme, erklärt sich auch die größere Genauigkeit bei der Auswertung.

6.11.2 Wilcoxon-Test zwischen Erst- und Kontrolluntersuchung:

Der Wilcoxon-Test wird eingesetzt, um die Mittelwerte der Erst- und der Kontrollanalyse zu vergleichen. Die Durchschnittswerte aller 25 Patienten zeigen keine signifikanten Unterschiede. Auch die einzelnen Mittelwerte der Erstuntersuchung und der Überprüfung pro Patient verhalten sich gleichermaßen.

Zur genaueren Prüfung wird die Übereinstimmung nach der Formel von DAHLBERG [27] getestet.

6.11.3 Überprüfung nach Dahlberg:

Auf Grund der Schwierigkeit, auf dem Panoramabild präzise Informationen über die Wurzelverkürzung zu gewinnen, werden die apikalen Veränderungen hier nicht metrisch, sondern in Resorptionsstadien eingeteilt. Auch andere Autoren empfehlen dies [38] und verwenden selbst diese Aufteilung [6, 40, 41, 63, 65, 89].

Die Analyse der Kontrolluntersuchung von 25 Patienten, beziehungsweise 25 Orthopantomogrammen, nach DAHLBERG [27], bekräftigt mit einer Standardabweichung des Methodenfehlers von 0,45 Wurzelresorptionsgraden die ausreichende Messgenauigkeit dieser Studie.

Ein direkter Vergleich des berechneten Wertes ist nicht möglich, da die Studien, die die Einteilung in Stadien vorziehen, mit von dieser Arbeit abweichenden Methoden die Reproduzierbarkeit ihrer Ergebnisse messen.

6.12 Schlussfolgerungen und praktische Konsequenzen

Apikale Wurzelresorptionen bilden eine der häufigsten und vielfach untersuchten Nebenwirkungen der kieferorthopädischen Zahnregulierung, besonders bei festsitzenden Geräten. Ausschließlich die Kieferorthopädie nutzt als Therapieform die entzündlichen, resorptiven Prozesse in Umgebung der Zahnwurzel, um das Behandlungsziel eines funktionellen und ästhetischen Gebisses zu erreichen.

Jedoch bei jeder Zahnbewegung kommt es zu resorptiven Prozessen [38]. Hier ist aber lediglich deren Ausmaß und Progredienz von wesentlichem Interesse.

Minimale Defekte durch angegriffene Wurzeloberflächen sind vertretbar, zumal auch Reparaturmechanismen einsetzen [82, 103]. Apikale Wurzelverkürzungen bleiben allerdings im allgemeinen irreparabel [38]. Dennoch sind auch hier dezente Ausmaße akzeptabel.

Betrachtet man die Wurzelresorptionen aus der Sicht der parodontalen Aufhängung und der Funktionalität des Zahnhalteapparates, so geht nach KALEY und PHILLIPS ein apikaler Wurzelverlust von 3 mm mit einem marginalen Knochen- beziehungsweise Attachmentverlust von 1 mm einher [51], so dass der apikale Wurzelteil bei der Zahnbefestigung eine unwichtigere Rolle spielt [38, 51, 89].

Problematisch zeigte sich in den letzten Jahrzehnten erneut die Risikoabschätzung solcher Patienten, die schweren Resorptionsprozessen unterliegen.

Obwohl selbst stark resorbierte Zähne laut REMINGTON et al. auch Jahre nach Abschluss der kieferorthopädischen Behandlung noch in angemessener Art und Weise ihrer Funktion nachkommen [89], soll die Vermeidung oder zumindest die Minimierung schwerwiegender Wurzelresorptionen stets wichtiger Aspekt bei der orthodontischen Behandlung bleiben.

Bisher suchen diverse Autoren nach Optionen, vor der Behandlung Risikofaktoren aufzuspüren und besonders gefährdete Patienten zu erkennen. Es gelingt ihnen die Aufdeckung kleinerer Anteile des Spektrums des Resorptionsrisikos [61, 65, 73, 97]. So erkennen verschiedene Autoren, dass Wurzelresorptionen vor Behandlungsbeginn ein Risiko weiterer oder verstärkter resorptiver Prozesse während der Behandlung bergen [15, 29, 62, 92].

Es werden zudem bestimmte Behandlungsfaktoren für erhöhte Wurzelresorptionen entdeckt [94, 80, 51, 83, 79, 52, 98]. Auch wird oftmals über die interindividuellen Variabilitäten [53, 84] und auch ungeklärte idiopathische Wurzelresorptionen [26, 104] berichtet.

Nachdem bei einer radiologischen Kontrolle nach dreimonatiger Behandlung kaum Wurzeln resorbiert werden, konstatieren LEVANDER et al. den geringen Wert einer solchen Aufnahme, die sich nur bei Zähnen empfiehlt, die schon vor der Therapie Resorptionen aufweisen. Sie erkennen die Kontrollaufnahme nach einem halben Therapiejahr aber als sinnvoll an [62]. Auch SECTAKOF und SELNES empfehlen das Erstellen von adäquaten Unterlagen, wie regelmäßige Röntgenaufnahmen, zur Kontrolle der Wurzelresorptionen [100]. Eine weitere Untersuchung bestätigt, dass auf Röntgenbildern, die nach einem halben Behandlungsjahr angefertigt werden, apikale Resorptionen erkennbar und somit diese Aufnahmen sinnvoll sind [64].

Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich darauf, ob während der kieferorthopädischen Behandlung mit festsitzender Apparatur direkte Indizien beim Individuum selbst auftauchen, die eine Abschätzung des Auftretens von Wurzelresorptionen und deren Progredienz zulassen.

Schlussfolgerungen:

Bei männlichen und weiblichen Patienten spielen sich in dieser Studie ähnliche Resorptionsprozesse ab.

In der Poliklinik für Kieferorthopädie Düsseldorf wird bei etwa 28,7% der Kiefer eine Extraktionstherapie vollzogen. Die Therapien bei den Extraktionsfällen dauern signifikant länger als die Behandlungen ohne Extraktionen bleibender Zähne. Dies ist zurückzuführen auf die komplexeren Zahnbewegungen über größere Distanzen zwecks Lückenschluss, die mit kleinen Kräften erreicht werden.

Dennoch finden sich in der Gegenüberstellung ähnliche Wurzelresorptionen bei Extraktions- und Non-Extraktionsfällen.

Normale Wurzelformen differieren bezüglich der apikalen Resorptionen nicht von stumpfen, pipettenförmigen, verkürzten oder apikal abgeknickten Wurzeln. Wurzeln mit Taurodontismus resorbieren hier stärker, jedoch ist das Ergebnis sehr zurückhaltend zu werten, da dies lediglich bei zwei Zähnen eines Patienten auftaucht. Stumpfe Wurzeln tendieren zu Therapiebeginn zu stärkeren Resorptionen, jedoch gleichen sich diese bis zum Ende der Therapie den Durchschnittswerten an. Bezüglich der Abhängigkeit der Resorptionen von der Wurzelform wäre ein großes Patientengut mit vielen Wurzelanomalien eine bessere Grundlage zur statistischen Auswertung als diese Studie, in der relativ viele Wurzeln normal ausgebildet sind.

Während Maxilla und Mandibula beim Resorptionsvergleich nicht signifikant voneinander abweichen, werden beim Behandlungsende auf der linken Seite mehr Resorptionen als rechts bemerkt.

Dies ist womöglich auf die beeinträchtigte Klebetechnik, bedingt durch die Rechtshändigkeit der meisten Behandler, zurückzuführen.

Die Drahtbögen werden im Oberkiefer häufiger gewechselt als im Unterkiefer. Auch bei Extraktionsfällen und längeren Therapien kamen vermehrt Bogenwechsel vor, während sich bei den Geschlechtern keine Diskrepanzen beobachten lassen.

Trotz variierender Anzahl der Bogenwechsel, verhalten sich die Resorptionen bei den verschiedenen Gruppen nicht signifikant unterschiedlich.

Durch kompliziertere Behandlungsaufgaben, zum Beispiel bei Extraktionsfällen, verlängert sich die Behandlung und Bogenwechsel finden vermehrt statt. Dies bleibt jedoch ohne direkten Einfluss auf die Wurzelresorptionen.

Gültig für die meisten Zähne ist zu konstatieren, dass allgemein mehr Resorptionen sowohl nach halbjähriger Therapie, als auch nach Beendigung der Behandlung sichtbar werden, jeweils verglichen mit dem Beginn. Des Weiteren überwiegen tendenziell Wurzelresorptionen zum Abschluss der Therapie gegenüber dem Zeitpunkt T2. Entsprechend der allgemeinen Auffassung, dass kieferorthopädische Therapie Resorptionen verursacht, wird dieses Ergebnis vielfach in der Literatur bestätigt.

Auffällig häufig resorbiert werden Oberkieferschneidezähne (mittlere tendenziell mehr als seitliche Inzisivi) und die ersten Prämolaren des Unterkiefers. Dies liegt wahrscheinlich an den Intrusionskräften, die bei Tiefbissen dort ausgeübt werden, wie auch an Frontretraktionen bei Extraktionsfällen oder anderweitig vermehrter Bewegung dieser Zähne.

Die Analyse der einzelnen Zähne bezüglich eines Zusammenhanges zwischen resorptivem Geschehen und Therapiedauer ergibt keine direkte Abhängigkeit. Ausnahmen sind möglicherweise auf Abbildungsfehler und stärkere Fehlstände zurückzuführen.

Diese Arbeit erhellt, dass nach etwa einem halben Therapiejahr aufgetretene Wurzelresorptionen bei kurzen Behandlungen kaum fortschreiten. Dieses Stagnieren kann daran liegen, dass die meisten Zahnbewegungen zu Beginn der Therapie erfolgen.

Bei langen Therapien ist eher eine Progredienz der resorptiven Vorgänge bis zum Ende der Behandlung zu verzeichnen. Möglicherweise liegt die stärkere Fortschreitungstendenz hier an den komplexeren Behandlungsfällen, die therapieverlängernd wirken.

Im Vergleich stellt sich auch hier kein signifikanter Unterschied der apikalen Resorptionen zwischen langen und kurzen Therapien dar. Dennoch erhöht sich das Risiko des Fortschreitens der schon nach halbjähriger Kontrolle diagnostizierten Resorptionen bei langen Behandlungen. Vermutlich sind für Resorptionsunterschiede eher die differierenden Komplexitäten, Umfänge und Arten der Behandlungen ursächlich.

Zusammenfassend ist hervorzuheben, dass sehr schwache oder gar keine Resorptionen nach etwa halbjähriger Therapiezeit ein geringes Risiko des Fortschreitens erwarten lassen.

Als präventive Faktoren nennen neuere Studien endodontisch behandelte Zähne [75, 76, 105] und Zähne mit unvollständiger Wurzelentwicklung [28, 72, 114], die weniger oder seltener resorbiert werden.

Patienten mit hohem Resorptionsrisiko können mit heutigem Kenntnisstand nicht eindeutig identifiziert werden, jedoch bietet die halbjährige Kontrollaufnahme in gewisser Hinsicht die Möglichkeit, zumindest weniger gefährdete Individuen zu erkennen und vorsorgende Alternativen abzuwägen.

Treten jedoch deutliche oder gar starke Resorptionsmuster nach sechsmonatiger Behandlung auf, so ist zu raten, mit Vorsicht weiterzubehandeln.

HARRIS et al. geben vier Behandlungsoptionen im Anschluss an die Aufdeckung apikaler Wurzelresorptionen auf einem Kontrollröntgenbild an [40]:

- Die resorptiven Prozesse ignorieren und mit der Behandlung fortfahren, wie gewohnt. Hier ist zu überlegen, die Röntgenaufnahme einzusparen, da die Konsequenz die gleiche ist wie ohne Röntgenbild [40].
- Die Therapie verzögern, so dass die Zähne langsamer durch den Knochen bewegt werden und Reparaturmechanismen gleichauf mit den Resorptionsvorgängen arbeiten [40].
- Pausen in die Therapie einbauen [40]. Laut LEVANDER et al. reduziert eine Unterbrechung der Zahnbewegung und Inaktivierung der Kräfte für drei Monate das Risiko schwerer resorptiver Wurzelverkürzungen [64].
- Behandlung abbrechen bei sehr massiven Resorptionen [40]. Darauf bezogen bestätigen diverse Autoren, dass nach Beendigung der Kraftapplikation kein Fortschreiten der Wurzelresorptionen mehr stattfindet [15, 89, 94].

7. Zusammenfassung

Seit über einem Jahrhundert ist bekannt, dass als Nebenwirkung kieferorthopädischer Behandlungen, überwiegend bei festsitzenden Geräten, Wurzelresorptionen auftreten können. Heute gehen einige Autoren so weit, zu behaupten, bei jedem Patienten gibt es – zumindest histologisch betrachtet – resorptive Prozesse an der Zahnwurzel. Röntgenologisch betrachtet, variieren die Resorptionswerte sowohl unter den verschiedenen Studien, als auch unter den Patienten stark.

Neben internen und Sonderformen werden externe laterale und externe apikale Resorptionen beschrieben.

Minimale resorptive Defekte können durch Reparaturmechanismen gemindert werden. Apikale Resorptionen gelten jedoch als irreparabel.

In der überwiegenden Anzahl der Fälle wirken sich die resorptiven Geschehnisse nicht auf die Funktionalität oder den Therapieerfolg aus. Mitunter offenbaren sich jedoch schwere apikale Wurzelverkürzungen durch orthodontische Zahnregulierungen, die in seltenen Fällen zu Hypermobilität führen. Somit sollte möglichst vor der Behandlung festgestellt werden, ob Patienten einem hohem Resorptionsrisiko ausgesetzt sind. Hierzu werden diverse Faktoren überprüft, und auch die Pathogenese ist weitgehend aufgeklärt, doch eine zutreffende Vorhersage bleibt bisher unmöglich.

In dieser Studie wird analysiert, ob eine nach einem halben Therapiejahr mit festsitzender Apparatur angefertigte Panoramaschichtaufnahme über das Auftreten, beziehungsweise die Progredienz apikaler Wurzelresorptionen während der weiteren Behandlung Auskunft gibt. Daneben wird untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen Wurzelform, Zahnextraktion, Geschlecht, Anzahl der Bogenwechsel so wie der Behandlungsdauer mit den resorptiven Prozessen besteht und ob Kiefer- oder Seitenunterschiede auftreten.

Bei der Beurteilung von Orthopantomogrammen empfiehlt es sich, die Einteilung in fünf Resorptionsstadien einer metrischen Analyse vorzuziehen, da Abbildungsfehler und die methodisch bedingte Vergrößerung zu fehlerhaften Resultaten führen können.

Das Patientengut vorliegender Untersuchung setzt sich aus 81 einheitlich mit Straight-Wire-Technik behandelten Patienten der Poliklinik für Kieferorthopädie Düsseldorf zusammen. So werden insgesamt 1538 Zähne (16-26 und 36-46) ausgewertet. Die Daten von Umstellungsosteotomien oder Spaltpatienten werden ausgeschlossen. Als weiteres Auswahlkriterium müssen Panoramaschichtaufnahmen zu drei speziellen Zeitpunkten vorliegen: die erste vor Behandlungsbeginn mit festsitzender Apparatur (T1), die zweite nach etwa vier- bis zehnmonatiger Therapiezeit (T2) und letztere bei Behandlungsabschluss (T3).

Mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms und SPSS für Windows (Statistical Package for the Social Sciences) werden die Daten statistisch ausgewertet.

Als Kontrolluntersuchung zur Fehlerabschätzung dienen dem Untersucher Röntgenaufnahmen von 25 Patienten. Hierdurch werden die Reproduzierbarkeit und die ausreichende Messgenauigkeit dieser Studie bestätigt.

In der Düsseldorfer Poliklinik für Kieferorthopädie werden Extraktionstherapien zurückhaltend (28,7% der Kiefer) durchgeführt.

Bei den Extraktionsfällen konnten zwar längere Behandlungszeiten ermittelt werden, jedoch keine wesentlichen Unterschiede der Resorptionen gegenüber den Patienten ohne Extraktionstherapie.

Geschlechtsunterschiede bezüglich der Wurzelresorptionen sind nicht abzuleiten.

Diese Studie erkennt keine auffallend unterschiedlichen Resorptionsmuster im Vergleich zwischen normaler (84,5%) und anomaler Wurzelform. Als Ausnahme scheint Taurodontismus ein Indiz für erhöhtes Resorptionsrisiko zu sein. Dies ist aber zurückhaltend zu werten, da als nicht repräsentatives Untersuchungsmaterial nur zwei Zähne zur Analyse bereitstehen.

Verstärkte Resorptionsvorkommen fallen bei den Inzisivi der Maxilla und bei den ersten Prämolaren der Mandibula auf. Deutlich weniger resorbiert werden die Eckzähne des Oberkiefers.

Im generellen Vergleich der Resorptionsaktivität verhalten sich Ober- und Unterkiefer in etwa gleich. Die linke Seite dagegen weist – vermutlich durch technische Fehler – zum Behandlungsende hin deutlich mehr Resorptionen auf als die rechte.

Die Anzahl der Bogenwechsel ist zwar sowohl im Oberkiefer, als auch bei Extraktionsfällen und langen Behandlungen erhöht, wirkt sich jedoch nicht direkt auf den Umfang der Wurzelresorptionen aus.

Im Allgemeinen hat die Behandlungsdauer keinen nachteiligen Effekt auf die resorptiven Geschehnisse. So offenbaren sich in der Gegenüberstellung weder bei längeren noch bei kürzeren Therapien maßgebliche Unterschiede.

Bei kurzen Therapien (bis etwa 642 Tage) finden möglicherweise die meisten Resorptionsprozesse zu Beginn statt. Dementsprechend lassen sich zwischen T2 und T3 keine signifikanten Differenzen ausmachen. Bei längerer Behandlung jedoch schreiten die apikalen Wurzelverkürzungen auch nach halbjähriger Therapie noch bis zum Ende deutlich fort, so wie es auch das Gesamtergebnis der Untersuchung widerspiegelt.

Tauchen nach einem halben Therapiejahr keine oder nur geringfügige apikale Resorptionen auf, folgert daraus ein geringes Progredienzrisiko.

Wird jedoch die Entwicklung starker apikaler Resorptionsmuster bereits nach sechsmonatiger Behandlung beobachtet, lässt dies den Schluss auf ein erhöhtes Progredienzrisiko zu.

Deshalb ist die weitere Therapie in solchen Fällen sorgfältig abzuwägen.

8. Literaturverzeichnis

1. Alexander SA: Levels of root resorption associated with continuous arch and sectional arch mechanics.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 110 (1996), 321-4
2. Al-Qawasmi RA, Hartsfield JK Jr, Everett ET, Flury L, Liu L, Foroud TM, Macri JV, Roberts WE: Genetic predisposition to external apical root resorption in orthodontic patients: linkage of chromosome-18 marker.
J Dent Res, 82 (2003), 356-60
3. Al-Qawasmi RA, Hartsfield JK Jr, Everett ET, Flury L, Liu L, Foroud TM, Macri JV, Roberts WE: Genetic predisposition to external apical root resorption.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 123 (2003), 242-52
4. Barclay CW: Root resorption: aetiology, classification and clinical management.
Dent Update, 20 (1993), 248-50
5. Baumrind S, Korn EL, Boyd RL: Apical root resorption in orthodontically treated adults.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 110 (1996), 311-320
6. Beck BW, Harris EF: Apical root resorption in orthodontically treated subjects: analysis of edgewise and light wire mechanics.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 105 (1994), 350-61
7. Benenati FW: Root resorption: types and treatment.
Gen Dent, 45 (1997), 42-5
8. Bhat SS, Sharan SS, Madan I: Healing of root resorption: a case report.
J Clin Pediatr Dent, 27 (2003), 235-8
9. Bishara SE, Vonwald L, Jakobsen JR: Changes in root length from early to mid-adulthood: resorption or apposition?
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 115 (1999), 563-8
10. Blake M, Woodside DG, Pharoah 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
11. Borg E, Kallqvist A, Grondahl K, Grondahl HG: Film and digital radiography for detection of simulated root resorption cavities.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 86 (1998), 110-4

12. Brezniak N, Wasserstein A: Orthodontically induced inflammatory root resorption. Part I: The basic science aspects. Angle Orthod, 72 (2002), 175-9
13. Brezniak N, Wasserstein A: Orthodontically induced inflammatory root resorption. Part II: The clinical aspects. Angle Orthod, 72 (2002), 180-4
14. Brezniak N, Wasserstein A: Root resorption after orthodontic treatment: Part 1. Literature review. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 103 (1993), 62-6
15. Brezniak N, Wasserstein A: Root resorption after orthodontic treatment: Part 2. Literature review. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 103 (1993), 138-46
16. Brin I, Tulloch JF, Koroluk L, Philips C: External apical root resorption in Class II malocclusion: a retrospective review of 1- versus 2-phase treatment. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 124 (2003), 151-6
17. Brudvik P, Rygh P: The initial phase of orthodontic root resorption incident to local compression of the periodontal ligament. Eur J Orthod, 15 (1993), 249-263
18. Brudvik P, Rygh P: The repair of orthodontic root resorption: an ultrastructural study. Eur J Orthod, 17 (1995), 189-98
19. Bühl A, Zöfel P: SPSS Version 10 (Scientific Computing) Addison Wesley Verlag, München, 2000
20. Casa MA, Faltin RM, Faltin K, Sander FG, Arana-Chavez VE: Wurzelresorptionen an oberen ersten Prämolaren nach Applikation eines kontinuierlichen Torquemoments. J Orofac Orthop/ Fortschr Kieferorthop, 62 (2001), 285-295
21. Chadwick SM, Carter NE: Problems of root resorption in relation to orthodontic treatment planning: a report of three cases. Int J Paediatr Dent, 6 (1996), 31-7
22. Chan EK, Darendeliler MA, Petocz P, Jones AS: A new method for volumetric measurement of orthodontically induced root resorption craters. Eur J Oral Sci, 112 (2004), 134-9
23. Chong BS: Root Resorption. Brit Dent J, 190 (2001), 170
24. Christiansen RL: *Commentary*: Thyroxine administration and its effects on root resorption. Angle Orthod, Vol 64 (1994), 399-400

25. Costopoulos G, Nanda R: An evaluation of root resorption incident to orthodontic intrusion.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 109 (1996), 543-8
26. Counts AL, Widlak RA: Generalized idiopathic external root resorption.
J Clin Orthod, 27 (1993), 511-3
27. Dahlberg G: Statistical methods for medical and biological students.
Interscience Publications, New York, 1940
28. da Silva Filho OG, Mendes Ode F, Ozawa TO, Ferrari Junior FM, Correa TM: Behavior of partially formed roots of teeth submitted to orthodontic movement.
J Clin Pediatr Dent, 28 (2004), 147-54
29. de Muelenaere KR: External root resorption in orthodontics: avoiding high risk teeth. A case report.
SADJ, 53 (1998), 121-8
30. Desai HM: Root resorption: another long-term outcome.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 116 (1999), 184-6
31. Emery C: External cervical resorption: a case study using orthodontic extrusion.
Dent Update, 23 (1996), 325-8
32. Faltin RM, Arana-Chavez VE, Faltin K, Sander FG, Wichelhaus A: Root resorptions in upper first premolars after application of continuous intrusive forces. Intra-individual study.
J Orofac Orthop, 59 (1998), 208-19
33. Flint DJ, Paunovich E, Moore WS, Wofford DT, Hermes CB: A diagnostic comparison of panoramic and intraoral radiographs.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 85 (1998), 731-5
34. Francini E, Mancini G, Vichi M, Tollaro I, Romagnoli P: Microscopical aspects of root resorption of human deciduous teeth.
Ital J Anat Embryol, 97 (1992), 189-201
35. Fritz U, Diedrich P, Wiechmann D: Apical root resorption after lingual orthodontic therapy.
J Orofac Orthop, 64 (2003), 434-42
36. 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), 346-52
37. Glossary: Annotated glossary of terms used in endodontics.
American Association of Endodontists, 4. Auflage, Chicago, 1984

38. Göz G, Rakosi T: Die apikale Wurzelresorption unter kieferorthopädischer Behandlung.
Fortschr Kieferorthop, 50 (1989), 196-206 (Nr. 3)
39. Gunraj MN: Dental root resorption.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 88 (1999), 647-53
40. Harris EF, Boggan BW, Wheeler DA: Apical root resorption in patients treated with comprehensive orthodontics.
J Tenn Dent Assoc, 81 (2001), 30-3
41. Harris EF, Butler ML: Patterns of incisor root resorption before and after orthodontic correction in cases with anterior open bites.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 101 (1992), 112-9
42. 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), 301-9
43. Hartsfield JK Jr, Everett ET, Al-Qawasmi RA: Genetic factors in external apical root resorption and orthodontic treatment.
Crit Rev Oral Biol Med, 15 (2004), 115-122
44. Hasegawa N, Kawaguchi H, Ogawa T, Uchida T, Kurihara H: Immunohistochemical characteristics of epithelial cell rests of Malassez during cementum repair.
J Periodontal Res, 38 (2003), 51-6
45. Haug SR, Brudvik P, Fristad I, Heyeraas KJ: Sympathectomy causes increased root resorption after orthodontic tooth movement in rats: immunohistochemical study.
Cell Tissue Res, 313 (2003), 167-75 (Epub 2003 Jul 08)
46. Hellsing E, Hammarström L: The hyaline zone and associated root surface changes in experimental orthodontics in rats: a light and scanning electron microscope study.
Eur J Orthod, 18 (1996), 11-18
47. Heo MS, Lee SS, Lee KH, Choi HM, Choi SC, Park TW: Quantitative analysis of apical root resorption by means of digital subtraction radiography.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 91 (2001), 369-73
48. Horiuchi A, Hotokezaka H, Kobayashi K: Correlation between cortical plate proximity and apical root resorption.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 114 (1998), 311-318

49. Janson GR, De Luca Canto G, Martins DR, Henriques JF, De Freitas MR: A radiographic comparison of apical root resorption after orthodontic treatment with 3 different fixed appliance techniques.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 118 (2000), 262-73
50. Jiang RP, Zhang D, Fu MK: A factors study of root resorption after orthodontic treatment.
Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi, 38 (2003), 455-7
51. Kaley J, Phillips C: Factors related to root resorption in edgewise practice.
Angle Orthod, 61 (1991), 125-32
52. Keim RG: Ask us: Are there predictors for root resorption?
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 120 (2001), 11A
53. Killiany DM: Root resorption caused by orthodontic treatment: an evidence-based review of literature.
Semin Orthod, 5 (1999), 128-133
54. King GJ: *Commentary: Continuous vs. discontinuous force application and root resorption.*
Angle Orthod, 69 (1999), 163-4
55. King GJ: *Commentary: Continuous versus interrupted continuous orthodontic force related to early tooth movement and root resorption.*
Angle Orthod, 65 (1995), 401-402 (*402: Author's response*)
56. Kjaer I: Morphological characteristics of dentitions developing excessive root resorption during orthodontic treatment.
Eur J Orthod, 17 (1995), 25-34
57. Kook YA, Park S, Sameshima GT: Peg-shaped and small lateral incisors not at higher risk for root resorption.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 123 (2003), 253-8
58. Kurol J, Owman-Moll P: Hyalinization and root resorption during early orthodontic tooth movement in adolescents.
Angle Orthod, 68 (1998), 161-5
59. Kurol J, Owman-Moll P, Lundgren D: Time-related root resorption after application of a controlled continuous orthodontic force.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 110 (1996), 303-10
60. Lambrechts P, Vanhoorebeeck B: Root resorption.
Rev Belge Med Dent, 47 (1992), 54-75
61. Lee RY, Artun J, Alonzo TA: Are dental anomalies risk factors for apical root resorption in orthodontic patients?
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 116 (1999), 187-95

62. Levander E, Bajka R, Malmgren O: Early radiographic diagnosis of apical root resorption during orthodontic treatment: a study of maxillary incisors. *Eur J Orthod*, 20 (1998), 57-63
63. Levander E, Malmgren O: Evaluation of the risk of root resorption during orthodontic treatment: A study of upper incisors. *Eur J Orthod*, 10 (1988), 30-38
64. Levander E, Malmgren O, Eliasson S: Evaluation of root resorption in relation to two orthodontic treatment regimes. A clinical experimental study. *Eur J Orthod*, 16 (1994), 223-8
65. Levander E, Malmgren O, Stenback K: Apical root resorption during orthodontic treatment of patients with multiple aplasia: a study of maxillary incisors. *Eur J Orthod*, 20 (1998), 427-34
66. Linge L, Linge BO: Patient characteristics and treatment variables associated with apical root resorption during orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 99 (1991), 35-43
67. Loberg EL, Engström C: Thyroid administration to reduce root resorption. *Angle Orthod*, Vol 64 (1994), 395-399
68. Lossdorfer S, Gotz W, Jager A: Immunohistochemical localization of receptor activator of nuclear factor kappaB (RANK) and its ligand (RANKL) in human deciduous teeth. *Calcif Tissue Int*, 71 (2002), 45-52 (Epub 2002 Jun 04)
69. Lundgren D, Owman-Moll P, Kurol J: Early tooth movement pattern after application of a controlled continuous orthodontic force. A human experimental model. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 110 (1996), 287-94
70. Lupi JE, Handelman CS, Sadowsky C: Prevalence and severity of apical root resorption and alveolar bone loss in orthodontically treated adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 109 (1996), 28-37
71. Mah J, Prasad N: Dentine phosphoproteins in gingival crevicular fluid during root resorption. *Eur J Orthod*, 26 (2004), 25-30
72. Mavragani M, Boe OE, Wisth PJ, Selvig KA: Changes in root length during orthodontic treatment: advantages for immature teeth. *Eur J Orthod*, 24 (2002), 91-7
73. 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), 545-51

74. Melsen B: Tissue reaction to orthodontic tooth movement - a new paradigm. *Eur J Orthod*, 23 (2001), 671-81
75. Mirabella AD, Artun J: Prevalence and severity of apical root resorption of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *Eur J Orthod*, 17 (1995), 93-9
76. 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
77. Oliver RG, Dummer PMH: Root Resorption of a partially erupted tooth: a case report. *Dental Update*, 22 (1995), 280-281
78. Oshiro T, Shibasaki Y, Martin TJ, Sasaki T: Immunolocalization of vacuolar-type H⁺-ATPase, cathepsin K, matrix metalloproteinase-9, and receptor activator of NFkappaB ligand in odontoclasts during physiological root resorption of human deciduous teeth. *Anat Rec*, 264 (2001), 305-11
79. Owman-Moll P: Orthodontic tooth movement and root resorption with special reference to force magnitude and duration. A clinical and histological investigation in adolescents. *Swed Dent J Suppl*, 105 (1995), 1-45
80. Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D: Continuous versus interrupted continuous orthodontic force related to early tooth movement and root resorption. *Angle Orthod* 1995 65(6):395-401
81. Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D: Effects of a doubled orthodontic force magnitude on tooth movement and root resorptions. An inter-individual study in adolescents. *Eur J Orthod*, 18 (1996), 141-50
82. Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D: Repair of orthodontically induced root resorption in adolescents. *Angle Orthod*, 65 (1995), 403-8 discussion: 409-10
83. Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D: The effects of a four-fold increased orthodontic force magnitude on tooth movement and root resorptions. An intra-individual study in adolescents. *Eur J Orthod*, 18 (1996), 287-94
84. Parker RJ, Harris EF: Directions of orthodontic tooth movements associated with external apical root resorption of the maxillary central incisor. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 114 (1998), 677-83

85. Parker WS: Root resorption - long-term outcome.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 112 (1997), 119-23
86. Perona G, Wenzel A: Radiographic evaluation of the effect of orthodontic retraction on the root of the maxillary canine.
Dentomaxillofac Radiol, 25 (1996), 179-85
87. Poumpros E, Loberg E, Engström C: Thyroid function and root resorption.
Angle Orthod, 64 (1994), 389-393
88. Povolny B: *Commentary*: Thyroid function and root resorption.
Angle Orthod, 64 (1994), 394
89. Remington DN, Joondeph DR, Artun J, Riedel RA, Chapko MK: Long-term evaluation of root resorption occurring during orthodontic treatment.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 96 (1989), 43-46
90. Reukers E, Sanderink G, Kuijpers-Jagtman AM, van't Hof M: Assessment of apical root resorption using digital reconstruction.
Dentomaxillofac Radiol, 27 (1998), 25-9
91. Reukers EA, Sanderink GC, Kuijpers-Jagtman AM, van't Hof MA: Röntgenologische Auswertung apikaler Wurzelresorptionen bei zwei unterschiedlichen Behandlungsmethoden mit der Edgewise-Apparatur. (Radiographic evaluation of apical root resorption with 2 different types of edgewise appliances. Results of a randomized clinical trial.)
J Orofac Orthop/ Fortschr Kieferorthop, 59 (1998), 100-109
92. Roberts-Harry D, Sandy J: Orthodontics. Part 11: Orthodontic tooth movement.
Br Dent J, 196 (2004), 391-4
93. Rupp R: Case report: post-traumatic resorption during active orthodontic treatment.
J Gen Orthod, 7 (1996), 21-3
94. Rupp R: Root resorption related to orthodontics and other factors: a review of the literature.
J Gen Orthod, 6 (1995), 25-9
95. Sahm G, Haffner P, Klinger HG: Retrospective evaluation and experimental radiographic study on bone reaction concomitant with orthodontic tooth movement.
Prakt Kieferorthop, 4 (1990), 323-30
96. Sameshima GT, Asgarifar KO: Assessment of root resorption and root shape: periapical vs panoramic films.
Angle Orthod, 71 (2001), 185-9

97. Sameshima GT, Sinclair PM: Predicting and preventing root resorption: Part I. Diagnostic factors.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 119 (2001), 505-10
98. Sameshima GT, Sinclair PM: Predicting and preventing root resorption: Part II. Treatment factors.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 119 (2001), 511-5
99. Sasaki T: Differentiation and functions of osteoclasts and odontoclasts in mineralized tissue resorption.
Microsc Res Tech, 61 (2003), 483-95
100. Sectakof PA, Selnes JE: Iatrogenic effects of orthodontic treatment. Part I: Root resorption.
Univ Tor Dent J, 6 (1993), 17, 19-21
101. Seifi M, Eslami B, Saffar AS: The effect of prostaglandin E2 and calcium gluconate on orthodontic tooth movement and root resorption in rats.
Eur J Orthod, 25 (2003), 199-204
102. Sekhavat AR, Mousavizadeh K, Pakshir HR, Aslani FS: Effect of misoprostol, a prostaglandin E1 analog, on orthodontic tooth movement in rats.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 122 (2002), 542-7
103. 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), 435-44
104. Snelgrove RA: Generalized idiopathic apical root resorption as an incidental finding in an adolescent: a case history.
Dent Update, 22 (1995), 276-8
105. Spurrier SW, Hall SH, Joondeph DR, Shapiro PA, Riedel RA: A comparison of apical root resorption during orthodontic treatment in endodontically treated and vital teeth.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 97 (1990), 130-4
106. Sringkarnboriboon S, Matsumoto Y, Soma K: Root resorption related to hypofunctional periodontium in experimental tooth movement.
J Dent Res, 82 (2003), 486-90
107. 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
108. Talic N, Evans CA, Daniel JC, George A, Zaki AM: Immunohistochemical localization of alphavbeta3 integrin receptor during experimental tooth movement.
Am J Orthod Dentofacial Orthop, 125 (2004), 178-84

109. Vazquez-Landaverde LA, Rojas-Huidobro R, Alonso Gallegos-Corona M, Aceves C: Periodontal 5'-deiodination on forced-induced root resorption-the protective effect of thyroid hormone administration.
Eur J Orthod, 24 (2002), 363-9
110. 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), 359-63
111. Vlaskalic V, Boyd RL, Baumrind S: Etiology and sequelae of root resorption.
Semin Orthod, 4 (1998), 124-31
112. Wehrbein H, Harhoff R, Diedrich P: Wurzelresorptionsrate bei orthodontisch bewegten, parodontal geschädigten und gesunden Zähnen.
Dtsch Zahnärztl Z, 45 (1990), 176-178
113. Weiland F: Constant versus dissipating forces in orthodontics: the effect on initial tooth movement and root resorption.
Eur J Orthod, 25 (2003), 335-42
114. Xu T, Baumrind S: The relationship between apical root resorption and orthodontic tooth movement in growing subjects.
Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi, 37 (2002), 265-8
115. Zhang D, Goetz W, Braumann B, Bourauel C, Jaeger A: Effect of soluble receptors to interleukin-1 and tumor necrosis factor alpha on experimentally induced root resorption in rats.
J Periodontal Res, 38 (2003), 324-32

9. Lebenslauf

Name: Silke Maria Dreiner

Geburtsdatum: 5.1.1979

Geburtsort: Krefeld

Familienstand: ledig

Adresse: Nelkenstr. 1
47906 Kempen

05.01.1979: Geburt der Tochter Silke Maria Dreiner der Eheleute Rosemarie und Klaus Dreiner zu Krefeld

Schulbildung:

01.08.1985 – 16.06.1989: Besuch der Städtischen Katholischen Grundschule 1 in Kempen

01.08.1989 – 26.01.1996: Gymnasium „Thomaeum“ zu Kempen

29.01.1996 – 29.05.1998: Gymnasium „Liebfrauenschule Mülhausen“

30.05.1998 – 30.09.1998: Aushilfstätigkeit im väterlichen Geschäft

Hochschulausbildung:

01.10.1998 – 01.08.2003: Hochschulstudium der Zahnmedizin an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

04.08.2003 – 13.11.2003: Zahnärztliche Prüfung (Staatsexamen)

27.11.2003: Approbation als Zahnärztin

ab 01.12.2003: Intensivierung der Dissertationsarbeiten

Beruflicher Werdegang:

01.05.2004 – 30.06.2004: Beschäftigung als Assistenz Zahnärztin für 18 Stunden pro Woche in der Zahnarztpraxis Hans-Peter Brors zu Kempen

ab 01.07.2004: Anstellung als Weiterbildungsassistentin in der kieferorthopädischen Fachpraxis in Kempen bei Frau Dr. Barck (geborene Schlachter)

Meine nächsten Ziele sind der Abschluss der Dissertation und die Weiterbildung zur Kieferorthopädin.

Datum

Unterschrift

10. Danksagung

Besonderen Dank möchte ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. D. Drescher, für die Überlassung des Themas und die stets freundliche und konstruktive Betreuung aussprechen.

Des weiteren danke ich Herrn Dr. Fuck und den Mitarbeitern der Poliklinik für Kieferorthopädie Düsseldorf für ihre Hilfsbereitschaft und guten Ratschläge.

Nicht zuletzt danke ich von Herzen meiner geduldigen Familie.

Kurzfassung/Abstract

Prävalenz und Abschätzung der Progredienz apikaler Wurzelresorptionen – eine retrospektive Untersuchung an Panoramaschichtaufnahmen

vorgelegt von: Silke Dreiner

Die Vorhersage und damit die Vermeidung apikaler Wurzelresorptionen bei kieferorthopädischer Behandlung stellen ein lange bekanntes und bereits vielfach untersuchtes Problem dar.

Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, ob ein nach einer Behandlungszeit von sechs Monaten mit feststehendem Gerät angefertigtes Orthopantomogramm die Möglichkeit bietet, das Auftreten und die Progredienz apikaler Wurzelresorptionen abzuschätzen. Zusätzlich werden Merkmale untersucht, die möglicherweise Einfluss auf die Resorptionsprozesse nehmen.

Anhand der Daten von 81 Patienten der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Düsseldorf war zunächst allgemein ein Fortschreiten der apikalen Wurzelresorptionen während der gesamten Behandlung nicht zu übersehen.

Eher selten wurden Extraktionstherapien (28,7% der Kiefer) angewendet. Bei diesen ließen sich zwar längere Behandlungszeiten ermitteln, jedoch keine gesteigerten Resorptionsvorgänge.

Die Geschlechtsunterschiede wiesen keinen Zusammenhang mit den apikalen Resorptionsprozessen auf.

Im Vergleich von abnorm geformten mit normal ausgebildeten Wurzeln wurden keine signifikanten Differenzen gefunden.

Inzisivi des Oberkiefers und die 1. Prämolaren des Unterkiefers ließen besonders ausgeprägte Resorptionen erkennen. Dagegen waren die Oberkieferzähne deutlich weniger betroffen. Generell wichen Ober- und Unterkiefer diesbezüglich nicht signifikant voneinander ab. Auf der linken Seite wurden jedoch mehr resorptive Wurzelverkürzungen nachgewiesen als rechts. Sowohl im Oberkiefer, als auch bei Extraktionsfällen und längerer Behandlung erhöhte sich die Anzahl der Bogenwechsel. Dies blieb ohne nennenswerte Konsequenz hinsichtlich röntgenologisch feststellbarer Resorptionen.

Die Behandlungsdauer wirkte sich nicht wesentlich auf die resorptiven Vorgänge aus. Es ist aber zu vermerken, dass nach halbjähriger Therapie eingetretene apikale Resorptionen sich bei kurzen Therapien bis zum Ende der Behandlung nicht wesentlich weiterentwickelten, jedoch bei einer länger andauernden Therapie noch bis zum Ausklang der Behandlung fortschreiten konnten.

Keine oder geringgradige Wurzelresorptionen nach einem halben Therapiejahr wiesen auf ein geringes Risiko einer Progredienz hin. Dagegen konnten sich deutliche Wurzelverkürzungen nach sechsmonatiger Behandlung weiterentwickeln und besonders bei langen Therapien zu vermehrten resorptiven Prozessen führen.

In solchen Risikofällen ist es sinnvoll, den weiteren Behandlungsplan sorgfältig zu überdenken.