

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. Heike Korbmacher-Steiner

des Fachbereiches Medizin der Philipps-Universität Marburg

**Die Bedeutung der Kjaer-Merkmale
bei der Risikoeinschätzung externer Wurzelresorptionen
vor einer kieferorthopädischen Therapie
– eine retrospektive Analyse**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

dem Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Pia Marie Bruns
aus Salzkotten

Marburg, 2023

Angenommen vom Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg am: 17.05.2023

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin.

Dekan:	Frau Prof. Dr. D. Hilfiker-Kleiner
Referent:	Frau Prof. Dr. H. Korbmacher-Steiner
1. Korreferent:	Frau Prof. Dr. N. Arweiler

Originaldokument gespeichert auf dem Publikationsserver der

Philipps-Universität Marburg

<http://archiv.ub.uni-marburg.de>



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer

Creative Commons

Namensnennung

Weitergabe unter gleichen Bedingungen

4.0 Deutschland Lizenz.

Die vollständige Lizenz finden Sie unter:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>

Meiner Familie.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Literaturübersicht	6
2.1	Historischer Überblick über dentale Wurzelresorptionen	6
2.2	Pathogenese von Wurzelresorptionen	10
2.3	Ätiologie von Wurzelresorptionen	15
2.3.1	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und der anatomischen Zahnmorphologie	15
2.3.2	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und dem Geschlecht	17
2.3.3	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und Hormonen, Vitaminen und Mineralstoffen	17
2.3.4	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und oralen Fehlfunktionen	19
2.3.5	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und Zahntraumata	19
2.3.6	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und Allergien und Asthma	20
2.3.7	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und der Genetik	20
2.3.8	Zusammenhang von Wurzelresorptionen und der kieferorthopädischen Therapie	22
2.3.8.1	Kieferorthopädische Bewegungsvektoren	22
2.3.8.2	Art der verwendeten kieferorthopädischen Apparaturen	24
2.3.8.3	Chirurgisch unterstützende Therapien in der Kieferorthopädie	25
2.3.8.4	Behandlungsbeginn der kieferorthopädischen Therapie	25
2.3.8.5	Behandlungsdauer der kieferorthopädischen Therapie	26
2.4	Einteilung von Wurzelresorptionen	27
2.5	Diagnostik von Wurzelresorptionen	30
2.5.1	Radiologische Untersuchungsmethoden von Wurzelresorptionen	30
2.5.2	Biomarker für pathologische Wurzelresorptionen	31
2.6	Prävalenz von Wurzelresorptionen	32
2.7	Risiken und klinische Folgen von Wurzelresorptionen	33
2.8	Regeneration von Wurzelresorptionen	34
3	Zielsetzung der Arbeit	35
4	Material und Methode	37

4.1	Sichtung der Patientenakten	37
4.2	Sichtung der Röntgenbilder	38
4.3	Datenerfassung	38
4.3.1	Allgemeine Patientendaten	38
4.3.2	Analyse der Merkmale nach Kjaer	39
4.3.2.1	Merkmale der ersten Dentition	40
4.3.2.2	Merkmale der zweiten Dentition	41
4.3.2.3	Weitere Merkmale	50
4.3.3	Analyse der Wurzelresorptionen	51
4.4	Untersucherübereinstimmung	53
4.5	Statistische Auswertung	53
4.5.1	Deskriptive Analyse	54
4.5.2	Bivariate Analyse	54
4.5.3	Multivariate Analyse	55
5	Ergebnisse	56
5.1	Untersucherübereinstimmung	56
5.2	Deskriptive Statistik	57
5.2.1	Verteilung der untersuchten Patienten	57
5.2.2	Verteilung der anamnestischen Daten der untersuchten Patientenakten	58
5.2.3	Verteilung der Kjaer-Merkmale der untersuchten Patienten	60
5.2.4	Verteilung der Wurzelresorptionen der untersuchten Patienten	64
5.3	Statistische Korrelation zwischen verschiedenen unabhängigen Variablen und der Zielvariable Wurzelresorptionen	69
5.3.1	Bivariate Analyse	70
5.3.2	Multivariate Analyse	75
5.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Überprüfung der aufgestellten Hypothesen	76
6	Diskussion	80
6.1	Diskussion der Material und Methodik	80
6.2	Diskussion der Ergebnisse	82
6.2.1	Abhängigkeit vom Parameter Geschlecht	82
6.2.2	Abhängigkeit vom Parameter Patientenalter zu Behandlungsbeginn	83
6.2.3	Abhängigkeit vom Parameter kieferorthopädische Behandlungsdauer	84
6.2.4	Abhängigkeit vom Parameter verwendete kieferorthopädische Apparaturen und kombinierte chirurgische Begleittherapien	85

6.2.5	Abhängigkeit vom Parameter Allgemeinerkrankungen und traumatisch geschädigten Zähnen _____	87
6.2.6	Abhängigkeit vom Parameter Dysfunktionen und Dyskinesien _____	88
6.2.7	Abhängigkeit vom Parameter Kjaer-Merkmale _____	89
6.2.8	Gesamtanzahl der Wurzelresorptionen _____	94
6.3	Schlussfolgerung und klinische Relevanz _____	95
7	Zusammenfassung _____	97
7.1	Zusammenfassung Deutsch _____	97
7.2	Zusammenfassung Englisch (summary) _____	99
8	Literaturverzeichnis _____	101
9	Anhang _____	120
9.1	Lebenslauf _____	120
9.2	Verzeichnis der akademischen Lehrer/-innen _____	121
9.3	Danksagung _____	122
9.4	Ehrenwörtliche Erklärung _____	123

Abkürzungsverzeichnis

Nachfolgend sind die in der Arbeit verwendeten Abkürzungen in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet:

α	Signifikanzniveau
Abb.	Abbildung
bspw.	beispielsweise
C	Cytosin
ca.	circa
cN	Centinewton
DGP	Dentin-Glykoprotein
DPP	Dentin-Phosphoprotein
DSP	Dentin-Sialoprotein
DSPP	Dentin-Sialophosphoprotein
DVT	Digitale Volumentomographie
ELISA	enzyme-linked immunosorbent assay (deutsch: enzymgekoppelter Immunadsorptionstest)
EMD	enamel matrix derivative (deutsch: Schmelzmatrixprotein)
engl.	englisch
et al.	et alii (deutsch: und andere)
etc.	et cetera (deutsch: und so weiter)
evtl.	eventuell
G	Guanin
ggf.	gegebenenfalls
ICC	Intraclass Correlation Coefficient (deutsch: Intraklassen-Korrelation)
IL	Interleukin
KI	Konfidenzintervall
Max.	Maximum
Min.	Minimum
mind.	mindestens
MMP	Matrix-Metalloproteinase

Nfic	nuclear factor I C
ng/ μ l	Nanogram pro Mikroliter
PCR	polymerase chain reaction (deutsch: Polymerase-Kettenreaktion)
PSA	Panoramaschichtaufnahme
RANK	Receptor Activator of NF- κ B
RANKL	Receptor Activator of NF- κ B-Ligand
SMP	Schmelzmatrixprotein
SRA	short root anomaly (deutsch: Anomalie der kurzen Zahnwurzeln)
OK	Oberkiefer
OPG	Osteoprotegerin
o. ä.	oder ähnliches
s.	siehe
SNP	single nucleotide polymorphism (deutsch: Einzelnukleotidpolymorphismus)
sog.	sogenannt
Tab.	Tabelle
TNF	Tumornekrosefaktor
u. a.	unter anderem / unter anderen
UK	Unterkiefer
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
WR	Wurzelresorption
z. B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Atypische Milchzahnresorption	40
Abbildung 2: Infraokklusion	40
Abbildung 3: Schmale Zahnkronen	41
Abbildung 4: Physiologische Zahnkronenbreiten	41
Abbildung 5: Kurze Zahnwurzeln	42
Abbildung 6: Kurze distale Zahnwurzel des ersten Molaren	42
Abbildung 7: Schmale Zahnwurzeln	43
Abbildung 8: Physiologische Zahnwurzelbreiten/-dicken	43
Abbildung 9: Wurzelkrümmungen	44
Abbildung 10: Wurzelkrümmungen	44
Abbildung 11: Taurodontismus und physiologische Molaren	45
Abbildung 12: Taurodontismus	45
Abbildung 13: Pathologische Wurzelresorption	46
Abbildung 14: Apikale Wurzelresorption	46
Abbildung 15: Ektopie	47
Abbildung 16: Mikrodontie	47
Abbildung 17: Isolierte Spätanlagen	48
Abbildung 18: Generalisierte Spätanlagen	48
Abbildung 19: Aplasie Frontzähne	49
Abbildung 20: Aplasie Seitenzähne	49
Abbildung 21: Odontom	50
Abbildung 22: Lipping	51
Abbildung 23: Wurzelresorptionsgrade	52
Abbildung 24: Unterschiedlich stark ausgeprägte Wurzelresorptionen	53
Abbildung 25: Geschlechterverteilung	57
Abbildung 26: Verteilungsparameter der Kjaer-Merkmale	60
Abbildung 27: Verteilung der häufigsten Kjaer-Merkmale	62
Abbildung 28: Nicht beurteilbare Kiefergelenkskondylen	63
Abbildung 29: Anfangsröntgenbild	67
Abbildung 30: Zwischendiagnostisches Röntgenbild	67
Abbildung 31: Wurzelresorptionsgrad drei	68
Abbildung 32: Stagnierte Wurzelresorptionen	68

Abbildung 33: Anzahl der Patienten mit und ohne Kjaer-Merkmal/en _____	69
Abbildung 34: Röntgenbild einer Patientin mit festsitzender Apparatur _____	77
Abbildung 35: Röntgenbild derselben Patientin wie in Abb. 34 _____	77
Abbildung 36: Frühes Wechselgebiss eines Patienten _____	79
Abbildung 37: Röntgenbild desselben Patienten wie in Abb. 36 _____	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ICC-Werte von Untersucher A und Untersucher B	56
Tabelle 2: Gesamtanzahl der Panoramaschichtaufnahmen	57
Tabelle 3: Dentitionsphasen zu Behandlungsbeginn und -ende	58
Tabelle 4: Verwendeten kieferorthopädischen Apparaturen der Patienten	59
Tabelle 5: Verteilung der anamnestischen Daten	59
Tabelle 6: Verteilung der Kjaer-Merkmale und (un-)betroffene Zahnanzahl	61
Tabelle 7: Häufigkeitsverteilung der Wurzelresorptionsgrade über die Zeit	64
Tabelle 8: Wurzelresorptionsgrade zum Behandlungsabschluss	65
Tabelle 9: Anzahl der von Wurzelresorptionen betroffenen Zähne	66
Tabelle 10: Kjaer-Merkmale und dazu gekommene Wurzelresorptionen	70
Tabelle 11: Ergebnisse der bivariaten Analyse	72
Tabelle 12: Ergebnisse der multivariaten Analyse	75

1 Einleitung

Zahn- und Kieferfehlstellungen gehören neben Karies und Parodontalerkrankungen zu den häufigsten Gesundheitsbeeinträchtigungen der Mundhöhle [Jordan et al., 2021]. Die kieferorthopädische Behandlung hat über die Jahre einen immer größeren Stellenwert in der Gesellschaft eingenommen - nicht zuletzt aufgrund der großen medizinischen Versorgungsnotwendigkeit mit einem Anteil von 97,5 % unter den 8- und 9-Jährigen [Jordan et al., 2021]. Wie bei allen medizinischen Behandlungen können jedoch Risiken und Nebenwirkungen auftreten. Durch eine Einschränkung der oralen Hygienefähigkeit kann es zu Schmelzdemineralisationen und gingivalen Parodontopathien kommen [Huang et al., 2018]. Kieferorthopädisch behandelte Patienten weisen zudem des Öfteren trotz umsichtiger Behandlungsplanung apikale Wurzelresorptionen auf [Jatania et al., 2012]. Eine Strategie zur Risikoeinschätzung von auftretenden Wurzelresorptionen ist bis heute jedoch nicht effizient möglich [Sondeijker et al., 2020].

Die Mechanotherapie wird aufgrund mangelnden Wissens und Verständnis der Inzidenz von externen Wurzelresorptionen oftmals als Hauptursache für die Entstehung dieser angesehen, obwohl die Komplexität der Ätiologie weit über die mechanischen Faktoren hinaus geht [Karnati et al., 2021]. Neben den Einfluss von kieferorthopädischen Apparaturen auf das Wurzelresorptionsrisiko, wurde in der Vergangenheit der Zusammenhang von dentalen Charakteristika und Wurzelresorptionen überprüft. Die dänische Kieferorthopädin Inger Kjaer [1995] stellte die Hypothese auf, dass bestimmte Merkmale ein gewisses Risiko für das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie darstellen. Nach röntgenologischer Sichtung kieferorthopädisch behandelter Patienten legte sie Merkmale fest, die in ihren Untersuchungen mit auffällig vielen Wurzelresorptionen einhergingen.

Heutzutage werden in der Kieferorthopädie weiterhin Panoramaschichtaufnahmen zur Erstdiagnostik, in der Verlaufskontrolle der Behandlung und zum Behandlungsabschluss angefertigt. Diese Röntgenbilder dienen u. a. der Detektion von Wurzelresorptionen, sodass die Behandlung bei Bedarf angepasst, umgestellt oder in schwerwiegenden Resorptionsfällen gar beendet werden kann. Die von Kjaer definierten Merkmale können anhand der

Röntgenbilder ebenfalls untersucht und für eine individuelle, prätherapeutische Risikoeinschätzung für Wurzelresorptionen während der orthodontischen Behandlung genutzt werden. Wenngleich leicht ausgeprägte Wurzelresorptionen keinen Einfluss auf die Lebensqualität haben und bei einer Wurzellänge von über 10 mm und einem gesunden Parodontium stabil bleiben [Jönsson et al., 2007], sollte eine kieferorthopädische Therapie dennoch stets umsichtig geplant und kontrolliert durchgeführt werden um unnötige Zahnhartsubstanzverluste oder vergleichbare Nebenwirkungen zu vermeiden [Jönsson et al., 2007; Levander & Malmgren, 2000].

Die vorliegende retrospektive Arbeit analysiert die Prävalenz und das Ausmaß von Wurzelresorptionen kieferorthopädisch behandelter Kinder und Jugendlichen. Weiterhin werden spezifische Charakteristika des Patientenkollektivs eruiert und die Merkmale nach Kjaer auf ihre Bedeutung zur Risikoeinschätzung für Wurzelresorptionen überprüft.

2 Literaturübersicht

2.1 Historischer Überblick über dentale Wurzelresorptionen

Erstmalig wurden dentale Wurzelresorptionen Mitte des 19. Jahrhunderts beschrieben [Bates et al., 1856]. Die ersten destruierten Zahnwurzeloberflächen konnten klinisch an extrahierten, permanenten Zähnen nachgewiesen werden [Schwarzkopf, 1887]. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden die Gewebeveränderungen an resorbierten Zahnwurzeln auf histologischer Ebene näher betrachtet, darunter insbesondere die ossären Adaptionsprozesse unter Anwendung verschiedener orthodontischer Kraftvektoren [Oppenheim, 1911]. Den direkten Zusammenhang von Wurzelresorptionen und kieferorthopädischen Behandlungen brachten Erkenntnisse von Ottolengui [1914]. Iatrogene Wurzelresorptionen wurden anhand des Vergleichs von Anfangs- und Abschlussröntgenbildern von kieferorthopädisch behandelten Patienten diagnostiziert [Ketcham, 1927]. Die Resorptionen traten jedoch unabhängig von einer kieferorthopädischen Behandlung auf und so wurde, neben den iatrogenen Einflussfaktoren, eine komplexere Ätiologie angenommen. Die Forscher vermuteten unter anderem einen resorptionsprädestinierenden Nährstoffmangel infolge einer unausgeglichene Ernährung. Darüber hinaus wurden resorptions-spezifische morphologische Zahnmerkmale beschrieben unter denen sich generalisiert verkürzte Zahnwurzeln, eine anatomische Sondervariante mit erhöhter Resorptionsanfälligkeit, befanden [Ketcham, 1927]. In einer Studie mit annähernd 600 Patienten konnte eine Verkürzung der Wurzellänge mit Abrundung der Wurzelspitzen diagnostiziert werden [Hotz, 1934]. Davon waren Patienten aller Altersgruppen betroffen, vermehrt jedoch die höheren Altersklassen. Dieses Phänomen wurde der mechanischen Belastung der Zähne zugeschrieben, die auch ohne eine orthodontische Behandlung auftritt und sich im Laufe des Lebens potenziert [Hotz, 1934]. Andere Autoren gingen soweit zu behaupten, dass 100 % der Patienten von Wurzelresorptionen betroffen seien - kieferorthopädisch behandelte, sowie nicht-behandelte Patienten [Massler & Malone, 1954]. Darunter fielen ca. 75 % auf leichte Wurzelresorptionen (Blunting) und es kamen nur wenige schwere Wurzelresorptionsgrade mit einer Ausprägung von mehr als ein Viertel der Wurzellänge vor. Demnach trägt ein jeder ein gewisses Resorptionspotential in sich. Im fortgeschrittenen Alter sowie unter kieferorthopädischen Maßnahmen können Wurzelresorptionen jedoch

vermehrt auftreten. Als kausal für Wurzelresorptionen wurde die Schädigung der parodontalen Membranen der Wurzeloberfläche beschrieben [Stuteville, 1938; Kuroi & Owman-Moll, 1998; Melsen, 2001]. Die Komprimierung des parodontalen Ligaments tritt dabei unumgänglich mit der unterminierenden Resorption des Alveolarknochens auf. Die sterile Entzündung des Faserapparates des Zahnes und des umgebenden Knochens führen zu Umbauprozessen des Zahnhalteapparates, die letztendlich zu der gewünschten orthodontischen Zahnbewegung führen. Die parodontalen Umbauprozesse während der Zahnbewegung wurden durch Differenzierung spezialabhängiger Knochenstrukturen und Fasertypen näher betrachtet [Reitan & Kvam, 1971]. Durch Vergleich der Kieferknochenstrukturen von Menschen mit denen von tierischen Spezies wie Affen, Hunden und Ratten konnte eine veränderte Reaktion auf Belastung der lockeren humanen Knochenstruktur mit ihren weiten Knochenmarkshohlräumen und Osteonen nachgewiesen werden. Die vestibuläre/orale Knochenlamelle tierischer Arten ist deutlich kompakter, dichter und weniger anfällig für Resorptionen. Diese anatomischen Differenzen exemplifizieren darüber hinaus die humanen Resorptionsprozesse der Druckseite während einer längeren orthodontischen Therapie [Reitan & Kvam, 1971]. Weiterhin befasste sich Reitan [1974] mit angewandten orthodontischen Kraftvektoren. Extrusions-, Intrusions- und Tipping-Bewegungen der Zähne führten in seinen Untersuchungen zu Wurzelresorptionen, welche jedoch bei moderaten Kräften gering ausfielen und durch zellulären Wurzelzement aufgefüllt wurden. Deutliche externe, apikale Wurzelresorptionen haben hingegen kein Regenerationspotenzial. Wurzeln im Wachstum wiederum wurden in ihrer Entwicklung von apikalen Resorptionen nicht beeinträchtigt. Grund dafür ist ihre dick ausgeprägte Schicht Prädentin, die schützend gegen resorptive Prozesse wirkt [Reitan, 1974]. Ein Auftreten von Wurzelresorptionen an orthodontisch bewegten Schneidezahnwurzeln von heranwachsenden Patienten wird als sehr gering eingeschätzt [Xu & Baumrind, 2002]. Nicht ausgebildete Wurzeln blieben von apikalen Resorptionen verschont und entwickelten sich regulär [da Silva Filho et al., 2004]. Zudem scheinen wurzelgefüllte Zähne weniger anfällig für iatrogen induzierte Wurzelresorptionen zu sein als vitale Zähne [Kolcuoglu & Zeynep Oz, 2020].

Die individuellen Wurzelformen oberer Inzisivi wurden in einer weiteren Studie näher inspiziert, um eine tendenzielle Resorptionsanfälligkeit einschätzen zu

können [Levander & Malmgren, 1988]. Diese Untersuchung erfolgte auf Grundlage der kieferorthopädischen Anfangsröntgenbildern mit den Zwischendiagnostik- und den Abschlussröntgenbildern der Patienten. Die röntgenologische Zwischendiagnostik erfolgte dabei ca. sechs bis neun Monate nach Behandlungsbeginn. Deutliche Wurzelresorptionen betrafen vorwiegend pipettenförmige und abgerundete Wurzelspitzen, wohingegen reguläre Wurzelformen kaum Destruktionen aufwiesen. Die unterschiedliche Resorptionsanfälligkeit der verschiedenen Wurzelformvarianten ließ eine Risikoeinschätzung für auftretende Wurzelresorptionen während der orthodontischen Behandlung zu. Zudem konnte bei Auftreten irregulärer Wurzelkonturen nach sechs bis neun Monaten mit progredienten Resorptionen gerechnet werden [Levander & Malmgren, 1988]. Eine Behandlungspause während einer kieferorthopädischen Therapie mit festsitzenden Apparaturen hatte positive Auswirkungen auf die Anzahl der resorbierten Zahnwurzeln [Levander et al., 1994]. Entsprechend reichte eine zwei- bis dreimonatige Behandlungspause bereits aus, um das Auftreten von Wurzelresorptionen deutlich zu reduzieren. Diese sollte sechs Monate nach Behandlungsbeginn erfolgen. Ohne Unterbrechung der Therapie lagen in der Kontrollgruppe deutlich vermehrt Wurzelresorptionen vor [Levander et al., 1994].

Der Einfluss mechanischer Elemente und die orthodontischer Kraftvektoren wurden zudem näher betrachtet [Mirabella & Årtun, 1995; Sameshima & Sinclair, 2001; Weiland, 2003; Marques et al., 2010; Toyokawa-Sperandio et al., 2021]. Prinzipiell können jegliche orthodontisch induzierte Bewegungen Wurzelresorptionen begünstigen, doch scheint insbesondere eine in der Richtung ständig wechselnde Belastung (engl. „Jigglings“) von Bedeutung zu sein [Stuteville, 1938; Brezniak & Wasserstein, 1993]. Jigglings wiederum wird u. a. durch Dysfunktionen wie Zungenpressen, Bruxismus und Nägelkauen gefördert, sodass diese vor Behandlungsbeginn abgestellt werden sollten [Brezniak & Wasserstein, 2002; Lopatiene & Dumbravaite, 2008].

Seit Anfang des 21. Jahrhunderts wurden zunehmend genetische Komponenten mit Wurzelresorptionen in einen kausalen Zusammenhang gebracht. Der Polymorphismus des IL-1-Gens beispielsweise resultierte in einer messbar geringeren Produktion des IL-1 β [Al-Qawasmi et al., 2003]. Homozygote Patienten des IL-1 β -Gens waren häufiger von externen apikalen Wurzel-

resorptionen über 2 mm betroffen, als heterozygote Träger des Allels. Demnach steigerte eine geringere IL-1 β -Produktion das Auftreten von Wurzelresorptionen bzw. begünstigte den Einfluss weiterer Umwelteinflüsse wie Dysfunktionen und biomechanischen Variablen auf die Resorptionsanfälligkeit einer Zahnwurzel. Dieser neuer Erklärungsansatz von externen Wurzelresorptionen wurde durch eine weitere Studie, die die genetische Basis von Wurzelresorptionen mit 50 % und mehr einschätzte, bestätigt [Hartsfield et al., 2004]. Weiterhin wurden IL-6-Gene, Tumornekrosefaktoren und das pro-inflammatorische Enzym Caspase-1 untersucht [Ciurla et al., 2021]. Sie konnten jedoch nicht im Kontext von auftretenden Wurzelresorptionen gebracht werden, obwohl die ausgewerteten Panoramaschicht- und Fernröntgenseitenaufnahmen 40 % der Zähne mit Wurzelresorptionen zeigten. Abermals stellte sich ein Einzelnukleotidpolymorphismus des IL-1 β -Gens mit einem bis zu vierfach höheren Wurzelresorptionsrisiko als ausschlaggebend heraus. Demgegenüber konnte ein bestimmter Subtyp des Einzelnukleotidpolymorphismus des IL-6-Gens identifiziert werden, der positiv mit dem Auftreten von Wurzelresorptionen korrelierte [Guo et al., 2016]. Bereits bei einer veränderten Basenpaarung des IL-6-Gens traten unter den Probanden jedoch keine übermäßigen Wurzelresorptionen auf. Neben der Detektion genetischer Besonderheiten widmen sich wissenschaftliche Arbeiten seit Anfang des 21. Jahrhunderts zunehmend dem Verständnis und der Interpretation von Wurzelresorptionen auf molekularer Ebene [Fukushima et al., 2003; Yamaguchi et al., 2006; Tyrovola et al., 2008]. Bereits 1998 wurde die Hyalinisation des parodontalen Gewebes mit auftretenden Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie in Verbindung gebracht [Kuroi & Owman-Moll, 1998]. Das RANK/RANKL/OPG-System spielt hierbei eine zentrale Rolle und fungiert als Mechanismus zur Differenzierung und Aktivierung von Osteoklasten für ossäre Umbauprozesse [Yamaguchi, 2009]. Direkte oder indirekte Knochenresorption tritt infolge der Hyalinisation, hervorgerufen durch die orthodontischen Kräfte, unumgebar auf und sorgt für die gewünschte Zahnbewegung. Kommt es jedoch zu stärkeren Kräften auf den Alveolarknochen wird die Expression von RANK hochreguliert, während die OPG-Synthese zeitgleich abnimmt. Infolge dessen wird die Osteoklastengese in den komprimierten Zellen des parodontalen Ligaments

gesteigert und es kommt neben der Resorption des Knochens zu einer Resorption der umliegenden Zahnwurzeln [Yamaguchi et al., 2006].

Durch das Verständnis molekularer Mechanismen wurden außerdem Biomarker im gingivalen Sulkusfluid ermittelt, die eine frühzeitige Risikoeinschätzung von Wurzelresorptionen ermöglichen sollen [Mah & Prasad, 2004; Kereshanan et al., 2008; Atsawasuwan et al., 2018]. Als potentieller Biomarker für Wurzelresorptionen kommt u. a. Dentinsialoprotein (DSP) vor, ein dentinspezifisches Matrixproteine, welches die Mineralisation von Prädentin in Dentin fördert und bei resorptiven Prozessen im Sulkusfluid nachweisbar ist [Lombardo et al., 2016]. Mit Hilfe neuer ELISA-Techniken unter Einsatz von Mikroplastikträgern, beschichtet mit spezifischen Antikörpern für DSP („micro-bead/ELISA“), gelang es den Forschern den Anteil des Dentinsialoproteins zu quantifizieren. Dieser technische Fortschritt ermöglichte den Nachweis bereits geringster Konzentrationen von DSP und somit eine frühzeitige Intervention bei anfänglichen Wurzelresorptionen [Lombardo et al., 2016]. Darüber hinaus wurden mikroRNA-Sequenzen entschlüsselt, die in der Signaltransduktion von Resorptionsprozessen eine wichtige Rolle spielen [Atsawasuwan et al., 2018; Jiang et al., 2021]. Daneben dient der Einsatz der digitalen Volumentomographie der Darstellung von kleinsten Resorptionslakunen auf der Zahnoberfläche bei gleichzeitig geringer Röntgenstrahlenbelastung [Sameshima & Iglesias-Linares, 2021].

Bis heute ist die Ätiologie von auftretenden Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie aufgrund der Komplexität nicht vollständig geklärt. Trotz modernster Diagnostikmethoden konnte bislang kein konkreter Parameter zur Risikoeinschätzung identifiziert werden. Die Wissenschaft rechnet jedoch mit der Entwicklung einer präzisen Diagnostik und Risikoevaluation für externe apikale Wurzelresorptionen durch zukünftige genetische Analysen [Ciurla et al., 2021].

2.2 Pathogenese von Wurzelresorptionen

Reitan [1967] erforschte den Mechanismus der Zahnbewegung auf histologischer Ebene und spezifizierte Druck- und Zugzonen des Zahnhalteapparates. Er entdeckte zudem einen möglichen Zusammenhang der Knochen-

resorptionsmechanismen und den Zahnwurzelresorptionen orthodontisch bewegter Zähne. In der initialen Phase der Zahnbewegung kommt es dabei zur Hyalinisation der Druckseite. Diese zellfreien Knochenabschnitte treten infolge einer Kompression mit Minderdurchblutung des parodontalen Ligaments auf. Anschließend erfolgt eine unterminierende Resorption des Knochens, die nachfolgend zum Stillstand kommt. In der zweiten Phase läuft die eigentliche Zahnbewegung weitestgehend kontinuierlich ab [Reitan, 1967]. Weiterhin kommt es infolge der Kompression der Druckseite und des verengten parodontalen Spalts langfristig zu einer Zirkulationsstörung, welche das Gewebe in seiner Vitalität beeinträchtigt [Göz & Rakosi, 1989]. Kurzfristig andauernde Belastungen, wie sie bei intermittierenden kieferorthopädischen oder physiologischen Kräften auftreten, führen unter gesunden Parodontalverhältnissen zunächst zu einer elastischen Deformation des Knochens ohne Unterbrechung der Blutzufuhr. Wurzelresorptionen treten daher vorwiegend unter Patienten mit festsitzenden Apparaturen bzw. kontinuierlich angewandten Kräften infolge der gestörten Blutzirkulation auf [Göz & Rakosi, 1989]. Generell ist die verschiedenartige elastische Deformationsfähigkeit des spongiösen Alveolarknochens und der mineralisierten Zähne, ebenso wie die fehlende Durchblutung der Zahnoberfläche, ursächlich für die geringere Resorptionsanfälligkeit der Zähne im Vergleich zum umliegenden Knochen [Göz & Rakosi, 1989].

Das Ligamentum parodontale unterliegt bestimmten Umbauvorgängen, die während der Zahnbewegung stattfinden und für eine vorübergehende Schwächung bis hin zur vollständigen Resorption der desmodontalen Fasern der Zugseite führen [Göz & Rakosi, 1989]. Im Tierexperiment konnte zwei bis acht Wochen nach Kraftapplikation eine Reparatur des parodontalen Fasersystems verzeichnet werden. Die Vorgänge während der Komprimierung des parodontalen Ligaments wurden mit dem zeitlichen Vorkommen von Wurzelresorptionen näher betrachtet [Kuroi & Owan-Moll, 1998]. Im Zuge dessen wurde neben der Hyalinisation des Knochens ein Primärstadium bzw. eine Semihyalinisation definiert. Die Semihyalinisation tritt bereits ein bis zwei Wochen nach leichter orthodontischer Kraftapplikation auf. Neben zellfreien Knochenabschnitten, weisen die semihyalinisierten Knochenbereiche zudem vitales Gewebe auf und angrenzende Zähne unterliegen weniger

Wurzelresorptionen. Fünf bis sieben Wochen nach Kraftapplikation nimmt das hyalinisierte Gewebe ab, wird unterminierend resorbiert und anschließend regeneriert. Zusätzlich kommt es zu einer direkten Resorption nekrotischen Gewebes nahe der Wurzeloberfläche [Kurol & Owman-Moll, 1998]. Bei 93 % der untersuchten Zähne konnten Wurzelresorptionen festgestellt werden, obwohl mehr als die Hälfte der Wurzeloberflächen der angrenzenden hyalinisierten Bereiche zunächst intakt erschienen. Eine mögliche Begründung scheint das nachträgliche Auftreten von Wurzelresorptionen nach Schädigung des Wurzelzementes zu sein, mit denen schon bei leichter Kraftapplikation zu rechnen ist [Kurol & Owman-Moll, 1998].

Anhand von lichtmikroskopischen Untersuchungen an Nagetieren konnte die initiale Phase kieferorthopädisch induzierter Wurzelresorptionen im Bereich der Druckzone auf zellulärer Ebene dokumentiert werden [Brudvik & Rygh, 1993]. Es gelang die primären Zellen bei der Penetration der Wurzeloberfläche zu charakterisieren. Im parodontalen Spaltraum, zwischen hyalinisiertem Knochen und vitaler parodontaler Membran, treten zunächst nicht-säurehaltige makrophagenähnliche Zellen auf. Im weiteren Verlauf nehmen Matrixmetalloproteinasen, genauer Tartar-resistente Säurephosphatasen (Säurephosphatase 5), aus den Knochen in Richtung Zahnoberfläche zu [Brudvik & Rygh, 1993]. Zahnwurzelresorptionen gehen mit einem Verlust von Dentin, Wurzelzement und/oder Knochen einher [Gutmann et al., 1999; Sasaki, 2003]. Die dentalen Resorptionsmechanismen scheinen dabei den ossären zu ähneln. Eine zentrale Rolle spielen Monozyten, Makrophagen und Osteoklasten [Gutmann et al., 1999]. Bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts stehen osteoklastenähnliche Zellen im Zusammenhang mit der Entstehung von Wurzelresorptionen. Nachfolgend werden die zellulären Umbauprozesse des Knochens nach Gutmann et al. [1999] veranschaulicht. Nach einer Verletzung oder Irritation des Knochens kommt es zunächst zur Ausschüttung proinflammatorischer Zytokine, infolgedessen Monozyten rekrutiert werden. Diese differenzieren sich zu Makrophagen aus, welche nach Gewebezerfall chemotaktischer Stoffe freisetzen und in den Knochen einwandern. Makrophagen zersetzen nekrotisches Gewebe und transportieren entstandene Schadstoffe ab. Im Gegensatz zu Osteoklasten besitzen sie jedoch keinen Bürstensaum („ruffled border“) und bilden keine Resorptionslakunen aus.

Osteoklasten sind mehrkernige Riesenzellen, die aus mononuklearen Vorläuferzellen hervorgehen und sich durch ihren speziellen Aufbau auszeichnen [Gutmann et al., 1999]. Dieser besteht aus dem bereits erwähnten zentral liegenden, vesikelreichen Bürstensaum und den peripher gelegenen Adhäsionsapparat, mit Hilfe dessen die Osteoklasten im engen Kontakt den Knochen aufliegen. Ihr Zytoplasma ist organellarm („clear zone“) mit vielen kontraktilen Proteinen. Sie finden sich in den sog. Howship-Lakunen, kleinen Vertiefungen in Wurzelzement, Dentin und Knochen, wieder. Innerhalb der Howship-Lakunen werden anorganische und organische Substanzen des umliegenden Gewebes gelöst. Dafür verfügen die Osteoklasten über Protonenpumpen in ihrem Bürstensaum, die es ihnen ermöglichen einen sauren pH-Wert von 3,0 bis 4,5 zu generieren. Zudem fördert das osteoklastenspezifische Enzym Carbonanhydrase II die Bereitstellung von ausreichend H⁺-Ionen durch Umwandlung von CO₂ in H₂CO₃. Anorganische Matrix wird hingegen vorwiegend von Kollagenasen, Matrix-Metalloproteinasen und Cysteinproteasen abgebaut [Gutmann et al., 1999]. An Zähnen mit externen entzündlichen Wurzelresorptionen oder externen Ersatzresorptionen wurden erhöhte Konzentrationen von MMP-2 und MMP-9 nachgewiesen [Lima et al., 2021]. Erhöhte Expressionsraten und Aktivierungen von Matrixmetalloproteinasen wurden ebenfalls im Zusammenhang mit Gewebsdegenerationen und einer erhöhten osteolytischen Aktivität in verschiedenen Bereichen des Kiefers, wie z. B. parodontalen Erkrankungen und apikale Parodontitis detektiert [Lima et al., 2021]. Die osteoklastische Aktivierungs- und Rekrutierungskaskade über den RANKL/RANK/OPG-Mechanismus wurde Mitte der 1990er entdeckt und trug einen entscheidenden Fortschritt zum Verständnis der Knochenumbauprozesse bei [Boyce & Xing, 2007]. Die Signalkaskade beginnt mit der Expressierung des rezeptoraktivierenden Liganden NF-κB (RANKL) durch Osteoblasten und Stammzellen aus dem Stroma. RANKL bindet an seinen Rezeptor RANK, der sich auf der Oberfläche von Prä-Osteoklasten befindet. Die Interaktion induziert eine Umwandlung der Präkursorzellen zu mehrkernigen Osteoklasten mit gleichzeitiger Aktivierung dieser und folglich gesteigerter Knochenresorption. Osteoprotegerin (OPG) fungiert als Gegenspieler und wirkt negativ regulierend, indem es die Interaktion von RANKL und RANK inhibiert. Das ausgeglichene Verhältnis von RANKL und OPG bestimmt somit die Knochenumbaurate und

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

dient der Protektion übermäßiger Knochenresorption [Boyce & Xing, 2007]. Studien zur Expression von RANKL und OPG durch Zellen des parodontalen Ligaments (PDL-Zellen) an nicht-resorbierten und resorbierten Milchzähnen und bleibenden Zähnen zeigten weitere Unterschiede auf [Fukushima et al., 2003]. Die PDL-Zellen von nicht-resorbierten und bleibenden Zähnen setzen vorwiegend OPG frei, während die Zellen an resorbierten Milchzahnwurzeln erhöht RANKL abgeben. Es ist bestätigt, dass bei einem Missverhältnis des RANK/RANKL/OPG-Systems vermehrt Wurzelresorptionen an bleibenden Zähnen auftreten. Dies resultiert aus der Förderung der Freisetzung von RANKL und gleichzeitiger OPG-Reduktion durch die PDL-Zellen [Fukushima et al., 2003]. Forschungen an geschädigten Zahnpulpaen zeigten zudem, dass ein hoher Osteoprotegerinspiegel einen resorptionsschützenden Effekt begünstigt [Nishida et al., 2021]. Weiterhin konnten immunhistologisch RANK-positive Zellen an Milchzähnen, mehrkernige Odontoklasten und einzellige Präkursorzellen innerhalb von Resorptionslakunen auf den Dentinoberflächen nachgewiesen werden [Lossdörfer et al., 2002]. RANKL wurde ebenfalls in Stromazellen auf resorbierten Dentinoberflächen nachgewiesen [Sasaki, 2003]. Dies lässt Rückschlüsse auf einen ähnlichen Resorptionsmechanismus mineralisierten organischen Materials wie Knochen und Zähne zu.

Die osteoklastische Funktion wird sowohl systemisch als auch lokal reguliert [Gutmann et al., 1999]. Die Aktivierung der Osteoklasten wird hormonell über das Nebenschilddrüsenhormon Parathormon gesteuert, welches über das RANKL-System wirkt. Die Inhibierung erfolgt über das Schilddrüsenhormon Calcitonin. Darüber hinaus wird die Osteoklastendifferenzierung aus Präkursorzellen und ihre Aktivität über pro-inflammatorische Zytokine wie z. B. Interleukin-1, Interleukin-6 und Tumornekrosefaktor- α vermittelt [Gutmann et al., 1999]. Das RANK/RANKL-System spielt somit eine wesentliche Rolle der Hartgewebsresorption, wenngleich es nicht allein für die Komplexität von physiologischen und pathologischen Wurzelresorptionen verantwortlich ist [Lossdörfer et al., 2002].

2.3 Ätiologie von Wurzelresorptionen

Die Komplexität auftretender Wurzelresorptionen ist bis heute nicht vollständig geklärt. Diverse Theorien zur Entstehungsursache wurden exploriert und Studien bringen stetig neue Erklärungsansätze. Dennoch treten einige Vermutungen immer wieder in den Vordergrund, die nachfolgend erläutert werden.

2.3.1 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und der anatomischen Zahnmorphologie

Inger Kjaer [1995] legte dentale und ossäre Charakteristika fest, die nach ihren Untersuchungen mit einem erhöhten Risiko für kieferorthopädisch induzierte Wurzelresorptionen einhergingen. Entsprechend werden diese Merkmale in der vorliegenden Arbeit nachfolgend „Kjaer-Merkmale“ genannt.

Sie unterschied dentale Charakteristika bleibender Zähne von Pathologien im Milchzahngewebiss und fand einen Zusammenhang beider Dentitionen. Prädestinierend für Wurzelresorptionen sind nach Kjaer [1995] folgende anatomischen Merkmale im bleibenden Gebiss:

- schmale Zahnkronen
- palatinale Kroneneinstülpung der Oberkiefer Frontzähne (Foramen caecum)
- schmale Zahnwurzeln
- kurze Zahnwurzeln
- kurze distale Zahnwurzel der unteren ersten Molaren
- Zahnwurzelkrümmungen
- Taurodontismus
- Mikroodontie
- Spätanlagen generalisiert (Dentitio tarda) oder isoliert, einzelne Zähne betreffend
- Aplasien
- ektopisch verlagerte Zähne
- pathologische Zahnwurzelresorptionen.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Im Milchzahngewebiss sind folgende Merkmale nach Kjaer [1995] prädestinierend für Wurzelresorptionen bleibender Zähne während einer kieferorthopädischen Behandlung:

- atypische Milchzahnresorptionen
- in Infraokklusion stehende Milchzähne
- Aplasien.

Weiterhin definierte Kjaer [1995] folgende Besonderheiten, die im Zusammenhang mit Wurzelresorptionen auftraten:

- Odontom
- abgeflachte Kiefergelenkskondylen („Lipping“)
- asymmetrischer Unterkieferarm
- offener Biss.

Weitere Studien konnten ebenfalls Zähne mit Mikroodontie und Taurodontie, Hypo- und Hyperdontien als Risikofaktoren für Wurzelresorptionen identifizieren [Valladares Neto et al., 2013]. Ferner wurde das Vorhandensein mindestens einer zahnmorphologischen Abnormität mit einem gesteigerten Wurzelresorptionsrisiko während der kieferorthopädischen Therapie in Kontext gebracht [Thongudomporn & Freer, 1998].

Zudem wurde ein Zusammenhang von Wurzelresorptionen und einem offenen Biss beschrieben, was jedoch ebenso der angewandten kieferorthopädischen Kraft zuzuschreiben sein konnte [Abuabara, 2007; Motokawa et al., 2013]. Andere Untersuchungen zu zahnmorphologischen Merkmalen, wie z. B. kurze Zahnwurzeln, schmale Zahnkronen, Zähne mit Taurodontismus, ektopisch verlagerte Zähne oder Aplasien, kamen dahingegen zu dem Ergebnis, dass dentale Anomalien und ihre Anzahl pro Patient nicht prädestinierend für übermäßig auftretende Wurzelresorptionen sind [Lee et al., 1999]. Der Einfluss morphologischer Zahnmerkmale auf Wurzelresorptionen ist demnach in der Literatur kontrovers beschrieben. Allerdings scheint insbesondere die anatomische Wurzelform und die Konfiguration der Wurzelspitze maßgeblich für die Resorptionsanfälligkeit eines Zahnes verantwortlich zu sein. Pipettenförmige oder stumpfe Wurzelspitzen, Wurzelabknickungen und kurze Zahnwurzeln sind

besonders für einen pathologischen Abbau disponiert [Smale et al., 2005; Abuabara, 2007; Kamble et al., 2012].

2.3.2 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und dem Geschlecht

Über den Einfluss des Geschlechts auf Wurzelresorptionen wird in der Literatur ebenfalls ambivalent berichtet. In der Studie von Kjaer [1995] waren zumeist weibliche Patienten von Wurzelresorptionen betroffen. Einen geschlechter-spezifischen Unterschied konnten weitere Untersuchungen belegen, in denen ebenfalls Mädchen prädestinierter für iatrogene Wurzelresorptionen erschienen als Jungen [Jiang et al., 2017]. Allerdings waren in diesen Studien weibliche Patienten in der Überzahl und es lag kein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis vor.

Im Gegensatz dazu waren in anderen Studien männliche Patienten häufiger von Resorptionen betroffen, was wiederum ebenso auf eine längere Behandlungsdauer der männlichen Jugendlichen zurückzuführen sein kann und so ein multifaktorielles Phänomen nicht ausgeschlossen ist [Bayir & Gumus, 2021].

Andere Forschergruppen konnten keine Korrelation zwischen dem Geschlecht und Wurzelresorptionen feststellen [Goldie & King, 1984; Lopatiene & Dumbravaite, 2008; Pastro et al., 2018; Ageel et al., 2021]. Stattdessen wurden u. a. hormonelle Faktoren [Lopatiene & Dumbravaite, 2008] und Vitaminmangelzustände [Goldie & King, 1984] eruiert.

2.3.3 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und Hormonen, Vitaminen und Mineralstoffen

Sowohl ein ausgeglichener Mineralstoff- und Vitaminhaushalt, als auch ein hormonelles Gleichgewicht, sind nicht nur für den Knochenerhalt und -umbau essenziell, sondern spielen eine Rolle bei der Genese von Wurzelresorptionen. Der Einfluss von Schilddrüsenhormonen, während der Behandlung mit kieferorthopädischen Apparaturen, wurden an Ratten untersucht [Vázquez-Landaverde et al., 2002]. Bereits eine geringe Dosis dieser Hormone begünstigte eine Schutzfunktion der Wurzeloberfläche. Ein Östrogenmangel wiederum führt

bekanntlich zur Abnahme der Knochendichte, sodass v. a. bei Frauen altersbedingt häufig Osteoporose diagnostiziert wird [Väänänen & Härkönen, 1996]. Neben dem Einfluss auf den Knochenumbau wirkt sich der Östrogenspiegel ebenso auf dentale Apizes aus [Lopatiene & Dumbravaite, 2008; Iglesias-Linares et al., 2016; Amaro et al., 2020]. Unter einem Östrogenmangel wurden orthodontische Zahnbewegungen beschleunigt, jedoch traten gravierendere Zahnwurzelresorptionen auf [Iglesias-Linares et al., 2016]. Vor allem die distalen Zahnwurzeln, der Kraft abgewandten Seite, wiesen schwerwiegende Resorptionen auf [Iglesias-Linares et al., 2016]. Weiterhin konnte der Einfluss des ossären Calciummetabolismus und der Alveolar-knochendichte auf orthodontische Zahnbewegungen und Wurzelresorptionen dokumentiert werden. Ein Calciummangel, hervorgerufen durch einen sekundär induzierten Hyperparathyreoidismus, wirkte sich negativ auf die Knochendichte aus [Goldie & King, 1984]. Zudem bestand eine direkte Korrelation zwischen einer erhöhten Zahnbeweglichkeit und einer erhöhten Knochenumbaurate. Unter einem Calciumdefizit traten hingegen signifikant weniger Wurzelresorptionen auf [Goldie & King, 1984]. Darüber hinaus scheinen gewisse medikamentöse Calcium-Kombinationen Wurzelresorptionen stabilisieren zu können. Die Zusammensetzung von Calcium-Ionen und Prostaglandin E₂, ebenso wie die Kombination von Prostaglandin E₂ und dem Schilddrüsenhormon Thyroxin, zeigten eine protektive Wirkung auf die Zahnwurzeln [Seifi et al., 2003, 2015]. Durch die Verabreichung dieser Wirkstoffkombinationen konnte der Anteil resorbierter Zähne gesenkt werden. Darüber hinaus wurde die Behandlungszeit durch Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegungen verkürzt. Die orale Einnahme des Prostaglandin E₁-Analog Misoprostol konnte orthodontische Zahnbewegungen gleichermaßen beschleunigen und das Auftreten von Wurzelresorptionen reduzieren [Sekhavat et al., 2002]. Weiterhin hatten die Vitamine C und E einen positiven Einfluss auf die kieferorthopädische Behandlungsdauer und die Schnelligkeit der Zahnbewegung [Bolat et al., 2020]. Bereits 1936 wurde ein Zusammenhang zwischen einem Mangel an Vitamin C und D und Wurzelresorptionen erwähnt [Becks, 1936]. Ein Vitamin D-Mangel konnte in aktuellen Studien jedoch nicht direkt in Verbindung mit einem erhöhten Wurzelresorptionsrisiko kieferorthopädisch behandelter Patienten gebracht werden [Tehranchi et al., 2017]. Allerdings konnte ein Vitamin D-Rezeptor-

Polymorphismus identifiziert werden unter dem betroffenen Patienten vermehrt Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Behandlung aufwiesen [Fontana et al., 2012].

2.3.4 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und oralen Fehlfunktionen

Orale Fehlfunktionen stehen im Verdacht den apikalen Abbau zu fördern, weswegen Patienten mit Dysfunktionen und Dyskinesien von einigen Studie zu Wurzelresorptionen ausgeschlossen wurden [Marques et al., 2010; Bayir & Gumus, 2021]. Über den Einfluss von oralen Fehlfunktionen auf Resorptionserscheinungen an Zahnwurzeln besteht in der Wissenschaft dennoch Uneinigkeit. Bruxismus, Nägelkauen und ein pathologischer Zungendruck können u. a. einen offenen Biss und ebenfalls Wurzelresorptionen fördern [Brezniak & Wasserstein, 1993; Hartsfield et al., 2004]. Daneben wird in der Literatur Zigarettenrauchen als prädestinierend für Wurzelresorptionen erwähnt [Ullrich et al., 2021]. Der Nikotinkonsum ging mit einer erhöhten Osteoklastengeneese einher. Dies induzierte schnellere orthodontische Zahnbewegungen, welche aber mit einem gleichzeitigem parodontalen Verlust und apikalen Wurzelresorptionen auftraten [Ullrich et al., 2021]. Demgegenüber konnten andere Untersuchungen keinen direkten Einfluss von parafunktionellen Angewohnheiten wie z. B. Nägelkauen auf Wurzelresorptionen feststellen [Owman-Moll & Kuroi, 2000; Bartzela et al., 2020].

2.3.5 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und Zahntraumata

Traumatisch geschädigte Zähne sind anfälliger für Ersatzresorptionen und ankylosieren langfristig häufig [Bendoraitiene et al., 2017]. Liegen vor Beginn der kieferorthopädischen Behandlung bereits Wurzelresorptionen vor, kommt es währenddessen zu einer progredienten Ausprägung [Brezniak & Wasserstein, 1993; Picanço et al., 2013]. Voranschreitende Wurzelresorptionen lassen sich durch eine endodontische Therapie mit abschließender Wurzelfüllung aufhalten [Lee & Lee, 2016].

2.3.6 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und Allergien und Asthma

Allergien sind mit einem erhöhten Vorkommen externer Wurzelresorptionen bei kieferorthopädisch behandelten Patienten in Verbindung gebracht worden [Nishioka et al., 2006]. So erlitten hypersensibilisierte Patienten während einer kieferorthopädischen Therapie mehr Wurzelresorptionen [Owman-Moll & Kurol, 2000]. Ein wissenschaftlicher Erklärungsansatz liegt im erhöhten Anfall proinflammatorischer Entzündungsmediatoren hypersensibilisierter Patienten [McNab et al., 1999]. Diese gelangen wiederum über den Blutfluss zum parodontalen Ligament an die Zahnwurzel und fördern so Destruktionen an der Wurzeloberfläche. Unter Asthmatikern wurden ebenfalls deutlich mehr Wurzelresorptionen nachgewiesen als unter gesunden Patienten [McNab et al., 1999]. Allerdings traten in der Gruppe der Asthmapatienten lediglich vermehrt leichte Wurzelresorptionen auf, die prognostisch keine schweren dentalen Langzeitfolgen bedingen. Wurzelresorptionen schwererer Grade kamen in beiden Kontrollgruppen gleichermaßen vor [McNab et al., 1999]. Darüber hinaus konnte in Tierversuchen die schädlichen Effekte der Allergisierung auf Wurzelresorptionen während orthodontischer Zahnbewegungen bestätigt und Acetylsalicylsäure als mögliches Therapeutikum identifiziert werden [Murata et al., 2013]. Acetylsalicylsäure unterdrückte die Konzentrationen von IL-1 β , IL-6, TNF- α und RANKL mRNAs etc. und verhinderte so radikuläre Zahn-destruktionen.

2.3.7 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und der Genetik

Neben systemischen Erkrankungen wie Allergien wurden ebenfalls genetische Erkrankungen im Zusammenhang mit externen Wurzelresorptionen gebracht. Kjaer et al. [2008] betrachteten dentale Kriterien der Ektodermalen Dysplasie, wie z. B. schmale Zahnkronen, Kroneneinziehungen, Taurodontismus, und konnten unter diesen Patienten schwerwiegendere Zahnresorptionen der ersten Molaren feststellen. Außerdem scheinen Patienten mit Osteodystrophia deformans (Morbus Paget) für Wurzelresorptionen anfälliger zu sein [Smith, 1978; Kjaer, 2013]. Durch immunhistologische Untersuchungen der wurzelnahen parodontalen Membranschichten wurden die verschiedenen Ursprünge

genetisch bedingter Wurzelresorptionen verifiziert. Wurzelresorptionen infolge von Morbus Paget gehen demnach auf die faserreiche ektomesenchymale Schicht zurück, wohingegen resorbierte Wurzeln von Patienten mit Ektodermaler Dysplasie ihren Ursprung von Malassez-Epithelresten nehmen [Kjaer, 2013]. Die physiologische Innervation dient weiterhin als Schutz der Wurzeloberfläche vor Resorptionen [Kjaer et al., 2012]. Nach einer durchgemachten neuronalen Virusinfektion wurden unter den betroffenen Patienten stark ausgeprägte Wurzelresorptionen festgestellt, die im Bereich der nicht geschädigten Nerven abrupt stoppte [Kjaer et al., 2012]. Patienten mit einer unilateralen Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalte zeigten während einer Multibandtherapie an den zentralen Schneidezähnen und Eckzähnen der Spaltseite vermehrt Wurzelresorptionen als auf der Gegenseite [Bartzela et al., 2020]. Zudem wurden Differenzen unter ethnischen Gruppen ausgemacht: Asiaten scheinen weniger anfällig für Wurzelresorptionen zu sein als Weiße oder Hispanos [Sameshima & Sinclair, 2001]. Neben genetischen Erkrankungen und ethnischen Unterschieden wurden genaue Genvarianten detektiert, die ein übermäßiges Wurzelresorptionsrisiko bedingen. Der Polymorphismus des IL-1 β -Gens wird immer wieder in Verbindung mit externen Wurzelresorptionen gebracht [Al-Qawasmi et al., 2003; Hartsfield et al., 2004; Iglesias-Linares et al., 2012; Jiang et al., 2017; Ciurla et al., 2021]. Insbesondere ein Polymorphismus des ersten Allels an der Lokalisation +3954 korrelierte mit einer erniedrigten Produktion von IL-1 β [Al-Qawasmi et al., 2003]. Ein abnehmender IL-1 β -Spiegel wirkte durch Abnahme der Alveolar-knochenumbaurate stressinduzierend auf die Zahnwurzeln und begünstigte das Auftreten von Wurzelresorptionen [Hartsfield et al., 2004]. IL-1 β +3954 wurde zudem im Zusammenhang mit parodontaler Destruktion identifiziert [Al-Qawasmi et al., 2003]. Die postorthodontische Resorptionsanfälligkeit wurzelkanal-behandelter Zähne unterscheidet sich bei Patienten mit einem IL1- α - und IL-1 β -Polymorphismus [Iglesias-Linares et al., 2012]. Für Patienten mit dem Genotyp rs1143634 des IL-1 β -Gens bestand ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von Wurzelresorptionen endodontisch behandelter Zähne nach einer kieferorthopädischen Behandlung. Demgegenüber konnte keine statistische Korrelation von Wurzelresorptionen zum IL1- α -Gen festgestellt werden [Iglesias-Linares et al., 2012]. Derselbe IL-1 β -Genotyp wurde in einer späteren Studie über Wurzelresorptionen während einer orthodontischen Retraktionstherapie evaluiert

[Jiang et al., 2017]. Neben dem IL1-Gen konnte zudem der IL-6-Genotyp SNP rs1800796 GC als Risikofaktor für externe Wurzelresorptionen identifiziert werden, unabhängig von dem Umfang der Zahnbewegung und dem Geschlecht der Patienten [Guo et al., 2016].

Zusätzlich wurde neben den Genveränderungen der Zytokine ein rs3102724 Polymorphismus des A-Allels des Osteoprotegerin-Gens identifiziert, der zu verstärkten externen Wurzelresorptionen führte [Borges de Castilhos et al., 2019]. Demgegenüber korrelierten die untersuchten RANK-Polymorphismen überwiegend nicht mit verstärkten Wurzelresorptionen [Borges de Castilhos et al., 2019].

Die individuellen genetischen Grundlagen sind die Basis für unerwünschte Wurzelresorptionen und können weitere Resorptionen, durch z. B. mechanische (Über-) Belastung und/oder Dyskinesien, bedingen [Hartsfield et al., 2004; Sharab et al., 2015]. Durch prädestinierende genetische Charakteristika kann das Risiko für die Entwicklung von Wurzelresorptionen um ein Vielfaches erhöht werden. In der Literatur wird u. a. ein bis zu vierfach höheres Wurzelresorptionsrisiko im Falle eines IL-1 β -Polymorphismus angenommen [Ciurla et al., 2021]. Generell führten orthodontische Kräfte innerhalb einer Stunde zu einer Freisetzung der Entzündungsmediatoren IL-1 β und TNF- α mit einem Höchstwert nach vierundzwanzig Stunden [Kapoor et al., 2014]. Bei Anwendung höherer orthodontischer Kräfte stieg der IL-1 β -Spiegel weiter und es traten zudem stärkere Schmerzintensität während der Behandlung auf [Kapoor et al., 2014].

2.3.8 Zusammenhang von Wurzelresorptionen und der kieferorthopädischen Therapie

2.3.8.1 Kieferorthopädische Bewegungsvektoren

Extensive kieferorthopädische Bewegungen und Kräfte können Wurzelresorptionen begünstigen. Daher sind sie häufiger unter kieferorthopädisch behandelten als unter unbehandelten Patienten zu finden [Jatania et al., 2012]. Wurzelresorptionen können aus jeglichen orthodontischen Zahnbewegungen resultieren [Brezniak & Wasserstein, 1993] und gehen nach neueren Erkenntnissen vermutlich aus Mikrorissen auf der Zahnwurzeloberfläche zurück [Xiao et al., 2020]. Bestimmte Bewegungsvektoren scheinen dabei besonders

riskant zu sein und die Zahnwurzeln zu belasten [Reitan, 1974]. Ein Risiko für Zahnwurzelresorptionen kann durch umfangreiche Zahnbewegungen und Jiggling entstehen [Stuteville, 1938]. Ein Jiggling resultiert aus einem ständigen Belastungswechsel eines Zahnes und tritt z. B. durch persistierende Dyskinesien, ungünstige Wachstumsrichtung mit langandauernder Traumatisierung oder durch Umkehr der Bewegungsrichtung auf [Göz & Rakosi, 1989]. Zugleich können intermaxilläre Gummizüge oder herausnehmbare Apparaturen ein Jiggling erzeugen [Brezniak & Wasserstein, 1993; Motokawa et al., 2012]. Durch den pathologischen Zungendruck gegen die Frontzähne entsteht über längere Zeit ein offener Biss. Infolgedessen wurden Dyskinesien und eine offene Kieferrelation in der Literatur als Risikofaktoren deklariert, obwohl die entstehende Jiggling-Belastung ursächlich für Wurzelresorptionen ist [Mirabella & Årtun, 1995]. Vor allem in der ersten kieferorthopädischen Behandlungsphase sind die Zahnwurzeln für Resorptionen durch Jiggling und okklusale Traumata besonders empfindlich [Brezniak & Wasserstein, 2002]. Darüber hinaus üben Intrusions-, Extrusions- und Rotationskräfte v. a. Stress auf den Apex aus und führen zu vermehrten Wurzelresorptionen, während Kräfte körperlicher Zahnbewegungen und Kippungen der Zahnkrone („Tipping“) sich über die gesamte Zahnwurzellänge verteilen und konzentrierter auf den Alveolarkamm auftreffen [Rudolph et al., 2001]. Die Intrusion der Frontzähne hat eine hohe Kraftkonzentration an den schmalen, ggf. zusätzlich abgeknickten Frontzahnapizes zur Folge und kann Resorptionsprozesse provozieren [Weltman et al., 2010]. Eine Intrusions- mit gleichzeitiger Retraktionsbewegung, wie sie u. a. bei Patienten mit bialveolärer Protrusion notwendig ist, erhöht das Wurzelresorptionsrisiko zusätzlich [Liou & Chang, 2010; Chen & Liu, 2020]. Vielfach wird insbesondere die Inzisivenintrusion als heikel eingestuft, jedoch sind beide Bewegungen in der Vertikalen, Intrusion und Extrusion, relevant für die Entstehung von Wurzelresorptionen [Göz & Rakosi, 1989; Sameshima & Sinclair, 2001]. Im Allgemeinen können Wurzelresorptionen infolge orthodontischer Zahnbewegungen auftreten, v. a. während der dentalen Intrusion und dem Torque der Zähne, wenngleich kein Bewegungsvektor harmlos ist und die meisten Korrekturen eine Kombination der Bewegungsrichtungen erfordern [Linkous et al., 2020]. Angesichts des geringen Wissens und dem Verständnis des Auftretens von Wurzelresorptionen, werden zumal mechanische Faktoren und

dentale morphologische Charakteristika in den Vordergrund gestellt [Kolcuoglu & Zeynep Oz, 2020]. Jedoch ist die Ätiologie von Wurzelresorptionen weitaus komplexer.

2.3.8.2 Art der verwendeten kieferorthopädischen Apparatur

Intermittierende Kräfte erzielen schonendere orthodontische Zahnbewegungen als kontinuierliche Kräfte [Ozkalayci et al., 2018]. Dennoch können leichte kieferorthopädische Kräfte und Therapien mit Alignern geringfügige Wurzelresorptionen provozieren, deren maximales Ausmaß lediglich unter 10 % der originalen Wurzellänge beträgt [Gay et al., 2017]. In einer Studie zu Aligner- und Multibracketbehandlungen traten nach sechs Monaten Behandlungsdauer vergleichbare Wurzelresorptionen leichten Grades auf. Diese stellen jedoch keine ungünstige Langzeitprognose dar [Toyokawa-Sperandio et al., 2021]. Allerdings kamen nach Abschluss der kieferorthopädischen Therapie mehr externe Wurzelresorptionen unter den festsitzend behandelten Patienten vor [Jyotirmay et al., 2021]. Die Behandlung mit festsitzenden Apparaturen lässt weitere folgende Unterschiede erkennen. In einer Split-Mouth-Studie wurden dazu Stahlbögen mit superelastischen Bögen verglichen: superelastisch einligierte Zähne bewegten sich deutlich schneller als die Zähne der Stahlbögen-Probanden [Weiland, 2003]. Die Tiefe der Resorptionslakunen erschien in beiden Gruppen gleich, jedoch präsentierte sich ein größerer Umfang, eine größere Fläche und ein größeres Volumen der Resorptionen auf der Wurzeloberfläche in der Gruppe der Probanden mit superelastischen Bögen von bis zu 140 %. So generierten Materialien mit pseudoelastischen Eigenschaften kontinuierlichere Kräfte, die gehäuft Wurzelresorptionen produzierten [Weiland, 2003]. Die Kraftdauer scheint hierbei ebenso entscheidend zu sein wie die angewandte Kraftstärke. Bei lang andauernder Kraft, die zu einer Nekrose des parodontalen Ligaments führt, wird eine Regeneration der Zahnwurzel verhindert und ist daher nicht empfehlenswert [Weiland, 2006]. Darüber hinaus sollten v. a. für Intrusionen der Zähne leichte Kräfte bevorzugt werden [Weltman et al., 2010]. Das Auftreten kieferorthopädisch induzierter Wurzelresorptionen unter Anwendung rechteckiger Bögen und intermaxillärer Gummizüge, ist ebenfalls bestätigt [Brezniak & Wasserstein, 1993; Levander et al., 1998]. Insbesondere Klasse III-Gummizüge wurden in Zusammenhang mit Resorptionen der distalen

Wurzel erster UK Molaren gebracht [Brezniak & Wasserstein, 1993; Lopatiene & Dumbravaite, 2008].

2.3.8.3 Chirurgisch unterstützende Therapien in der Kieferorthopädie

Die Entfernung bleibender Zähne dient der Platzbeschaffung im Falle eines ausgeprägten Platzmangels. Die bevorzugte Extraktion erster Prämolaren ermöglicht eine Distalisierung der Frontzähne bzw. Mesialisierung der Seitenzähne [de Araújo & Caldas, 2019]. Allerdings traten unter den Extraktionspatienten verstärkt Wurzelresorptionen auf [Sameshima & Sinclair, 2001; Picanço et al., 2013; Pastro et al., 2018; Fernandes et al., 2019]. Ursächlich sind umfangreichere Zahnbewegungen, die zum Lückenschluss nötig sind und die Rückzugskräfte, die auf den Apizes benachbarter Zähne wirken [Marques et al., 2010]. Extraktionstherapien werden in der Literatur dennoch widersprüchlich als Risikofaktor apikaler Wurzelresorptionen beschrieben und andere Untersuchungen wiederum konnten keinen Zusammenhang zu Wurzelresorptionen bestätigen [Nigul & Jagomagi, 2006; Nishioka et al., 2006].

Ferner stehen kombiniert kieferchirurgisch-kieferorthopädische Behandlungen nicht in einem signifikanten Zusammenhang mit auftretenden Wurzelresorptionen während der orthodontischen Therapie [Jung & Cho, 2011; Motokawa et al., 2012].

2.3.8.4 Behandlungsbeginn der kieferorthopädischen Therapie

Der Einfluss des Alters der Patienten auf das Wurzelresorptionsrisiko während einer kieferorthopädischen Therapie wird in der Literatur kontrovers aufgezeigt. Es scheint jedoch weitestgehend eine positive Korrelation zwischen dem Alter zu Behandlungsbeginn und auftretenden Wurzelresorptionen zu bestehen. Mit zunehmendem Alter traten demnach vermehrt Wurzelresorptionen auf [Hotz, 1934; Sameshima & Sinclair, 2001; Dindaroglu & Dogan, 2017]. Die kieferorthopädische Erwachsenentherapie sollte daher umsichtig durchgeführt werden [Sameshima & Sinclair, 2001]. Ein Behandlungsbeginn im späten Wechselgebiss vor Durchbruch des zweiten Molaren ist am günstigsten und minimierte das Auftreten von Wurzelresorptionen [Lin et al., 2007]. Ferner hat das Alter der Patienten einen entscheidenden Einfluss auf das Wurzelvolumen

nach der kieferorthopädischen Behandlung. Jugendliche mit einer Klasse II/1-Malokklusion verfügten über eine stärkere Heilungsfähigkeit nach Behandlungsabschluss als Erwachsene [Ge et al., 2021]. Darüber hinaus hatten Wurzeln vor Wachstumsabschluss kein Resorptionsrisiko bzw. wurden in ihrer physiologischen Entwicklung nicht gestört [da Silva Filho et al., 2004; Mauès et al., 2015]. Jugendliche wiesen zudem ein höheres RANKL/OPG-Verhältnis und eine höhere RANKL/OPG-Aktivität auf als Erwachsene, wodurch jugendliche Zahnbewegungen schneller umsetzbar waren [Kapoor et al., 2014]. Dahingegen konnten andere Studiengruppen keinen signifikanten Einfluss des Alters zu Behandlungsbeginn auf Wurzelresorptionen verifizieren [Baumrind et al., 1996; Pastro et al., 2018].

2.3.8.5 Behandlungsdauer der kieferorthopädischen Therapie

Kieferorthopädische Patienten werden des Öfteren vor Eingliederung einer Multibracketapparatur funktionskieferorthopädisch oder mit herausnehmbaren Zahnspangen vorbehandelt. In einer retrospektiven Untersuchung der Behandlung von Kindern mit einer Klasse II-Malokklusion wurden die Patienten in zwei Gruppen eingeteilt und es wurde nach einphasiger und zweiphasiger Behandlung differenziert [Brin et al., 2003]. Die einphasig behandelten Patienten wurden ausschließlich feststehend therapiert, während die andere Gruppe vor Multibracketinsertion mit einem Bionator oder einem Headgear herausnehmbar vorbehandelt wurden. In der einphasig therapierten Gruppe kamen die meisten Inzisivenresorptionen vor [Brin et al., 2003]. Dahingegen wies die Gruppe unter Verwendung herausnehmbarer sowie feststehender Apparaturen die geringste Anzahl milder bis ausgeprägter Wurzelresorptionen auf [Brin et al., 2003]. Zudem war die Resorptionsausprägung bei Reduktion eines vergrößerten Overjets im Vergleich zu einer geringeren sagittalen Stufe stärker [Brin et al., 2003; Fernandes et al., 2019]. Der Umfang der Retraktionsbewegung zur Reduktion der sagittalen Stufe sowie die Behandlungsdauer mit feststehenden Apparaturen waren von entscheidender Bedeutung für die Entstehung von externen Wurzelresorptionen [Brin et al., 2003]. Dennoch reagierten die patientenindividuellen Inzisivi uneinheitlich auf orthodontische Kräfte, sodass keine ausschließlich iatrogene Ursache zugrunde liegen konnte [Brin et al., 2003].

Eine lange kieferorthopädische Behandlungsdauer und eine starke orthodontische Kraftapplikation führten vermehrt zu schweren Wurzelresorptionen [Sameshima & Sinclair, 2001; Roscoe et al., 2015]. Dahingegen wirkte sich eine Behandlungspause während der orthodontischen Zahnbewegung vorteilhaft aus und förderte die Selbstregeneration des Wurzelzements [Roscoe et al., 2015]. Die idealerweise zwei- bis dreimonatige Behandlungspause sollte sechs Monaten nach Behandlungsbeginn erfolgen [Levander et al., 1994; Weltman et al., 2010]. Zudem ist eine Röntgenkontrolle auf vorliegende Wurzelresorptionen nach sechs Monaten empfehlenswert [Bayir & Gumus, 2021]. Neben der Reduktion des Behandlungszeitraums [Carlier et al., 2019], erwies sich die Anwendung eines niedrig gepulsten Ultraschalls als vorteilhaft [Raza et al., 2016; Kaur & El-Bialy, 2020]. Durch spezielle Ultraschallapplikationsverfahren konnte die Mechanotransduktion der Zellen verbessert und u. a. die Knochenbildung durch Osteoblastendifferenzierung gefördert werden, sodass orthodontische Zahnbewegungen schneller ablaufen und die Therapiedauer verkürzt werden konnte [Kaur & El-Bialy, 2020]. Zudem traten weniger Resorptionslakunen auf den Zahnwurzeloberflächen auf und deren Ausprägung erschien deutlich geringer [Raza et al., 2016].

2.4 Einteilung von Wurzelresorptionen

Die Resorptionen der Zahnwurzeln von Milchzähnen entsprechen einem notwendigen physiologischen Prozess. Demgegenüber ist das Resorbieren bleibender Zahnwurzeln pathologischer Genese, dem eine Verletzung oder ein Stimulus vorausgeht [Aidos et al., 2018]. Generell lassen sich externe von internen Resorptionen unterscheiden. Externe Wurzelresorptionen kommen deutlich häufiger vor und resultieren aus einer Schädigung des Parodonts, während interne Resorptionen ihren Ursprung im pulpalen Gewebe nehmen [Lambrechts & Vanhoorebeeck, 1992]. Externe Wurzelresorptionen lassen sich anhand ihrer Pathogenese weiter unterteilen. Nachfolgend wird die Klassifizierung nach Gutmann et al. [1999], modifiziert nach Weber [2017] beschrieben. Resorptionen der äußeren Oberfläche, die kleinflächig lateral auftreten, sind den physiologischen Adaptionsprozessen zuzuschreiben, welche nach einer lokalisierten Schädigung des Desmodonts auftreten [Kanas & Kanas,

2011]. Sie sind selbstlimitierend und durch Auflagerung zellulären Wurzelzements reversibel [Owman-Moll & Kuroi, 1998]. Je nach Lokalität der auftretenden Resorption werden neben den lateralen Wurzelresorptionen, welche zweidimensional röntgenologisch kaum sichtbar sind, apikale Wurzelresorptionen unterschieden. Apikale Wurzelresorptionen werden erst nach größerem Verlust von Zahnhartsubstanz oder nach länger bestehenden lateralen Wurzelresorptionen sichtbar [Göz & Rakosi, 1989]. Im Gegensatz zu lateralen Wurzelresorptionen sind sie irreversibel und eine apikale Regeneration ist nicht zu erwarten. Den externen Wurzelresorptionen sind zudem Ersatzresorptionen zugehörig. Sie sind Folgen einer Luxationsverletzungen mit Knochenbildung im devitalisierten Desmodont und führen zur Ankylose des Zahnes. Externe Wurzelresorptionen können ihren Ausgangspunkt nach jeglichen traumatischen Ereignissen nehmen, kommen jedoch v. a. nach Avulsionsverletzungen vor [Gutmann et al., 1999]. Dagegen abzugrenzen sind entzündliche Wurzelresorptionen bzw. Entzündungsresorptionen, die infolge nekrotischen Pulpagewebes via Dentintubuli an die Wurzeloberfläche treten und dort eine Entzündungsreaktion im parodontalen Ligament hervorrufen [Weber, 2017]. Neben lateralen und apikalen Resorptionen, können zudem invasive zervikale Resorptionen vorkommen, welche weiter nach Schweregraden klassifiziert werden. Ihre Ätiologie ist bisher nicht vollständig geklärt. Prädisponierende Faktoren reichen über iatrogene Ursachen wie orthodontische/chirurgische Behandlungen oder ästhetischen Zahnaufhellungen (Bleaching) bis hin zu traumatischen Ereignissen [Weber, 2017].

In einer Literaturübersicht wurden fünfzehn verschiedene Klassifizierungen von Wurzelresorptionen betrachtet, um anschließend ein neues Diagnostik- und Therapieschema für den klinischen Alltag zu konzipieren [Aidos et al., 2018]. Neben den dental bedingten Wurzelresorptionen wie sie Gutmann et al. [1999] klassifizierten, werden darin zwei weitere Kategorien abgegrenzt. Zum einen werden nicht-dental Ursachen wie systemische Erkrankungen und Neoplasien/Kieferzysten unterschieden und zum anderen Wurzelresorptionen idiopathischer Genese [Aidos et al., 2018]. Systemische Erkrankungen und endokrine Anomalien stehen seit längerer Zeit im Verdacht Wurzelresorptionen auslösen zu können [Smith, 1978; Kjaer et al., 2008]. Studien belegten u. a. bei Patienten, die unter Osteodystrophia deformans (Morbus Paget) und

Ektodermaler Dysplasie leiden ein vermehrtes Vorkommen von Wurzelresorptionen. Tumore, Zysten und impaktierte Zähne können, ebenso wie orthodontische Behandlungen, Druck ausüben infolgedessen externe Wurzelresorptionen auftreten können [Lambrechts & Vanhoorebeeck, 1992]. Lassen sich keine direkte Verbindung zu entstandenen Wurzelresorptionen finden, werden sie den idiopathischen Wurzelresorptionen zugeordnet [Aidos et al., 2018]. Diese können zervikal oder apikal an einzelnen oder multiplen Zähnen auftreten. Insgesamt sind idiopathische Resorptionen selten und werden häufig als radiologischer Zufallsbefund diagnostiziert [Kanungo et al., 2013]. Durch immunhistologische Forschungen der parodontalen Membranschichten der Wurzeloberfläche wurde ein Erklärungsansatz für idiopathische Wurzelresorptionen ermittelt [Kjaer, 2013]. Dementsprechend wurden drei verschiedene Membranen differenziert: der Wurzeloberfläche direkt aufgelagerte periphere Nerven, gefolgt von einer faserreichen ektomesenchymalen Zellschicht, die wiederum von einer Malassez-Epithelschicht bedeckt ist. Diese histologischen Divergenzen bedingen unterschiedliche Ursprünge verschiedener Krankheiten. Sie sind die Grundlage für die Entstehung idiopathischer Wurzelresorptionen [Kjaer, 2013].

Vergleichsweise weniger verbreitet sind interne Wurzelresorptionen. Sie werden aufgrund ihres asymptomatischen Verlaufs ebenfalls überwiegend als radiologischer Zufallsbefund diagnostiziert. Fortgeschrittene interne Resorptionen zeigen klinisch mitunter eine pinke Verfärbung im Bereich der Zahnkrone, sog. „pink spot“, die infolge der zahnhartsubstanzresorbierenden entzündlichen Kapillarproliferation der Pulpa entsteht [Gunraj, 1999]. Interne Resorptionen werden in Subtypen untergliedert und können aus einer bakteriellen Pulpeninfektion oder aufgrund einer mechanischen Traumatisierung entstehen [Lambrechts & Vanhoorebeeck, 1992; Weber, 2017]. Fortgeschrittene interne Resorptionen führen nicht selten zum Zahnverlust, sobald sie die Zahnoberfläche erreichen und mit dem parodontalen Ligament kommunizieren [Gunraj, 1999]. Aufgrund dessen empfiehlt es sich nach diagnostizierter interner Resorption eine Wurzelkanalbehandlung mit Obturation des entstandenen Defekts durchzuführen.

2.5 Diagnostik von Wurzelresorptionen

Wurzelresorptionen lassen sich histologisch mittels Elektronen- und Lichtmikroskopen bereits im frühen Stadium an extrahierten Zähnen darstellen [Brudvik & Rygh, 1993; Hellsing & Hammarström, 1996]. Grundsätzlich ist eine radiologische Detektion von Wurzelresorptionen geringeren Ausmaßes schwierig [Jatania et al., 2012]. Eine röntgenologische Diagnostik ist insofern frühestens mit fortschreitender apikaler Destruktion ca. sechs bis neun Monate nach Therapiebeginn möglich [Levander & Malmgren, 1988]. Dank Einsatz digitaler und dreidimensionaler Röntgentechniken wie der digitalen Volumentomographie kann heutzutage eine exaktere Diagnose, insbesondere der Lokalisation und der Ausdehnung der Resorption, gestellt werden [Marinescu et al., 2019; Xie et al., 2019; Chen & Liu, 2020; Jyotirmay et al., 2021]. Darüber hinaus kann eine Risikoeinschätzung durch Bestimmung resorptionsspezifischer Biomarkern im gingivalen Sulkusfluid erfolgen [Mona et al., 2021]. Nachfolgend werden die radiologischen Untersuchungsmethoden und die Diagnostik mittels Biomarkern für Wurzelresorptionen erläutert.

2.5.1 Radiologische Untersuchungsmethoden von Wurzelresorptionen

Den ersten radiologischen Nachweis von Wurzelresorptionen erbrachte 1927 die Analyse von Zahnfilmen durch Ketcham [1927]. Anfang der 30er Jahre wurde das erste Panorama-Röntgengerät entwickelt, welches durch Paatero [1954] nach den Prinzipien der Tomografie weiterentwickelt wurde und noch heute als Basis für Panoramaschichtaufnahmen dient. Laterale Wurzelresorptionen können jedoch mittels zweidimensionaler Röntgenaufnahmen nicht suffizient dargestellt werden. Zudem ist die Abbildung apikaler Wurzelresorptionen nicht durch jede Röntgenaufnahmetechnik gleich gut darstellbar [Leach et al., 2001; Sameshima & Asgarifar, 2001; Ahuja et al., 2017]. Generell werden Zahnwurzelresorptionen auf Panoramaschichtaufnahmen um bis zu 20 % falsch positiv eingeschätzt [Sameshima & Asgarifar, 2001]. Zahnfilme sind sensitiver für apikale Wurzelresorptionen als Panoramaschichtaufnahmen [Leach et al., 2001]. Zu bevorzugen ist die Ausrichtung der Zahnfilme gemäß der Paralleltechnik. Daher sollten bei Risikopatienten, bei Verdacht auf Wurzelresorptionen oder zur detaillierten Abschätzung der Apexkonfiguration Zahnfilme präferiert werden

[Leach et al., 2001]. Fernröntgenseitenbilder, wie sie zur kephalometrischen Messung in der Kieferorthopädie angefertigt werden, eignen sich allenfalls zur Vermessung der Inzisivenwurzeln, lassen jedoch keine adäquaten Rückschlüsse auf etwaige Resorptionen zu [Leach et al., 2001]. Unter Verwendung digitaler Volumentomographie (DVT) können u. a. kleinflächige Resorptionslakunen bestimmt und ektopisch verlagerte Zähne in ihrer Lageposition exakt ausfindig gemacht werden [Chen & Liu, 2020; Kolcuoglu & Zeynep Oz, 2020; Hershaw et al., 2021]. Außerdem ermöglicht die nachträgliche digitale Bildbearbeitung durch Anwendung verschiedener Einstellungs- und Filtermöglichkeiten eine detaillierte Resorptionsdarstellung ohne zusätzliche Mehrstrahlenbelastung [Xie et al., 2019]. Trotz der Überlegenheit dreidimensionaler Röntgentechniken wie der DVT [Rahmel & Schulze, 2019; Hershaw et al., 2021] dienen Panoramaschichtaufnahmen weiterhin der Basisdiagnostik und Therapieplanung in der Kieferorthopädie.

2.5.2 Biomarker für pathologische Wurzelresorptionen

Im gingivalen Sulkusfluid lassen sich unter Verwendung spezieller Filterpapierstreifen unterschiedliche Mediatoren nachweisen, die in der Forschung in positiven Kontext mit Wurzelresorptionen gebracht worden sind und einen möglichen diagnostischen Neuansatz zur Risikoeinschätzung von Wurzelresorptionen bieten [Mona et al., 2021].

Der RANKL/OPG-Biomarker macht sich die Konzentrationsänderungen in Phasen der orthodontischen Zahnbewegung zunutze [Fukushima et al., 2003; Low et al., 2005; Yamaguchi, 2009]. Die Zellen des parodontalen Ligaments produzieren während orthodontischen Zahnbewegungen vermehrt RANKL, wohingegen die OPG-Produktion sinkt und infolgedessen Resorptionen der Wurzeloberfläche auftreten können. Diese Konzentrationsänderungen von RANKL, RANK und OPG sind im gingivalen Sulkusfluid messbar. Weiterhin ist der Nachweis der auf das RANKL/RANK/OPG-System wirkenden Biomarker IL-1 β und TNF- α im gingivalen Sulkusfluid möglich [Bletsa et al., 2006; Yao et al., 2008; Kulkarni et al., 2012; Kapoor et al., 2014]. Der IL-6-Biomarker kann zudem in PDL-Zellen ausfindig gemacht werden [Palmqvist et al., 2002; Yamaguchi et al., 2006].

In der Karzinomdiagnostik und der Diagnostik von Autoimmun- und inflammatorischen Erkrankungen sind zunehmend sekretorische mikroRNAs von Bedeutung [Atsawasuan et al., 2018]. Eine erhöhte Expressionsrate von mikroRNA-29 konnte sechs Wochen nach kieferorthopädischen Behandlungsbeginn im Sulkusfluid nachgewiesen werden. Diese mikroRNA-Familie ist wesentlich für die Regulierung von Osteoklasten zuständig und repräsentiert einen potentiellen Biomarker parodontalen Umbaus.

Darüber hinaus konnten mineralisationsspezifische Biomarker diagnostiziert werden. Dentin-Sialophosphoprotein (DSPP) ist ein Vorläuferprotein von Dentin-Sialoprotein (DSP), Dentin-Phosphoprotein (DPP) und Dentin-Glycoprotein (DGP). DSPP wird u. a. von Osteoblasten produziert und dient der dentalen Mineralisation [Yamamoto et al., 2015]. DSP konnte an luxierten Zähnen in wechselnden Konzentrationen detektiert werden, die von den aktiven Phasen und den Remissionsphasen pathologischer Vorgänge bestimmt werden [Kumar et al., 2013]. Traumatisch bedingte Resorptionsprozesse lassen sich ebenso auf die Resorptionsprozesse anderer Genese übertragen, sodass sich die DSP-Konzentrationsbestimmung zur Überwachung von Wurzelresorptionen anbietet [Kereshanan et al., 2008; Kumar et al., 2013; Ritchie, 2018]. Darüber hinaus ist die Quantifizierung von DSP in ng/µl unter Einsatz spezieller ELISA-Verfahren realisierbar und ermöglicht dadurch eine exakte Diagnostik [Lombardo et al., 2016]. Die sulkuläre Konzentration von DPP eignet sich zudem für die Detektion pathologischer Resorptionen [Mah & Prasad, 2004; Silva et al., 2005; Yuan et al., 2009]. Die höchsten Konzentrationen von DPP konnten an herausfallenden Milchzähnen gemessen werden, gefolgt von apikal resorbierten Zähnen unter orthodontischer Zahnbewegung [Mah & Prasad, 2004]. Unbehandelte Patienten ohne Resorptionen verfügten über die geringsten DPP-Konzentrationen.

2.6 Prävalenz von Wurzelresorptionen

Externe apikale Wurzelresorptionen gehören zu einen der am häufigsten auftretenden iatrogenen Nebenwirkungen orthodontischer Zahnbewegungen [Sameshima & Iglesias-Linares, 2021]. Unter kieferorthopädisch behandelten Patienten treten sie mit einer Prävalenz von 20 bis 100 % auf [Baumrind et al., 1996]. Dabei kommen Fälle von schweren Wurzelresorptionsgraden mit 14,5 %

vergleichsweise seltener vor [Bayir & Gumus, 2021]. Vor allem feststehend kieferorthopädisch therapierte Patienten sind häufiger von externen apikalen Wurzelresorptionen betroffen als Patienten, die mit herausnehmbaren Schienen therapiert wurden [Li et al., 2020]. Darüber hinaus traten unter Alignertherapien vergleichsweise weniger schwere Resorptionsgrade auf [Li et al., 2020].

2.7 Risiken und klinische Folgen von Wurzelresorptionen

Wenngleich Wurzelresorptionen geringeren Ausmaßes keinen Einfluss auf die Langlebigkeit der betroffenen Zähne haben [Toyokawa-Sperandio et al., 2021], sollten das Wurzelresorptionsrisiko weitestgehend minimiert werden, um unnötigen Zahnhartsubstanzverlust zu vermeiden. Grundsätzlich sollte eine kieferorthopädische Behandlung daher umsichtig durchgeführt werden [Oppenheim, 1936]. Insbesondere bei einer Anomalie mit einhergehenden kurzen Zahnwurzeln (engl. „short root anomaly“, SRA) sollte mit Vorsicht kieferorthopädisch therapiert werden, um das generell schon erhöhte Wurzelresorptionsrisiko so gering wie möglich zu halten [Valladares Neto et al., 2013]. Zähne mit extremen externen apikalen Wurzelresorptionen sollten erhalten werden und bedürfen keine gesonderten ästhetischen oder konservativen Behandlungen [Consolaro, 2019]. Ein prothetischer Ersatz durch Implantate ist, sofern die Zähne nicht mobil sind, Schmerzen verursachen oder sich verfärben, klinisch nicht notwendig. Ebenso wenig ist eine endodontische Behandlung bei stark resorbierten Zahnwurzeln grundsätzlich indiziert [Consolaro, 2020]. Diese Zähne können die gleiche Überlebensdauer wie nicht resorbierte Zähne haben. Apikale Wurzelresorptionen führen in der Regel nicht zu einer erhöhten Mobilität oder Schmerzen, da vor allem das zervikale Wurzeldrittel mit 60 % für den parodontalen Halt verantwortlich ist [Consolaro, 2020]. Treten dennoch Lockerungen der betroffenen Zähne auf, so ist dies häufig auf weitere Ursachen wie okklusale Traumata oder Knochenverlust durch Parodontitis zurückzuführen. Stark resorbierte Zähne haben ferner einen schwächeren parodontalen Halt und sind gefährdeter für traumatische Avulsionen [Consolaro, 2020]. Ankylosen der betroffenen Zähne kommen in der Regel nicht vor [Brezniak & Wasserstein, 2002]. Weiterhin sind zervikale Wurzelresorptionen durch orthodontische Zahnbewegungen nicht auszuschließen [Khalaf et al., 2022]. Diese gehen neben

dem Zahnhartsubstanzverlust mit einer pinken Verfärbung der Zahnkrone einher, welche unabhängig von der ästhetischen Komprimierung eine endodontische Therapie erfordert [Weber, 2017].

2.8 Regeneration von Wurzelresorptionen

Eine Regeneration von Wurzelresorptionen ist nicht generell möglich. So sind apikale Wurzelresorptionen irreversibel und es finden ausschließlich Umbauprozesse rauer und scharfer Kanten statt [Remington et al., 1989]. Eine reparative Heilung von lateralen Wurzelresorptionen hingegen ist durch Wurzelzementapposition begrenzt möglich und individuell stark ausgeprägt [Owman-Moll & Kurol, 1998; Brezniak & Wasserstein, 2002; Hasegawa et al., 2003]. Die Resorptionslakunen werden überwiegend zentral regeneriert, wohingegen Wurzelzement an den lateralen Flächen lediglich in geringerem Ausmaß vorzufinden ist [Owman-Moll & Kurol, 1998]. Bei der Regeneration lateraler Resorptionen ist in erster Linie zellulärer Wurzelzement beteiligt, wohingegen azellulärer Zement v. a. in den frühen Phasen auf dem Boden der Resorptionslakune vorkommt und schließlich von zellulärem Zement bedeckt wird. Wurzelzementappositionen sind häufiger nach sechs bis sieben Wochen der Retentionsphase zu beobachten. Im geringeren Umfang zeigten sich erste Regenerationen nach zwei bis drei Wochen [Owman-Moll & Kurol, 1998]. Die reparative Zementapposition kann durch regelmäßige Anwendung niedrig gepulsten Ultraschalls unterstützt werden [El-Bialy et al., 2004; Raza et al., 2016]. Analog kann das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie dadurch minimiert werden [El-Bialy et al., 2004; Raza et al., 2016]. Darüber hinaus konnte in einem Tiermodell die heilungsfördernde Wirkung des porcinen Schmelzmatrixproteins (SMP oder engl. „enamel matrix derivative“, EMD) auf iatrogen induzierte Wurzelresorptionen nachgewiesen werden [Hu et al., 2018]. SMP verringert das Volumen der Resorptionskrater und steigert darüber hinaus das Knochenvolumen und die trabekuläre Dicke.

3 Zielsetzung der Arbeit

Die Beurteilung von Panoramaschichtaufnahmen auf das Vorliegen von Kjaer-Merkmalen ist seit geraumer Zeit in der Kieferorthopädie etabliert und dient der Risikoeinschätzung von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie. Hierbei wird zunächst das prätherapeutische Röntgenbild befundet, welches bei Neuaufnahmen von Patienten erstellt wird. Durch Nutzung desselben zur Beurteilung von Kjaer-Merkmalen, werden weitere zusätzliche invasive und/oder aufwändige Maßnahmen umgangen. Allerdings sollte nach Detektion der von Kjaer [1995] aufgestellten Merkmale praktisch ein jeder über ein Wurzelresorptionsrisiko während der kieferorthopädischen Therapie aufgeklärt werden.

Ziel dieser retrospektiven Datenerhebung war es, das Auftreten von externen, apikalen Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie mit dem Vorhandensein der Kjaer-Merkmale zu überprüfen. Gleichzeitig sollten die relevanten Kjaer-Merkmale spezifiziert und für die Risikoeinschätzung von Wurzelresorptionen überflüssige Charakteristika detektiert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden weiterhin Anzahl und Stärkegrad von Wurzelresorptionen in der Kohorte erfasst. Dabei sollte die Korrelation von unterschiedlichen Variablen evaluiert werden.

Folgenden Hypothesen standen dabei im Fokus:

Hypothese 1: Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie korreliert mit dem Vorhandensein von Kjaer-Merkmalen.

Hypothese 2: Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie ist abhängig von der verwendeten kieferorthopädischen Apparatur.

Hypothese 3: Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie ist abhängig von der Behandlungsdauer.

Hypothese 4: Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie ist abhängig vom Geschlecht des Patienten.

Weiterhin sollte der Zusammenhang von folgenden Variablen, die in der Vergangenheit mit der Entstehung von Wurzelresorptionen in Verbindung gebracht worden sind, überprüft werden:

- Patientenalter zum kieferorthopädischen Behandlungsbeginn
- verwendete kieferorthopädische Apparatur
- mehrfache kieferorthopädische Therapien
- kombiniert kieferchirurgisch-kieferorthopädische Therapien
- Extraktionstherapien bleibender Zähne
- traumatisch geschädigte Zähne
- Gesundheitsstatus des Patienten
- Dysfunktionen und Dyskinesien.

4 Material und Methode

Für die vorliegende Arbeit wurde eine retrospektive Datenanalyse von klinischen Routinedaten anhand von Patientenakten durchgeführt. Die Datenerfassung erfolgte ohne personenbezogene (Nach-) Untersuchung, Befragung oder sonstige Handlung am Patienten und wurde von der Ethikkommission des Fachbereichs Humanmedizin der Philipps-Universität Marburg unter dem Aktenzeichen „EK_MR_05_06_20_korbmacher-steiner“ genehmigt.

Der Studienablauf kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Sichtung der Patientenakten
- Sichtung der Röntgenbilder
- Datenerfassung
- Untersucherübereinstimmung
- Statistische Auswertung.

4.1 Sichtung der Patientenakten

Die erfassten Daten stammten von insgesamt 1156 Patienten, die im Zeitraum vom 01. Januar 2000 bis einschließlich zum 31. Dezember 2019 in der kieferorthopädischen Abteilung im Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Philipps-Universität Marburg behandelt wurden. Die Patienten waren zum kieferorthopädischen Behandlungsbeginn in Marburg zwischen zehn und achtzehn Jahre alt.

Die erfassten Parameter und Behandlungsabläufe wurden ausschließlich den kieferorthopädischen Anamnesebögen und Akteneinträgen entnommen und anonymisiert erfasst. Die entsprechenden analogen Patientenakten wurden aus dem Archiv der kieferorthopädischen Abteilung und die digitalen Patientenakten aus der Datenbank ivoris®ortho der Abteilung für Kieferorthopädie entnommen.

4.2 Sichtung der Röntgenbilder

Bei den befundeten Röntgenaufnahmen handelt es sich ausschließlich um Panoramaschichtaufnahmen (PSA). Als Grundvoraussetzung mussten mindestens zwei Panoramaschichtaufnahmen in analoger und/oder digitaler Form vorliegen um diese miteinander vergleichen zu können.

Die Gesamtheit der Patienten wurde anhand der Panoramaschichtaufnahmen anschließend in zwei Gruppen eingeteilt:

Gruppe 1: PSA ohne Kjaer-Merkmale,

Gruppe 2: PSA mit Kjaer-Merkmale/n.

Die analogen Röntgenbilder wurden auf einem Röntgenbildbetrachter (Leuchtkasten) analysiert. Demgegenüber erfolgte die Betrachtung der in ivoris®ortho gespeicherten, digitalen Röntgensätze über die Software Romexis® der Firma Planmeca, Version 5.0. Die Befundung erfolgte an einem Befundungsmonitor, welcher regelmäßigen Kontrollen unterliegt.

Einzelne Zahnfilme, Aufbissaufnahmen oder andere diagnostische Röntgenbilder wurden nicht betrachtet, ebenso wenig Röntgenbilder in Papierform.

4.3 Datenerfassung

Insgesamt wurden pro Patient 38 Variablen aufgenommen. Diese wurden anonymisiert erfasst und in einer eigens konzipierten Microsoft® Excel-Tabelle, Version 16.32 zur weiteren Analyse eingetragen.

4.3.1 Allgemeine Patientendaten

Folgende allgemeine patientenbezogene Daten wurden anhand der Sichtung der Patientenakten erfasst:

- Patientenummer
- Geschlecht
- Geburtsdatum (Tag/Monat/Jahr)
- Behandlungsbeginn, -ende und -zeitraum (Tag/Monat/Jahr)
- Art der kieferorthopädischen Apparatur (herausnehmbar/fest/kombiniert)
- Allgemeine Anamnese

- Spezielle zahnärztliche Anamnese
- Besonderheiten im Therapieverlauf.

Die Behandlungsdauer wurde über den Behandlungsbeginn und das Behandlungsende errechnet. Sie wurde definiert als die Zeit von der ersten Geräteinsertion am Patienten bis zum Abschluss der aktiven Behandlung nach Entfernung der jeweiligen herausnehmbaren oder festsitzenden kieferorthopädischen Apparatur. Retentionsgeräte waren davon ausgenommen.

Allgemeinanamnestische Auffälligkeiten wurden gesondert vermerkt. Darunter wurden Patienten mit Allergien, pulmonalen oder vegetativen Erkrankungen und/oder Syndromen als Einzelgruppen erfasst, ohne weiter auf spezifische Erkrankungen innerhalb dieser Gruppen einzugehen.

Die spezielle zahnärztliche Anamnese umfasste vorangegangene Zahntraumata und oralen Fehlfunktionen. Dysfunktionale Bewegungsabläufe wurden als nicht-physiologische Funktionen der oralen und perioralen Muskulatur determiniert. Patienten die unter einem Sigmatismus, einem viszeralem Schluckmuster, einem Lutschhabit (Schnuller- und/oder Daumenlutschen nach dem 3. Lebensjahr), Mundatmung und/oder einem Bruxismus litten, wurden unter der Gruppe der Dysfunktionen und Dyskinesien zusammengefasst.

Ferner wurden folgende Besonderheiten im Verlauf der kieferorthopädischen Therapie erfasst:

- kieferorthopädische Extraktionstherapien bleibender Zähne
- kieferchirurgisch-kieferorthopädische Umstellungsosteotomien
- kieferorthopädische Therapien und/oder Vorbehandlungen alio loco.

4.3.2 Analyse der Merkmale nach Kjaer

Alle vorhandenen analogen und digitalen Panoramaschichtaufnahmen, welche vor, während oder zum Abschluss der kieferorthopädischen Therapie eines Patienten angefertigt wurden, wurden zunächst nach vorkommenden Merkmalen nach Kjaer befundet. Sie wurden zahnbezogen und in einer Gesamtanzahl pro untersuchten Patienten in einer Excel-Tabelle aufgenommen. In den folgenden Abbildungen sind die typischen Merkmale nach Kjaer dargestellt.

4.3.2.1 Merkmale der ersten Dentition

Gemäß Inger Kjaer [1995] wurden folgende Merkmale im Milchzahngewiss erfasst:

- Atypische Wurzelresorptionen (Abb. 1):
Eine atypische Wurzelresorptionen der Milchmolaren liegt dann vor, sobald die mesiale und die distale Wurzel ungleichmäßig schnell durch den bleibenden Zahnkeim resorbiert werden.



Abbildung 1: Atypische Milchzahnresorption der distalen Wurzel des Zahnes 85 durch den Zahn 45.

- Infraokklusion (Abb. 2):
In Infraokklusion stehende Milchzähne bezeichnet Milchzähne, deren Okklusionsfläche apikal der angrenzenden Zähne liegt und so eine vertikale Stufe zwischen dem Milchzahn zu den Nachbarzähnen entsteht.



Abbildung 2: Infraokklusion des Zahnes 75 mit vertikaler Stufenbildung zu den Zähnen 34 und 36.

4.3.2.2 Merkmale der zweiten Dentition

Folgende Variablen wurden für die bleibende Dentition erhoben:

- schmale Zahnkronen (Abb. 3 & 4):



Abbildung 3: Schmale Zahnkronen der Zähne 12 und 22.



Abbildung 4: Zum Vergleich physiologische Zahnkronenbreiten der Zähne 12 und 22 und physiologische Zahnwurzellängen der Zähne 32 bis 42.

- kurze Zahnwurzeln (Abb. 4 & 5):



Abbildung 5: Kurze Zahnwurzeln der Zähne 31 und 41.

- kurze distale Zahnwurzeln des ersten unteren Molaren (Abb. 6):

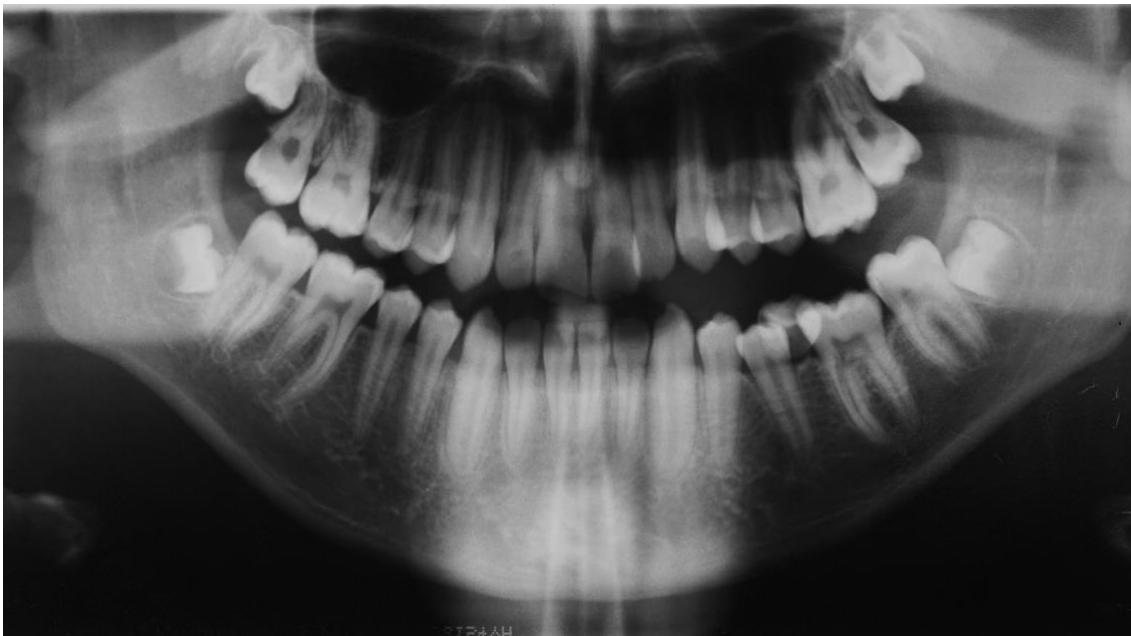


Abbildung 6: Kurze distale Zahnwurzel des Zahnes 46 und zum Vergleich harmonisch lange Zahnwurzeln des Zahnes 36.

- schmale Zahnwurzeln (Abb. 7 & 8):



*Abbildung 7: Schmale Zahnwurzeln der Zähne 36,37,46 und 47.
Nebenbefund: Wurzelkrümmung des Zahnes 34.*



Abbildung 8: Zum Vergleich physiologische Zahnwurzelbreiten/-dicken der Zähne 37 und 47.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want 44 to appear here.

- Wurzelkrümmungen (Abb. 7, 9 & 10):
Wurzelkrümmungen sind stark abgeknickte Zahnwurzeln. Abzugrenzen davon sind leicht gebogene Zahnwurzeln, welche nicht unter dem Merkmal „Wurzelkrümmungen“ aufgenommen wurden.



Abbildung 9: Wurzelkrümmungen der Zähne 13 und 23.



Abbildung 10: Wurzelkrümmungen der Zähne 23,35 und 45.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

- Taurodontismus (Abb. 11 & 12):

Der Taurodontismus bezeichnet Molaren die eine abnorme Form mit vergrößerter Kronenpulpa, Verlagerung der Furkation nach apikal und tendenziell eher weniger ausgeprägten Zahnhals besitzen. Das Pulpenkavum erscheint langgezogen.



Abbildung 11: Taurodontismus der Zähne 16 und 26. Zum Vergleich: physiologisches Pulpenkavum der Zähne 36 und 46. Nebenbefund: Infraokklusion des Zahnes 75 und Nichtanlagen der Zähne 55, 75 und 85.



Abbildung 12: Taurodontismus der Zähne 17, 16, 26, 27, 36, 37, 46 und 47.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want 46 to appear here.

- pathologische Wurzelresorptionen (Abb. 13 & 14):
Pathologische Wurzelresorptionen sind Resorptionen an bleibenden Zähnen durch z. B. verlagerte Zähne oder hyperdonte Zähne.



Abbildung 13: Pathologische Wurzelresorption des Zahnes 21 bedingt durch einen Mesiodens in regio 21/22 - Zustand vor Entfernung des Mesiodens. Aufnahmedatum: 31.08.2004.



Abbildung 14: Deutliche apikale Wurzelresorption des Zahnes 21 (WR-Grad 2) durch einen Mesiodens in regio 21/22 - Zustand nach Entfernung des Mesiodens. Aufnahmedatum: 02.03.2009.

- ektopisch verlagerte Zähne (Abb. 15):
Eine Ektopie bezeichnet einen stark verlagerten Zahnkeim. Leichte Rotations- oder Drehstellungen und minimal von der physiologischen Durchbruchsachse abweichend liegende Zähne wurden nicht als ektopisch eingestuft.



Abbildung 15: Ektopisch verlagertes Zahn 13. Zustand nach chirurgischer Freilegung und Bekleben eines Brackets. Zum Vergleich: leicht von der regulären Durchbruchsachse abweichender Zahnkeim 45.

- Mikrodontie (Abb. 16):
Mikrodonte Zähne sind Zahnfehlbildungen bei denen die betroffenen Zähne im Verhältnis zum Kiefer zu klein sind.

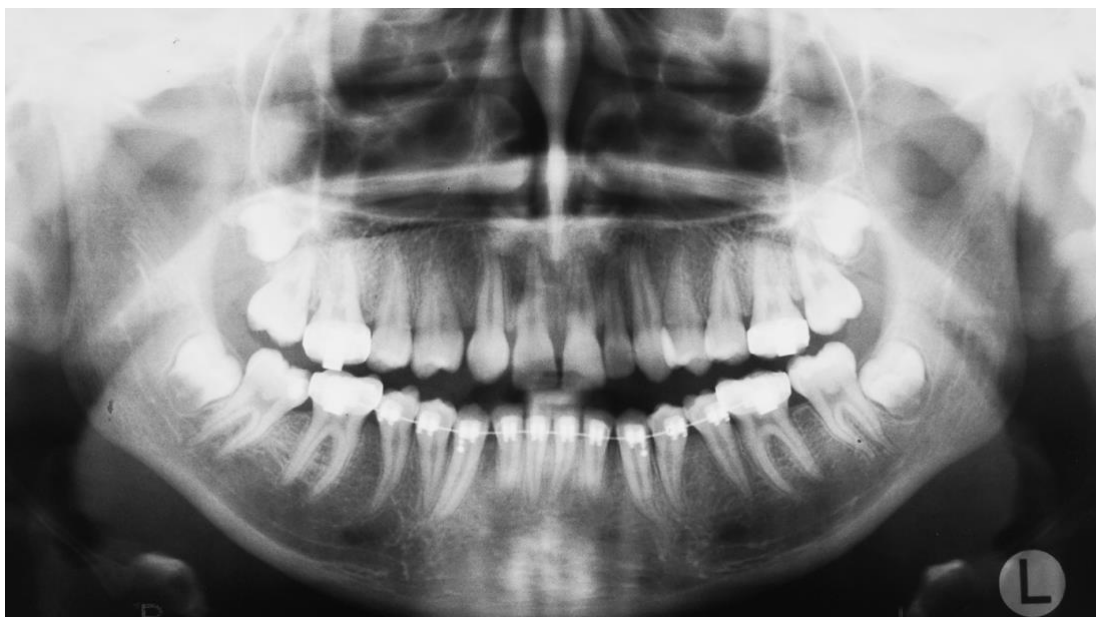


Abbildung 16: Mikrodontie Zahn 22. Nebenbefund: Nichtanlage Zahn 12.

- isolierte und generalisierte Spätanlagen von Zähnen (Abb. 17 & 18):
Isolierte Spätanlagen einzelner Zähne, bei sonst regulärer Dentitionsphase, wurden separat zahnbezogen vermerkt (Abb. 17). Dahingegen wurden generalisierte Spätanlage der Zähne (Dentitio tarda) dokumentiert sobald die physiologischen Zahndurchbruchzeiten um mind. zwei Jahre von dem chronologischen Alter des Patienten abwichen (Abb. 18).

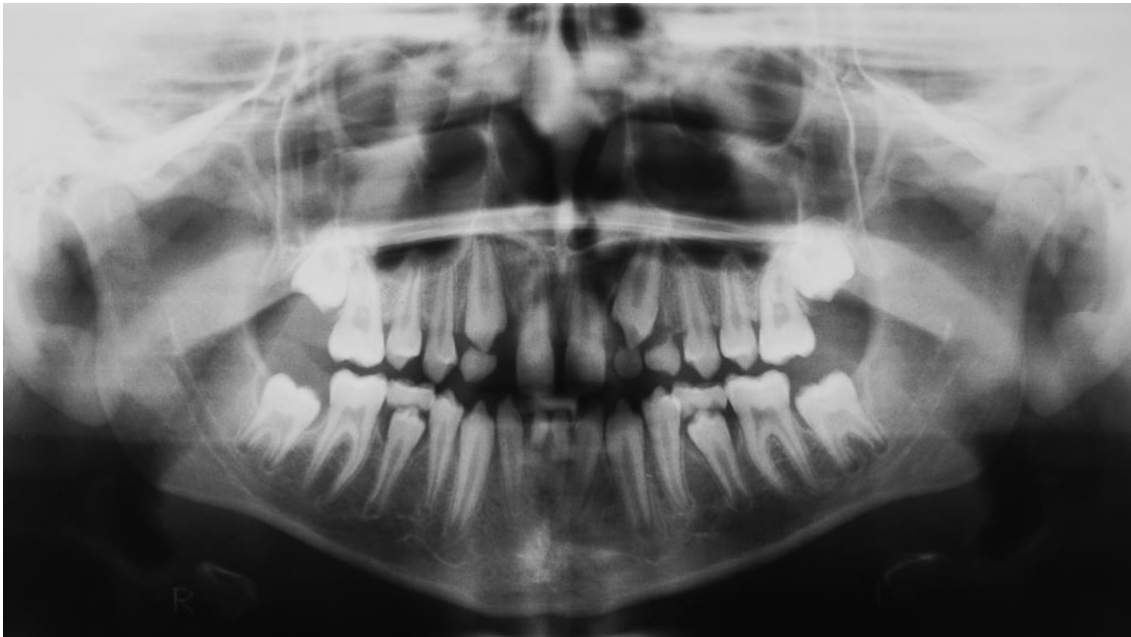


Abbildung 17: Isolierte Spätanlagen der Zähne 34, 35 und 45 bei einer 13-jährigen Patientin. Nebenbefund: Ektopische Verlagerung des Zahnes 13 und schmale Zahnkrone 22.



Abbildung 18: Generalisierte Spätanlagen bleibender Zähne bei einer 11-jährigen Patientin. Milchzähne 53 bis 55, 63 bis 65, 74 und 75, 84 und 85 in situ, alle bleibenden Zähne angelegt.

- Aplasien (Abb. 19 & 20):
Aplasien sind Nichtanlagen von Zähnen.



*Abbildung 19: Aplasie der Zähne 12,22 und 31,41 mit den Milchzähnen 71,81 in situ.
Nebenbefund: Taurodontismus der Zähne 16 und 26.*



*Abbildung 20: Aplasie der Zähne 35 und 45 mit Milchzahnpersistenz der Zähne 75 und 85.
Nebenbefund: Wurzelkrümmungen der Zähne 12 und 22.*

4.3.2.3 Weitere Merkmale

In der vorliegenden Studie wurden neben den Zahnmerkmalen zudem die von Kjaer beschriebenen Knochenunregelmäßigkeiten analysiert:

- Odontom (Abb. 21):

Dieser benigne odontogener epithelialer Tumor stellt sich in zweidimensionalen Röntgenaufnahmen als röntgendichte, scharf begrenzte Aufhellung im Bereich des Kiefers dar.

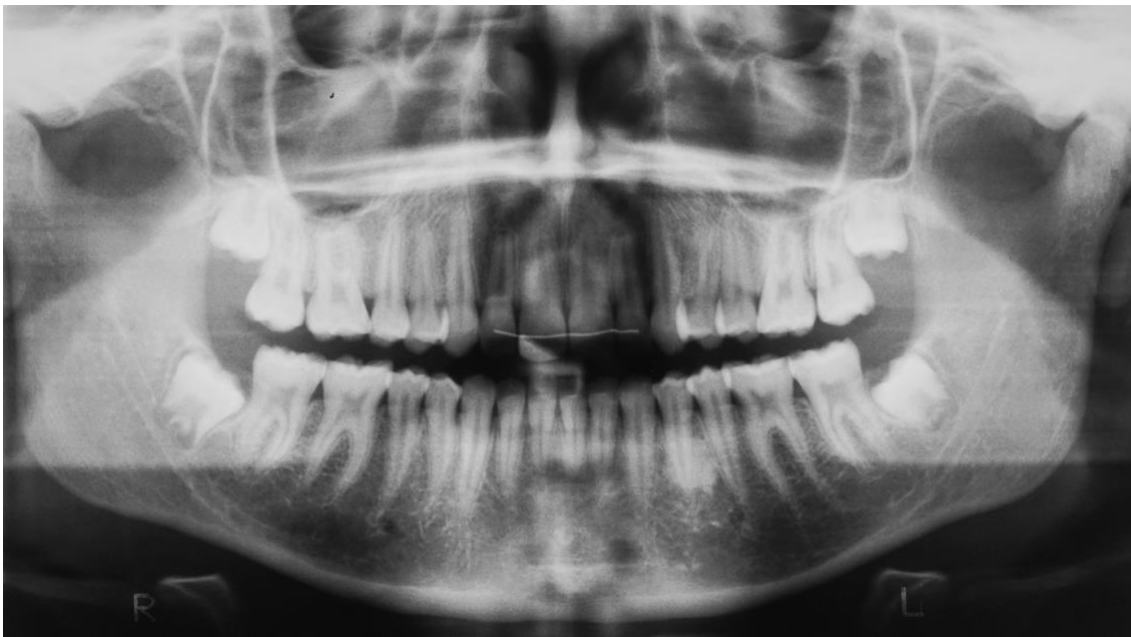


Abbildung 21: Odontom in regio 34/35. Nebenbefund: kurze Zahnwurzeln der Zähne 32 bis 41.

- Lipping (Abb. 22):

Auffällig abgeschrägte, flach verlaufende Kondylenformen wurden als Lipping definiert und vermerkt. Dabei wurde die rechte Seite getrennt von der linken Seite betrachtet und ebenso die anterioren von den posterioren Kondylenflächen unterschieden. Ein Lipping lag dann vor und wurden als Kjaer-Merkmal erfasst, sobald eine Fläche einer Kondylenseite betroffen war.

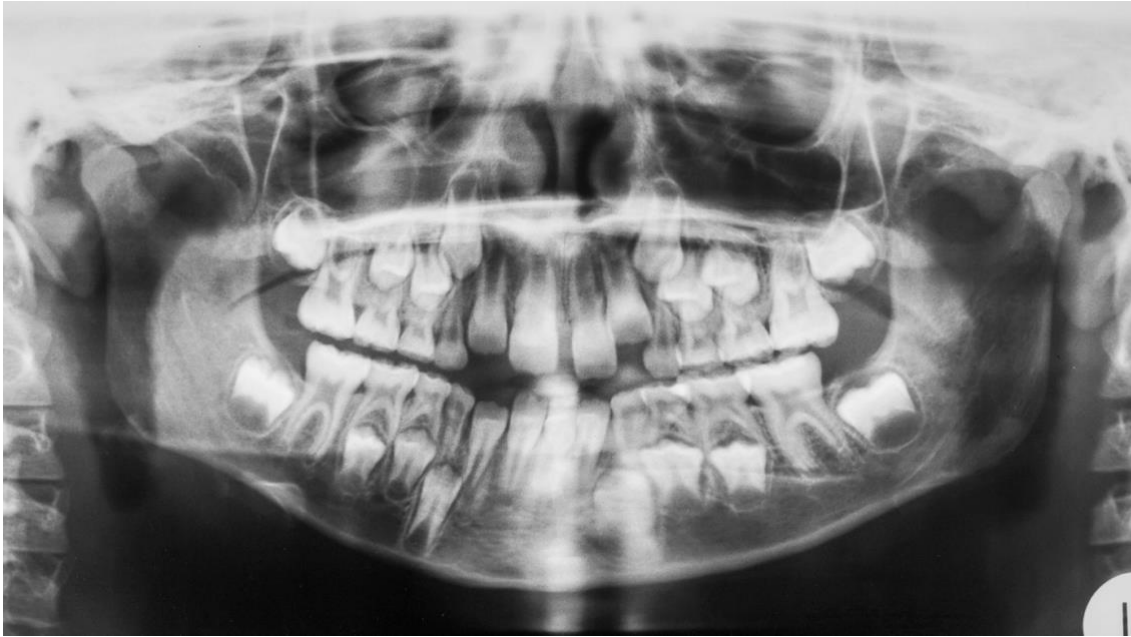


Abbildung 22: Lipping des linken Kondylus der anterioren und posterioren Gelenkfläche. Zum Vergleich der physiologische rechte Kondylus ohne ein anteriores/posteriore Lipping.

4.3.3 Analyse der Wurzelresorptionen

Neben der Erfassung der relevanten Kjaer-Merkmale, erfolgte die Beurteilung der Wurzelspitzen aller Zähne. Die apikalen Wurzelresorptionen wurden zahnbezogen für jedes Röntgenbild eines Patienten ermittelt. Lagen mehrere zwischendiagnostische Röntgenbilder vor und kamen neue Resorptionen hinzu, so wurden diese ergänzt. Jedem Wurzelresorptionsgrad wurde zudem eine Gesamtanzahl der betroffenen Zähne pro Patienten zugeordnet. Die Wurzelresorptionen wurden dafür in drei verschiedenen Schweregrade unterteilt und Zähne ab einem Wurzelresorptionsgrad eins (WR-Grad 1) erfasst (Abb. 23). Der WR-Grad 1 bezeichnet eine anfänglich erkennbare externe Wurzelresorption, auch „Blunting“ genannt. Eine Wurzelresorption nach Grad zwei und drei gehen über das Blunting hinaus. Sie werden über das Resorptionsausmaß von unter bzw. über ein Drittel der Wurzelgesamtlänge voneinander abgegrenzt. Somit entspricht WR-Grad 2 eine bis zu ein Drittel der Wurzellänge resorbierte Zahnwurzel, alles darüber hinaus entspricht WR-Grad 3.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want 52 to appear here.


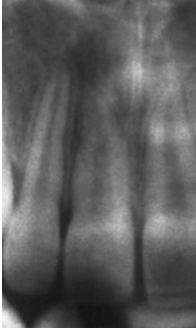

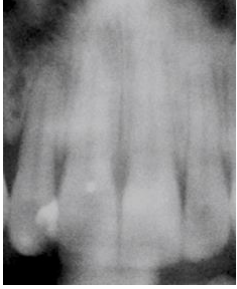




WR-Grad 0		
WR-Grad 1		
WR-Grad 2		
WR-Grad 3		

Abbildung 23: Wurzelresorptionsgrade von null bis drei schematisch und mit klinischem Beispielröntgenbild dargestellt. Die gestrichelten Bereiche der Zahnwurzelschemata entsprechen dabei der ursprünglichen Wurzellänge des Zahnes. (Quelle: P.M. Bruns)



Abbildung 24: Röntgenbild eines 13-jährigen Patienten mit unterschiedlich stark ausgeprägten Wurzelresorptionen, u. a. WR-Grad 1 an den Zähnen 12 bis 22 und WR-Grad 2 an den Zähnen 15 und 45. Nebenbefund: Wurzeln der zweiten Molaren und Eckzähne im Wachstum.

4.4 Untersucherübereinstimmung

Zu Beginn der Studie wurde die Untersucherin durch eine erfahrene Behandlerin mit über 20 Jahren Berufserfahrung kalibriert. Dazu wurden 50 Röntgenbilder stichprobenweise gemeinsam untersucht und es wurde überprüft, ob die Diagnosen der Untersucherinnen gleichwertig sind. Zur weiteren Überprüfung der Datenqualität wurden 50 Panoramaschichtaufnahmen randomisiert ausgewählt und auf die Reproduzierbarkeit der Befundung der Kjaer-Merkmale und der Ausprägungsgrade der Wurzelresorptionen geprüft. Die Untersucherin führte die Auswertungen zudem ca. zwei Monate nach der ersten Befundung erneut durch. Dergleichen wurde die unabhängige Fallauswertung durch die erfahrene Behandlerin mit der Erst- und Zweituntersuchung der Untersucherin verglichen.

4.5 Statistische Auswertung

Zur Überprüfung der Untersucherübereinstimmung wurde der Intraclass Correlation Coefficient (ICC) bestimmt (Programm: MedCalc, Version 19.6). Die weitere statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS v27 IBM SPSS Statistics for Windows. Armonk, NY: IBM Corp. (2020).

Die Daten wurde patientenbezogen in einer bivariaten und multivariaten Analyse evaluiert. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 0,05$ definiert.

4.5.1 Deskriptive Analyse

Der gesamte Datensatz wurde zunächst in einer individuellen Excel-Matrix übertragen und für die statistische Auswertung vorbereitet. Anschließend wurden die Daten in einer deskriptiven Statistik analysiert und die Ergebnisse in geeigneten Kreuztabellen und Abbildungen festgehalten.

4.5.2 Bivariate Analyse

Für die Überprüfung von Zusammenhängen zwischen der Zielgröße „Wurzelresorptionen“ und Einflussfaktoren wie z. B. „Behandlungsdauer“ oder „schmale Zahnkronen“ wurden bivariate Analysetechniken, unter Beachtung evidenzgestützter und theoriegeleiteter Grundannahme über die Einflüsse auf Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie, eingesetzt. Zusammenhänge waren zu analysieren bezüglich des abhängigen Faktors „Wurzelresorptionen“ und den folgenden unabhängigen Faktoren (entnommen aus der kieferorthopädischen Patientenakte):

- Patientengeschlecht
- Behandlungszeitpunkt und -dauer
- Gebissphase zu Behandlungsbeginn und -abschluss
- verwendete kieferorthopädische Apparatur/en
- Extraktionstherapie(n) bleibender Zähne
- kombinierte kieferchirurgisch-kieferorthopädische Therapie
- mehrfache kieferorthopädische Therapie
- pulmonale/vegetative Erkrankungen
- Allergien
- Syndrome
- Dysfunktionen/Dyskinesien.

Weiterhin wurden folgende Zahn- und Knochenmerkmale eruiert:

- von Trauma betroffene Zähne (dokumentierte Unfälle)
- schmale Zahnkronen
- kurze oder schmale Zahnwurzeln
- kurze distale Wurzeln der erste UK Molaren
- Wurzelkrümmungen
- pathologische Wurzelresorptionen
- Taurodontismus
- Mikroodontie
- Aplasien
- Ektopien
- isolierte/generalisierte Spätanlagen
- atypische Wurzelresorptionen
- Milchzahninfraokklusion
- Lipping der Kiefergelenke
- Odontome.

4.5.3 Multivariate Analyse

Um den Effekt der signifikanten Merkmale aus der bivariaten Analyse auf die Gesamtheit der Wurzelresorptionen im Verlauf der kieferorthopädischen Therapie darzustellen, wurden diese Einflussgrößen im logistischen Modell gegenübergestellt. Die Wahrscheinlichkeit für den Fehler erster Art wurde auf 5 % festgelegt, das Konfidenzintervall lag bei 95 %.

5 Ergebnisse

5.1 Untersucherübereinstimmung

Zur Ermittlung der Untersucherübereinstimmung wurde der Intraklassenkorrelationsquotient (ICC) gebildet. Die ICC-Einteilung entspricht hier der üblichen Einteilung von Korrelationskoeffizienten:

0,90 - 1,00 = sehr hohe Korrelation

0,70 - 0,90 = hohe Korrelation

0,50 - 0,70 = moderate Korrelation

< 0,5 = geringe Korrelation.

Tabelle 1 fasst alle ICC-Werte mit dem jeweiligen 95 % - Konfidenzintervall zusammen. Bei der Befundung der 50 Panoramaschichtaufnahmen bestand insgesamt eine sehr hohe bis hohe Korrelation zwischen der Erst- und Zweitauswertung des Erstuntersuchers (Untersucher A). Weiterhin lag eine hohe Korrelation zwischen dem Untersucher A und dem Zweituntersucher (Untersucher B) dieser Studie vor. Lediglich die Befundung von vorliegenden Wurzelresorptionen (vorhanden/nicht vorhanden) wies zum ersten Untersuchungszeitpunkt von Untersucher A zu Untersucher B eine moderate Korrelation auf (0,57), wohingegen zum zweiten Untersuchungszeitpunkt abermalig eine hohe Übereinstimmung bestand (0,70). Aus diesen Beobachtungen lässt sich schlussfolgern, dass ein Lernprozess von Untersucher A in Hinblick auf die Beurteilung von Wurzelresorptionen zwischen der Erst- und der Zweituntersuchung stattgefunden hat.

Tabelle 1: ICC-Werte (95%-Konfidenzintervall) von Untersucher A zum ersten Untersuchungszeitpunkt (A1) und von Untersucher A zum zweiten Untersuchungszeitpunkt (A2) im Vergleich zu Untersucher B.

	Kjaer-Merkmale vorhanden/ nicht vorhanden		Gesamtsumme der Kjaer-Merkmale		Wurzelresorptionen vorhanden/ nicht vorhanden		Gesamtsumme der Wurzelresorptionen	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
A2	1,00	-	0,93 (0,88; 0,96)	-	0,83 (0,72; 0,90)	-	0,88 (0,80; 0,93)	-
B	1,00	-	0,78 (0,65; 0,87)	0,88 (0,79; 0,93)	0,57 (0,35; 0,73)	0,70 (0,53; 0,82)	0,73 (0,57; 0,84)	0,89 (0,81; 0,94)

5.2 Deskriptive Statistik

5.2.1 Verteilung der untersuchten Patienten

Insgesamt wurden 3551 Röntgenbildern von 1156 Patienten retrospektiv ausgewertet. Unter den Patienten war die Geschlechterverteilung annähernd vergleichbar (Abb. 25). Das mittlere Alter der Patienten betrug zum Behandlungsbeginn $12,8 \pm 2,2$ Jahre (min. 6,4 Jahre, max. 22,3 Jahre). Die mittlere Behandlungsdauer betrug $3,1 \pm 1,6$ Jahre. Demnach war die kieferorthopädische Behandlung durchschnittlich im Alter von $15,9 \pm 2,1$ Jahren (min. 8,5 Jahre, max. 24,1 Jahre) abgeschlossen.

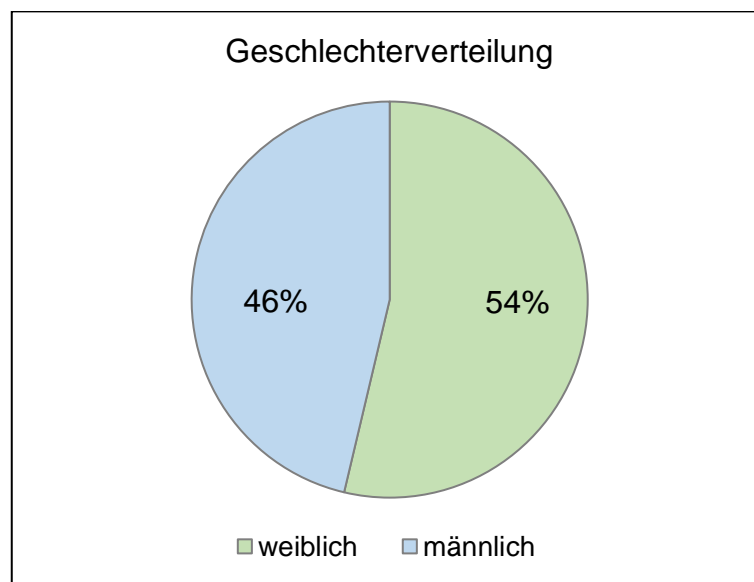


Abbildung 25: Geschlechterverteilung der retrospektiv ausgewerteten Patienten.

Als Einschlusskriterium mussten mindestens zwei Panoramaschichtaufnahmen eines Patienten vorliegen. Durchschnittlich wurden drei Röntgenbilder dieser Art gemacht, in der Regel zu Behandlungsbeginn, in der Zwischendiagnostik und zum Behandlungsabschluss ($n = 453$; 39,2 %) (Tab. 2).

Tabelle 2: Gesamtanzahl der Panoramaschichtaufnahmen (n PSA) und betroffene Patientenzahl in n (%).

n PSA	2	3	4	5	6	7	8
n (%)	380 (32,9%)	453 (39,2%)	220 (18,9%)	77 (6,7%)	17 (1,5)	7 (0,6%)	2 (0,2)

5.2.2 Verteilung der anamnestischen Daten der untersuchten Patienten

Das dentale Alter zum Beginn und zum Abschluss der kieferorthopädischen Therapie stimmte mit dem chronologischen Alter überein. Es handelte sich in den meisten Fällen um ein spätes Wechselgebiss zum Behandlungsbeginn (n = 699; 60,5 %) und um ein bleibendes Gebiss zum Behandlungsende (n = 1092; 94,5 %) (Tab. 3).

Tabelle 3: Verteilung der Dentitionsphasen zu Behandlungsbeginn und -ende in n (%).

	Dentition zum Behandlungsbeginn	Dentition zum Behandlungsende
frühes Wechselgebiss	216 (18,7 %)	2 (0,2 %)
spätes Wechselgebiss	699 (60,5 %)	62 (5,4 %)
bleibendes Gebiss	241 (20,8 %)	1092 (94,5 %)

Bei den retrospektiv erfassten Patienten wurde vorwiegend mit kombinierten kieferorthopädischen Apparaturen (festsitzend und herausnehmbar: n = 688; 59,6 %) gearbeitet, wobei vielfach ein herausnehmbares Gerät vor einer Multibracketapparaturs eingesetzt wurde (Tab. 4). Darüber hinaus waren ca. ein Fünftel der Patienten von notwendigen Extraktionstherapien bleibender Zähne während ihrer kieferorthopädischen Behandlung betroffen (n = 210; 18,2 %) (Tab. 5). Nur ein Bruchteil der Patienten benötigte außerdem eine kombiniert kieferchirurgisch-kieferorthopädische Therapie (n = 22; 1,9 %) (Tab. 5).

In Tabelle 5 ist die Verteilung der anamnestischen Angaben aufgezeigt. Bei einem Teil der Patienten wurden Erkrankungen festgestellt. Pulmonale, vegetative und genetische Leiden wurden differenziert als jeweilige Gruppe betrachtet. Innerhalb dieser Gruppen wurde nicht weiter nach speziellen Krankheitsbildern unterschieden. Über ein Viertel der Probanden litten an Allergien (n = 331; 28,6 %) (Tab. 5). Von dysfunktionalen Bewegungsabläufen wie z. B. Mundatmung, Sigmatismus und ein Schnuller- oder Daumenlutschen

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

waren weitaus mehr Patienten betroffen als unbetroffen (n = 766; 66,2 %) (Tab. 5). Hier wurden explizite orale Fehlfunktionen ebenfalls nicht separat vermerkt und als Dysfunktionen bzw. Dyskinesien zusammengefasst betrachtet.

Tabelle 4: Die verwendeten kieferorthopädischen Apparaturen der Patienten in n (%).

verwendete kieferorthopädische Apparatur	Patientenanzahl in n (%)
herausnehmbar	86 (7,4 %)
feststehend und herausnehmbar	688 (59,6 %)
feststehend	382 (33,0 %)

Tabelle 5: Verteilung der anamnestischen Daten in n (%).

	nein/ nicht vorhanden	ja/ vorhanden
Extraktionstherapie	955 (81,8 %)	201 (18,2 %)
kombinierte kieferchirurgisch-kieferorthopädische Therapie	1134 (98,1 %)	22 (1,9 %)
gesunde Patienten	295 (25,5 %)	861 (74,5 %)
Patienten mit Allergien	825 (71,4 %)	331 (28,6 %)
Patienten mit pulmonale Erkrankungen	1082 (93,6 %)	74 (6,4 %)
Patienten mit vegetative Erkrankungen	1133 (98,0 %)	23 (2,0 %)
Patienten mit Syndromen	1134 (98,1 %)	22 (1,9 %)
Dysfunktionen/Dyskinesien	390 (33,8 %)	766 (66,2 %)

5.2.3 Verteilung der Kjaer-Merkmale der untersuchten Patienten

Die Mehrheit der Patienten wies mindestens ein Kjaer-Merkmal auf (97,8 %, n = 1131). Lediglich 2,2 % (n = 25) der Patienten hatten keines der in dieser Studie untersuchten Merkmale (Abb. 26 & 33). Abbildung 26 veranschaulicht die Anzahl der Kjaer-Merkmale pro Patienten. Bei den meisten Patienten lagen zwei Kjaer-Merkmale zum Behandlungsbeginn vor (28,8%, n = 333). Mehr als fünf Kjaer-Merkmale pro Patient kamen vergleichsweise seltener vor (Abb. 26).

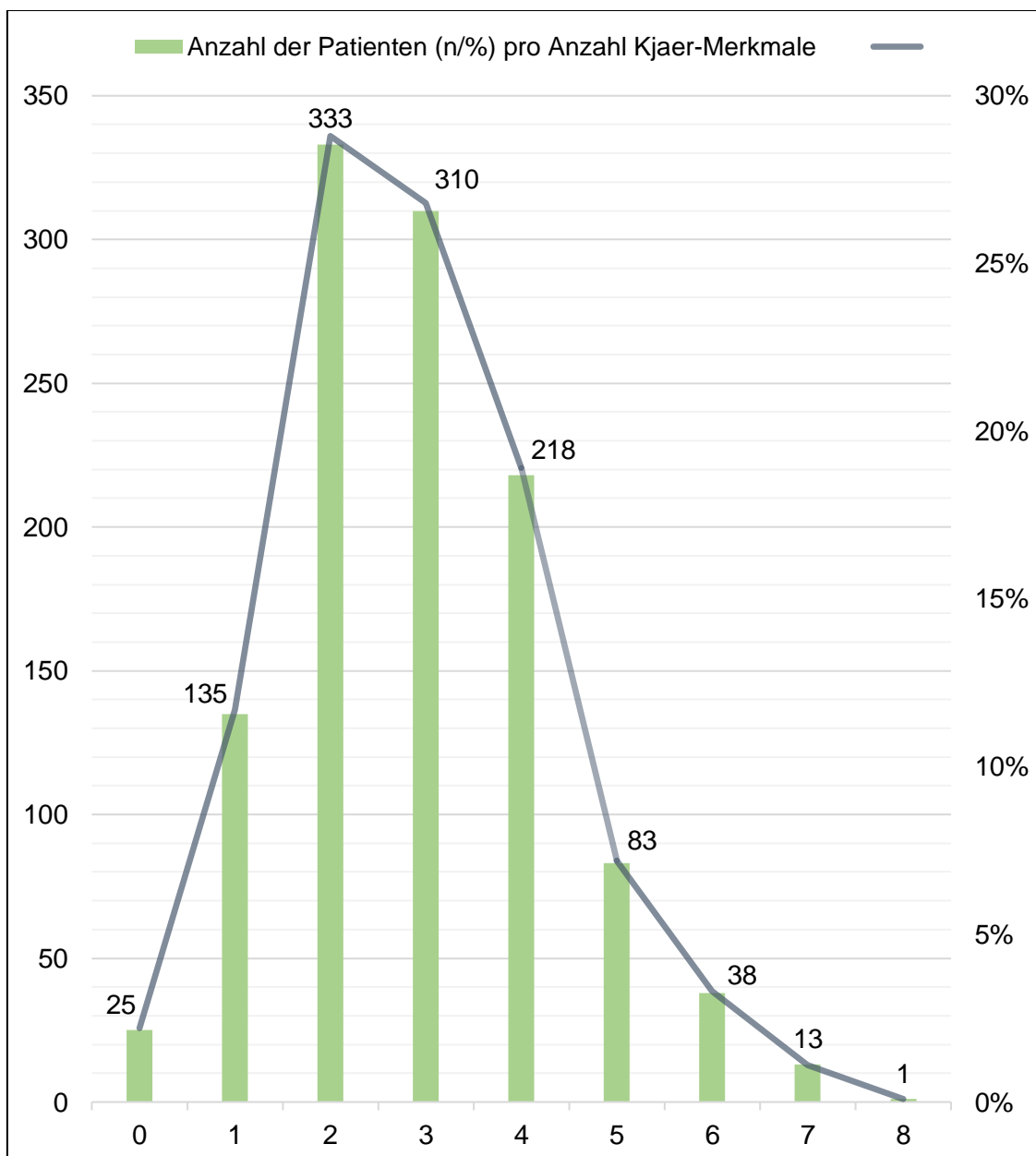


Abbildung 26: Verteilungsparameter der Patienten in n/% pro Anzahl der Kjaer-Merkmale null bis acht zum Behandlungsbeginn.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

*Tabelle 6: Verteilungsparameter der Kjaer-Merkmale und (un-)betroffene Zahnanzahl in n (%) und die mittlere Anzahl betroffener Zähne. *kein Kjaer-Merkmal*

Variable	unbetroffene Zähne	betroffene Zähne	mittlere Anzahl betroffener Zähne
schmale Zahnkrone	852 (73,7 %)	244 (26,3 %)	0,47
kurze Zahnwurzel	974 (84,3 %)	182 (15,7%)	0,46
kurze distale Zahnwurzel des 1. UK Molaren	1082 (93,6 %)	74 (6,4 %)	0,08
schmale Zahnwurzel	879 (76,0 %)	277 (24,0 %)	0,64
Wurzelkrümmungen	363 (31,4 %)	793 (68,6 %)	1,73
pathologische Wurzelresorptionen	1137 (98,4 %)	19 (1,6%)	0,02
Taurodontismus	514 (44,5 %)	641 (55,5 %)	2,14
Mikrodontie	1108 (95,8 %)	48 (4,2 %)	0,06
Nichtanlage	1023 (88,5 %)	133 (11,5 %)	0,31
Odontom	1102 (95,3 %)	54 (4,7 %)	0,05
Ektopie	969 (83,8 %)	187 (16,2 %)	0,22
atypische Wurzelresorption	909 (78,6 %)	247 (21,4 %)	0,32
Spätanlage isoliert	1022 (88,4 %)	134 (11,6 %)	0,25
Spätanlage generalisiert	1125 (97,3 %)	31 (2,7 %)	-
Infraokklusion	1080 (93,4 %)	76 (6,6 %)	-
Lipping	24 (2,1 %)	1121 (97,9 %)	-
traumatische Zahnschädigungen *	1018 (88,1 %)	138 (11,9 %)	0,22

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Tabelle 6 stellt die Verteilung aller aufgenommenen Variablen pro Zahnanzahl in n (%) dar. Es wird der Anteil der Zähne ohne bzw. mit dem jeweiligen Merkmal unterschieden. Demnach lag an 363 Zähnen (31,4 %) keine Wurzelkrümmung vor, die Mehrheit (n = 793; 68,6 %) wies jedoch mind. eine Wurzelkrümmung auf. Die mittlere Anzahl der Zähne mit einer Wurzelkrümmung lag bei 1,73 (Tab. 6). Traumatisch geschädigte Zähne wurden ebenfalls als Variable aufgenommen, entsprechen jedoch nicht einem nach Inger Kjaer [1995] definierten Merkmal.

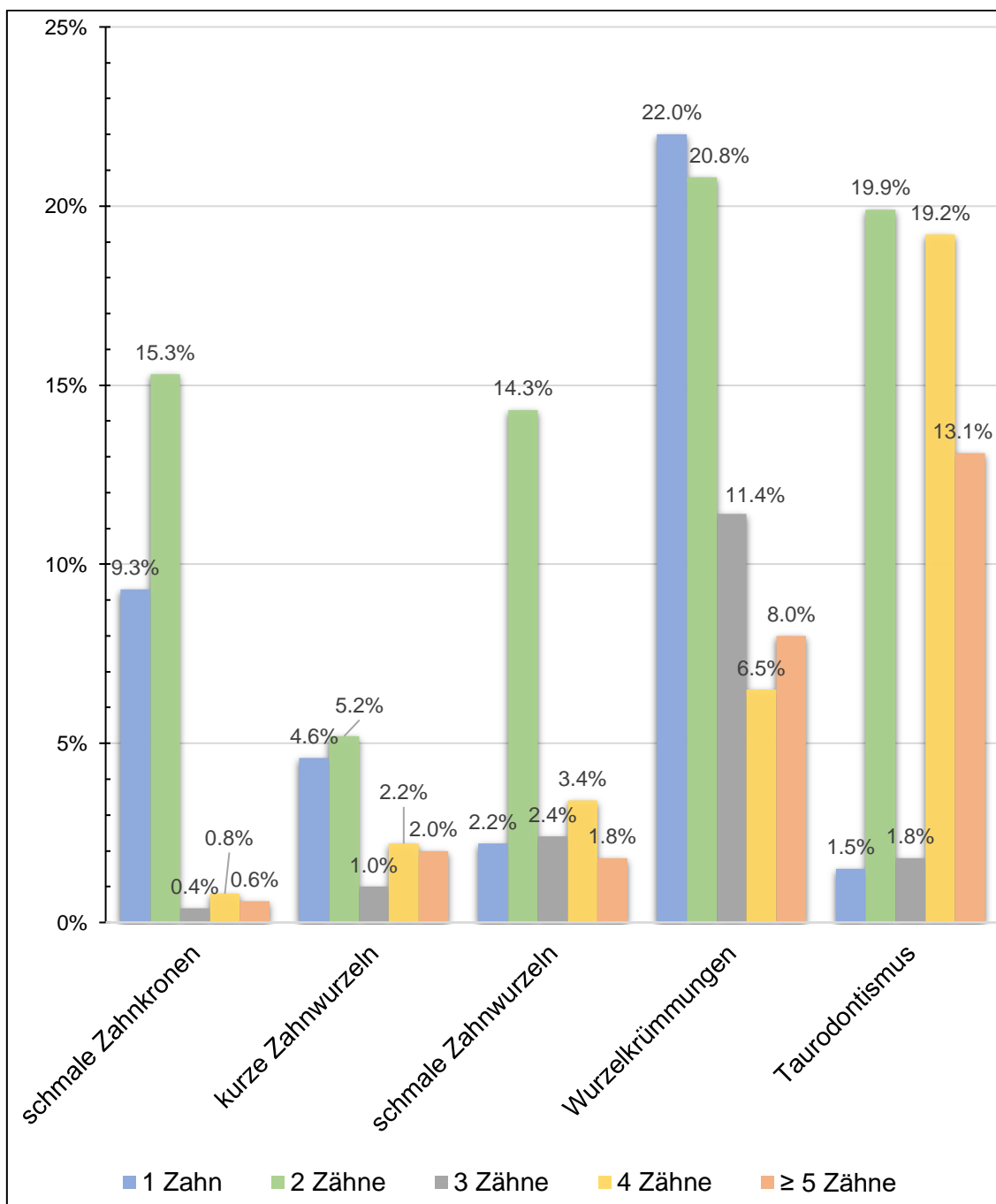


Abbildung 27: Verteilung der häufigsten Kjaer-Merkmale in % in Bezug zur betroffenen Zahnanzahl eins bis \geq fünf pro Patient.

Die von Kjaer [1995] spezifizierten Merkmale kamen in unterschiedlicher Häufigkeit bei den untersuchten Jugendlichen vor. Abbildung 27 stellt die häufigsten Kjaer-Merkmale und die betroffene Zahnanzahl dar. Die Merkmale „schmale Zahnkronen“ und „kurze Zahnwurzeln“ waren oftmals paarweise spiegelgleich zu finden. Außerdem lagen „schmale Zahnwurzeln“ und „Taurodontismus“ vielfach doppelt (14,3 % bzw. 19,9 %) oder vierfach vor (3,4 % bzw. 19,2 %) (Abb. 27). Die ersten Molaren oder seltener die zweiten Molaren erschienen häufig seitenweise taurodont. Unsymmetrische Anzahlen dieser Zähne waren rarer. Deutlich seltener unter den Merkmalen zu finden waren in Infraokklusion stehende Milchzähne und generalisierte Spätanlagen (Tab. 6). Dahingegen war ein Lipping, ein anterior und/oder posterior abgeflachter Kondylus ein- oder beidseitig, bei nahezu allen Jugendlichen festzustellen (Tab. 6). In einigen Fällen konnten die Kiefergelenkskondylen jedoch aufgrund der Röntgeneinstellung anhand der Panoramaschichtaufnahmen nicht beurteilt werden, da sie nur eingeschränkt oder gar nicht sichtbar waren (n = 11; 1,0 %) (Abb. 28).

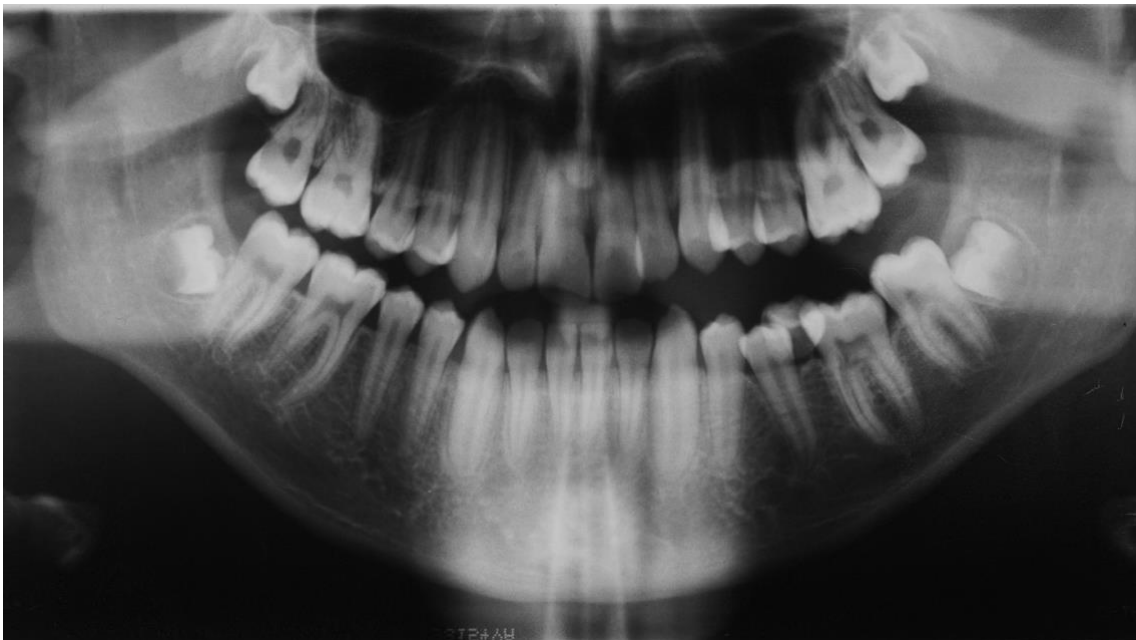


Abbildung 28: Nicht beurteilbare Kiefergelenkskondylen aufgrund unsachgemäßer Einstellung des Patienten im Röntgengerät.

5.2.4 Verteilung der Wurzelresorptionen der untersuchten Patienten

Tabelle 7 stellt die Häufigkeitsverteilung aller aufgenommenen Wurzelresorptionen über den jeweiligen Behandlungszeitraum dar. Die untersuchte Patientens Stichprobe nahm über die Zeit ab, da in der Regel zwei bis drei Panoramaschichtaufnahmen vorlagen. Je mehr Röntgenbilder zur Verlaufskontrolle angefertigt wurden, desto länger dauerte die Behandlung insgesamt bzw. wurden nachträgliche Verlaufskontrollen dokumentiert. Bei der Verteilung der Wurzelresorptionsgrade (WR-Grade) unter den Patienten zeigte sich, dass die Schwere der Wurzelresorptionen mit abnehmender Wahrscheinlichkeit auftrat: ein Blunting (= WR-Grad 1) kam häufiger vor als ein Wurzelresorptionsgrad zwei, welcher wiederum häufiger auftrat als ein Wurzelresorptionsgrad drei. Zugleich fand ein nahezu linearer Anstieg der teilresorbierten Zähne aller Grade über die Zeit statt. Daraus ist zu schließen, dass mit steigender Behandlungsdauer vermehrt Wurzelresorptionen auftreten können.

Tabelle 7: Häufigkeitsverteilung der Wurzelresorptionsgrade eins bis drei und betroffene Patienten in n (%) über die Röntgenzeitpunkte eins bis acht.

Röntgenzeitpunkte	1	2	3	4	5	6	7	8
Patienten (n)	1156	1156	775	323	103	26	9	2
WR-Grad 1	117 (10,2)	559 (48,4)	526 (67,8)	245 (75,9)	78 (75,7)	22 (84,6)	8 (88,9)	2 (50)
WR-Grad 2	6 (0,5)	60 (5,2)	102 (13,1)	55 (17,0)	28 (27,2)	6 (23,1)	4 (44,4)	1 (50)
WR-Grad 3	4 (0,3)	9 (0,8)	14 (1,8)	6 (1,9)	5 (4,9)	1 (3,8)	1 (11,1)	1 (50)

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Tabelle 8: Häufigkeitsverteilung der Wurzelresorptionsgrade eins bis drei und betroffene Patientenzahl in n (%) pro Zahnanzahl (null bis \geq zehn) zum Behandlungsabschluss.

Zahnanzahl	WR-Grad 1	WR-Grad 2	WR-Grad 3
0	313 (27,1 %)	977 (84,5 %)	1132 (97,9 %)
1	114 (9,9 %)	82 (7,1 %)	14 (1,2 %)
2	157 (13,6 %)	52 (4,5 %)	3 (0,3 %)
3	129 (11,2 %)	17 (1,5 %)	0 (0 %)
4	109 (9,4 %)	11 (1 %)	4 (0,3 %)
5	94 (8,1 %)	4 (0,3 %)	0 (0 %)
6	68 (5,9 %)	5 (0,4 %)	1 (0,1 %)
7	50 (4,3 %)	3 (0,3 %)	0 (0 %)
8	34 (2,9 %)	3 (0,3 %)	1 (0,1 %)
9	21 (1,8 %)	1 (0,1 %)	0 (0 %)
≥ 10	67 (5,8 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
gesamt	843 (72,9 %)	178 (15,5 %)	23 (2,0 %)

Nach individueller Therapiedauer der Patienten waren zum Behandlungsabschluss im Schnitt $3,22 \pm 3,24$ Zähne (Min. 0, Max. 19) von einem WR-Grad 1 betroffen. Wurzelresorptionen entsprechend einem Grad 2 kamen an $0,33 \pm 1,02$ Zähnen vor (Min. 0, Max. 9). Eine Resorption von über ein Drittel der ursprünglichen Wurzellänge (WR-Grad 3) betraf $0,04 \pm 0,40$ der Zähne (Min. 0, Max. 8).

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Bei näherer Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Wurzelresorptionsgrade auf die entsprechende Zahnanzahl waren bei 157 Patienten (13,6 %) zwei Zähne von einem Blunting (WR-Grad 1) betroffen (Tab. 8). Daneben kamen an zwei Zähnen bei 52 Patienten (4,5 %) ein WR-Grad 2 (Abb. 30) und bei drei Patienten (0,3 %) ein WR-Grad 3 vor (Tab. 8, Abb. 31 & 32). Es zeigte sich, dass von Resorptionen schwer betroffenen Zähne mit 2 % (n = 23) relativ selten auftraten. Dahingegen kam ein Blunting bei mehr als der Hälfte der Patienten (n = 843, 72,9 %) (Tab. 8) vor.

Am häufigsten von Wurzelresorptionen waren die Oberkieferschneidezähne betroffen ebenso wie die ersten Unterkiefermolaren (Tab. 9). Die Zähne 36 und 46 waren zudem des Öfteren von einer Resorption einer Wurzel betroffen, wobei die distale Wurzel häufiger Resorptionserscheinungen zeigte als die mesiale. Vergleichsweise seltener kamen Resorptionen der zweiten Oberkiefermolaren vor, welche sich oftmals noch im Wurzelwachstum befanden (Tab. 9).

Tabelle 9: Anzahl der von Wurzelresorptionen (WR-Grad 1-3) betroffenen Zähne aller ausgewerteten Röntgenbilder in n.

	Schneidezähne				Eckzähne		Prämolaren				Molaren			
	12	11	21	22	13	23	15	14	24	25	17	16	26	27
WR-Grad 1	834	726	809	802	138	138	108	119	110	105	3	90	108	3
WR-Grad 2	67	56	52	68	8	7	13	13	18	12	0	7	13	0
WR-Grad 3	5	15	9	4	2	2	1	1	1	9	0	7	1	0
	32	31	41	42	33	43	35	34	44	45	37	36	46	47
WR-Grad 1	155	129	131	136	64	67	55	94	104	55	64	474	393	56
WR-Grad 2	10	17	17	13	3	5	6	5	6	5	14	58	42	8
WR-Grad 3	0	2	1	0	2	1	3	0	0	0	0	6	6	0



Abbildung 29: Anfangsröntgenbild eines Patienten vom 20.01.2006. Oberkiefer Frontzähne ohne erkennbare Wurzelresorptionen (WR-Grad 0). Nebenbefund: ektopisch verlagertes Zahn 33.



Abbildung 30: Zwischendiagnostisches Röntgenbild vom 12.08.2008 desselben Patienten wie aus Abb. 29. Die Oberkiefer Frontzähne weisen nun einen Wurzelresorptionsgrad 2 auf. Nebenbefund: ektopisch verlagertes 33 wurde chirurgisch entfernt, Multiband in situ.



Abbildung 31: Bei dieser Patientin waren insbesondere die Oberkieferzähne 15 bis 25 von einem WR-Grad 3 betroffen. Diese stark ausgeprägten Wurzelresorptionen kamen selten vor und führten in diesem Fall zu einem Abbruch der kieferorthopädischen Behandlung. Zwischendiagnostisches Röntgenbild vom 19.02.2007.



Abbildung 32: Dieselbe Patientin wie in Abb. 31. Zustand nach vorzeitigem Behandlungsabschluss. Wurzelresorptionen sind stagniert, kein weiteres Vorschreiten sichtbar. Abschlussröntgenbild vom 15.07.2008.

5.3 Statistische Korrelation zwischen verschiedenen unabhängigen Variablen und der Zielvariable Wurzelresorptionen

Bei der Analyse von Zusammenhängen wurden die Patienten mit einem oder mehreren Kjaer-Merkmal/en mit denjenigen, die kein Kjaer-Merkmal besaßen verglichen und die auftretenden apikalen Wurzelresorptionen in beiden Gruppen untersucht. Im Verlauf der kieferorthopädischen Behandlung zeigte ein erhöhter Anteil der Probanden externe, apikale Wurzelresorptionen. Diese traten sowohl in der Gruppe derjenigen ohne, als auch unter denjenigen mit vorhandenen Kjaer-Merkmalen auf (Abb. 33).

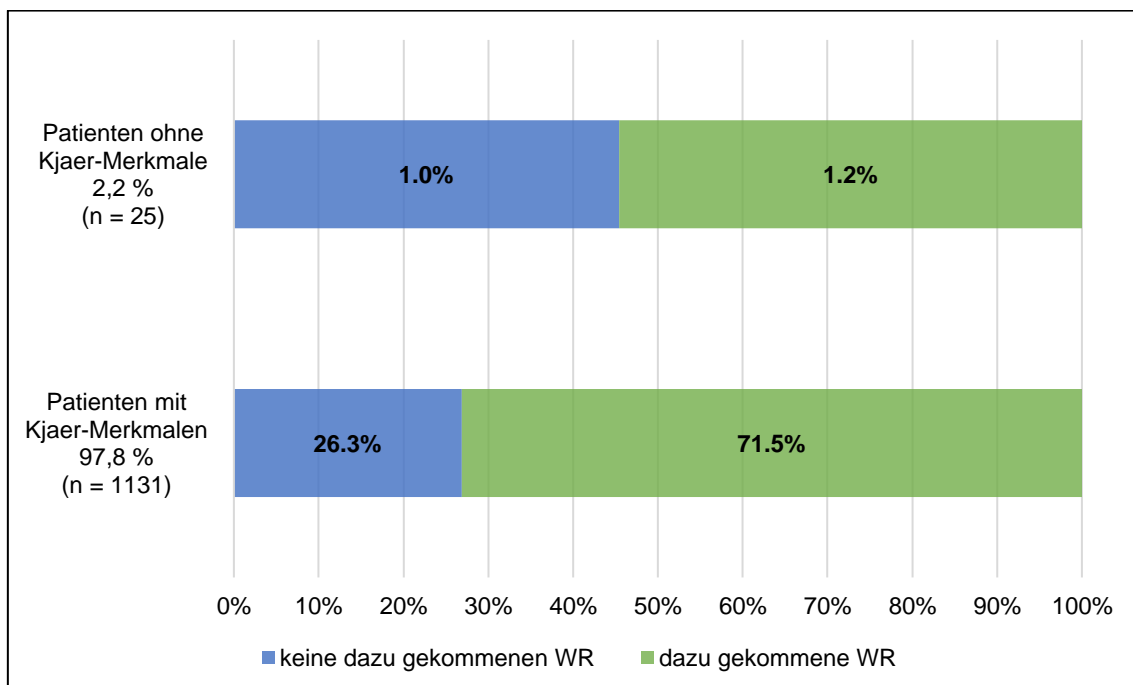


Abbildung 33: Anzahl der Patienten ohne und mit Kjaer-Merkmal/en in % (n) zu Behandlungsbeginn und dazu gekommene Wurzelresorptionen (WR) nach Behandlungsabschluss in %.

Tabelle 10 veranschaulicht die Anzahl der Kjaer-Merkmale zu Behandlungsbeginn und die dazu gekommenen Wurzelresorptionen nach Behandlungsabschluss. Demnach wiesen 333 der 1156 Probanden (28,8 %) zwei Kjaer-Merkmale auf, von denen bei 7,6 % (n = 88) keine weiteren Resorptionen im Verlauf der Therapie auftraten. Dahingegen kamen bei 21,2 % (n = 245) der Patienten mit zwei Kjaer-Merkmalen zum Behandlungsbeginn Wurzelresorptionen nach der kieferorthopädischen Behandlung hinzu.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Die Gesamtanzahl der Patienten, die nach Behandlungsabschluss neu hinzugekommene Wurzelresorptionen aufwiesen belief sich auf 72,8% (n = 841).

Tabelle 10: Anzahl der Gesamtsumme der Kjaer-Merkmale zum Behandlungsbeginn (null bis acht), nicht dazugekommene und dazugekommene Wurzelresorptionen und betroffene Patientenzahl in n (%).

WR	n Kjaer-Merkmale zum Behandlungsbeginn									gesamt
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
nicht dazugekommen	11 (1,0)	43 (3,7)	88 (7,6)	83 (7,2)	57 (4,9)	24 (2,1)	8 (0,7)	1 (0,09)	0 (0)	315 (27,2)
dazugekommen	14 (1,2)	92 (8,0)	245 (21,2)	227 (19,6)	161 (13,9)	59 (5,1)	30 (2,6)	12 (1,0)	1 (0,09)	841 (72,8)
gesamt	25 (2,2)	135 (11,7)	333 (28,8)	310 (26,8)	218 (18,9)	83 (7,2)	38 (3,3)	13 (1,1)	1 (0,09)	1156 (100)

Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman zeigte einen statistisch nicht signifikanten Zusammenhang zwischen den Kjaer-Merkmalen und neu hinzugekommenen Resorptionen ($p = 0,06$). Dieses Ergebnis wurde durch den angewandten Chi-Quadrat-Test ebenfalls bestätigt ($p = 0,34$).

5.3.1 Bivariate Analyse

Bei der bivariaten Analyse wurde der Einfluss der aus den Patientenakten und den Röntgenbildern erfassten unabhängigen Variablen auf die Zielgröße „Wurzelresorptionen gesamt“ überprüft.

Tabelle 11 fasst alle erhobenen patienten- und behandlungsbezogenen Variablen und Kjaer-Merkmale zusammen. Für das Geschlecht und den allgemeinen Gesundheitszustand der Probanden konnte keine Relevanz für das Auftreten von Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie

festgestellt werden. Pulmonale und vegetative Erkrankungen präsentierten sich als nicht ausschlaggebende Faktoren. Patienten mit Syndromen oder Allergien waren ebenfalls nicht häufiger von Wurzelresorptionen betroffen als gesunde Patienten. Zugleich waren traumatische und dysfunktionale Einflüsse nicht relevant für Resorptionen während orthodontischer Zahnbewegungen.

Unter den behandlungsbezogenen Variablen war der Röntgenzeitpunkt ausschlaggebend für auftretende Wurzelresorptionen ($p < 0,001$). Diese traten z. T. noch einige Zeit nach dem Behandlungsende auf, weshalb sie erst auf späteren Röntgenkontrollbildern sichtbar waren. Dies spiegelt sich in der Behandlungsdauer wider ($p < 0,001$). Je länger die Behandlung dauerte bzw. je später Röntgenbilder in der Verlaufskontrolle angefertigt wurden, desto mehr Resorptionen traten auf. Zudem hatte das dentale Alter zu Behandlungsbeginn einen Einfluss auf die Entstehung von Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie. Stellte man das dentale Alter der Patienten dem chronologischen Alter als Prädiktoren im Modell gegenüber, so war das chronologische Alter zu Behandlungsbeginn nicht mehr signifikant für das Auftreten von Wurzelresorptionen ($p = 0,181$). Ausschlaggebend war die (Wechsel-) Gebissphase, in der sich der Patient zum Behandlungsbeginn befand (bleibendes Gebiss: $p < 0,001$; spätes Wechselgebiss: $p = 0,011$). Darüber hinaus zeigten die verwendeten kieferorthopädischen Apparaturen (herausnehmbar: $p < 0,001$; festsitzend und herausnehmbar: $p = 0,023$), ebenso wie durchgeführte Zahnextraktionen ($p = 0,010$) während der Behandlung einen Einfluss auf die Entstehung von Wurzelresorptionen. In der Patientenstichprobe ohne Zahnextraktionen zeigten sich weniger Resorptionen. Mehrfache kieferorthopädische Therapien wiesen einen nur knapp signifikanten Zusammenhang zu entstandenen Wurzelresorptionen auf ($p = 0,046$). Im Gegensatz dazu zeigte eine kombinierte kieferchirurgisch-kieferorthopädische Therapie keinen statistisch signifikanten Effekt für das Auftreten von Wurzelresorptionen über die Zeit ($p = 0,206$).

Unter den Kjaer-Merkmalen hatten kurze Zahnwurzeln einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten von Wurzelresorptionen ($p < 0,001$). Zudem erwies sich, dass bei Vorliegen von Aplasien ($p = 0,010$) und atypischen Wurzelresorptionen von Milchzähnen ($p = 0,034$) mehr Wurzelresorptionen der bleibenden Dentition auftraten. Alle anderen Kjaer-Merkmale (schmale

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Zahnkronen, schmale und kurze Zahnwurzeln, kurze distale erste UK-Molarenwurzel, Zahnwurzelkrümmungen, pathologische Wurzelresorptionen, Taurodontismus, Mikrodontie, isolierte und generalisierte Spätanlagen, Ektopien, Odontom, in Infraokklusion stehende Milchzähne, Lipping) zeigten keinen relevanten Zusammenhang zu auftretenden Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Behandlung ($p > 0,05$).

Tabelle 11: Ergebnisse der bivariaten Analyse: patienten- und behandlungsbezogene Variablen und Kjaer-Merkmale.

Patientenbezogene Variablen					
Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	Wald-Chi-Quadrat	p-Wert
Geschlecht	0,007	0,070	0,130; 0,144	0,009	0,923
chronologisches Alter zu Behandlungsbeginn	0,026	0,020	- 0,012; 0,065	1,789	0,181
gesunde Patienten	- 0,034	0,784	- 0,188; 0,119	0,192	0,661
Patienten mit pulmonalen Erkrankungen	- 0,129	0,134	- 0,391; 0,134	0,921	0,337
Patienten mit vegetativen Erkrankungen	0,115	0,165	- 0,209; 0,439	0,486	0,486
Patienten mit einem Syndrom	- 0,094	0,357	- 0,794; 0,606	0,069	0,793
Patienten mit Allergien	0,017	0,077	- 0,134; 0,168	0,048	0,826
Patienten mit Dysfunktionen / Dyskinesien	- 0,056	0,072	- 0,197; 0,085	0,598	0,440
traumatisch geschädigte Zähne	0,104	0,091	- 0,075; 0,283	1,299	0,254

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Behandlungsbezogene Variablen					
Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	Wald-Chi-Quadrat	p-Wert
Röntgenzeitpunkt	0,479	0,023	0,434; 0,523	441,871	< 0,001
Behandlungsdauer	0,082	0,016	0,052; 0,113	27,522	< 0,001
Behandlungsbeginn (bleibendes Gebiss)	0,643	0,142	0,366; 0,921	20,660	< 0,001
Behandlungsbeginn (spätes Wechselgebiss)	0,335	0,132	0,077; 0,593	6,478	0,011
KFO-Apparatur (herausnehmbar)	0,955	0,172	- 1,291; - 0,618	30,938	< 0,001
KFO-Apparatur (herausnehmbar + festsitzend)	0,166	0,073	- 0,308; - 0,023	5,201	0,023
Extraktions-therapie	- 0,231	0,089	- 0,405; - 0,056	6,720	0,010
kombinierte kieferchirurgisch-kieferorthopädische Therapie	- 0,362	0,287	- 0,924; 0,200	1,597	0,206
mehrfache kieferorthopädische Therapie	- 0,195	0,098	- 0,387; - 0,044	3,985	0,046
Kjaer-Merkmale					
Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	Wald-Chi-Quadrat	p-Wert
schmale Zahnkronen	- 0,040	0,040	- 0,118; 0,038	1,024	0,312
kurze Zahnwurzeln	0,119	0,019	0,081; 0,157	37,691	< 0,001
kurze distale Wurzel des 1. UK Molaren	0,076	0,092	- 0,105; 0,257	0,683	0,409

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

schmale Zahnwurzeln	- 0,062	0,025	- 0,110; - 0,013	6,197	0,130
Wurzelkrümmungen	- 0,001	0,017	- 0,034; 0,032	0,004	0,948
pathologische Wurzelresorptionen	0,227	0,181	- 0,128; 0,582	1,576	0,209
Taurodontismus	0,021	0,013	- 0,004; 0,046	2,665	0,103
Mikrodontie	- 0,060	0,126	- 0,307; 0,186	0,229	0,632
Aplasien	- 0,056	0,022	- 0,100; - 0,013	6,564	0,010
Spätanlagen	- 0,051	0,044	- 0,137; 0,035	1,345	0,246
Odontom	0,068	0,099	- 0,127; 0,263	0,456	0,495
Ektopie	0,017	0,062	- 0,104; 0,137	0,073	0,787
atypische Wurzelresorption	-0,121	0,057	- 0,232; - 0,009	4,497	0,034
Infraokklusion	0,087	0,163	- 0,243; 0,416	0,266	0,606
Lipping	0,134	0,285	- 0,424; 0,693	0,222	0,637

5.3.2 Multivariate Analyse

Für die multivariate Analyse wurde die Zielgröße wie folgt definiert: Vorliegen einer Wurzelresorption des Schweregrades zwischen eins und drei (= gesamt) an mindestens einem Zahn.

Tabelle 12: Ergebnisse der multivariaten Analyse und der Zielgröße "Wurzelresorptionen gesamt".

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	95 %-Konfidenzintervall	Wald-Chi-Quadrat	p-Wert
Dentition Behandlungsende (bleibendes Gebiss)	0,922	0,183	0,563; 1,281	25,351	< 0,001
kieferorthopädische Apparatur (herausnehmbar)	- 0,862	0,167	- 1,189; - 0,535	26,686	< 0,001
kieferorthopädische Apparatur (herausnehmbar + festsitzend)	- 0,201	0,075	- 0,349; -0,053	7,118	0,008
Extraktionstherapie	- 0,122	0,086	- 0,290; 0,046	2,030	0,154
Behandlungsdauer	0,095	0,019	0,057; 0,133	24,061	< 0,001
kurze Zahnwurzeln	0,117	0,017	0,084; 0,150	47,899	< 0,001
schmale Zahnwurzeln	- 0,066	0,024	- 0,113; - 0,019	7,482	0,006
atypische Wurzelresorption	- 0,093	0,054	- 0,199; 0,013	2,931	0,087
Aplasien	- 0,080	0,022	- 0,123; - 0,038	13,921	< 0,001

Tabelle 12 zeigt die unabhängigen Variablen, die bei der Berechnung der logistischen Regression einen signifikanten Zusammenhang mit der Gesamtzahl der Wurzelresorptionen hatten. Die bleibende Dentition zum Behandlungsende ($p < 0,001$) und die verwendete kieferorthopädische Apparatur (herausnehmbar: $p < 0,001$; kombiniert festsitzend und herausnehmbar: $p = 0,008$) waren von entscheidender Bedeutung für die Entstehung von Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie. Weiterhin war die Behandlungsdauer ($p < 0,001$) ausschlaggebend und das Risiko von orthodontisch induzierten Wurzelresorptionen stieg über den Zeitraum an. Von den Kjaer-Merkmalen waren kurze Zahnwurzeln ($p < 0,001$), schmale Zahnwurzeln ($p = 0,006$) und Aplasien ($p < 0,001$) relevant für das Auftreten von apikalen Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie.

5.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Überprüfung der aufgestellten Hypothesen

Hypothese 1

Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie korreliert mit dem Vorhandensein von Kjaer-Merkmalen.

Hypothese 1 konnte zum Teil bestätigt werden.

Diese Arbeit konnte nur für eine Auswahl von Kjaer-Merkmalen eine Bedeutung für die Entstehung von Wurzelresorptionen feststellen (Tab. 12). Weiterhin scheint die Anzahl der Kjaer-Merkmale pro Patienten für die Entwicklung von Wurzelresorptionen irrelevant zu sein, da Wurzelresorptionen bei Patienten mit und ohne Kjaer-Merkmale vorkamen (Abb. 33). Im Ergebnis konnte ein signifikanter Zusammenhang von apikalen Wurzelresorptionen mit folgenden Kjaer-Merkmalen eruiert werden:

- kurze Zahnwurzeln
- schmale Zahnwurzeln
- Aplasien.

Hypothese 2

Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie ist abhängig von der verwendeten kieferorthopädischen Apparatur.

Hypothese 2 wurde mit dieser Arbeit bestätigt.

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Behandlung mit herausnehmbaren, herausnehmbar-festsitzenden, festsitzenden kieferorthopädischen Apparaturen und dem Auftreten von Wurzelresorptionen während der Therapie.



Abbildung 34: Röntgenbild einer Patientin mit festsitzender Apparatur, erkennbar an den röntgendichten Strukturen um den ersten Molaren (kieferorthopädische Bänder). Keine erkennbaren Wurzelresorptionen an den Zähnen 36 und 46. Aufnahmedatum: 30.01.2022



Abbildung 35: Röntgenbild derselben Patientin wie in Abb. 34, Zustand nach kieferorthopädischer Behandlung. Deutliche Wurzelresorptionen insbesondere der distalen Wurzeln der Zähne 36 und 46 (jeweils WR-Grad 2). Aufnahmedatum: 26.04.2004.

Hypothese 3

Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie ist abhängig von der Behandlungsdauer.

Hypothese 3 wurde mit dieser Arbeit bestätigt.

In der bivariaten sowie in der multivariaten Analyse konnte der Zusammenhang zwischen der kieferorthopädischen Behandlungsdauer und auftretenden externen Wurzelresorptionen bewiesen werden. Je länger die kieferorthopädische Therapie dauerte, desto größer war das Risiko für auftretende apikale Wurzelresorptionen.

Hypothese 4

Das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie ist abhängig vom Geschlecht des Patienten.

Hypothese 4 wurde verworfen, da sich das Geschlecht der Probanden als irrelevant für das Wurzelresorptionsrisiko erwies. Aufgrund der ausgewogenen Geschlechterverteilung innerhalb der vergleichsweisen großen Patientenauswahl ist die Nicht-Signifikanz ein starker Hinweis auf die Richtigkeit dieser Annahme.

Darüber hinaus wurden keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den physischen Eigenschaften der Patienten und auftretenden Wurzelresorptionen ermittelt. Gesunde Patienten waren nicht weniger von Wurzelresorptionen betroffen als Patienten mit Allergien, pulmonalen oder vegetativen Erkrankungen und Syndromen. Ferner konnte keine Korrelation von Extraktionstherapien und kombiniert kieferchirurgisch-kieferorthopädischen Therapien, sowie traumatisch geschädigten Zähnen (vgl. Abb. 36 & 37) und apikalen Wurzelresorptionen bestätigt werden. Dysfunktionen und Dyskinesien hatten in der vorliegenden Studie ebenfalls keinen Einfluss auf das Wurzelresorptionsrisiko während den orthodontischen Zahnbewegungen.

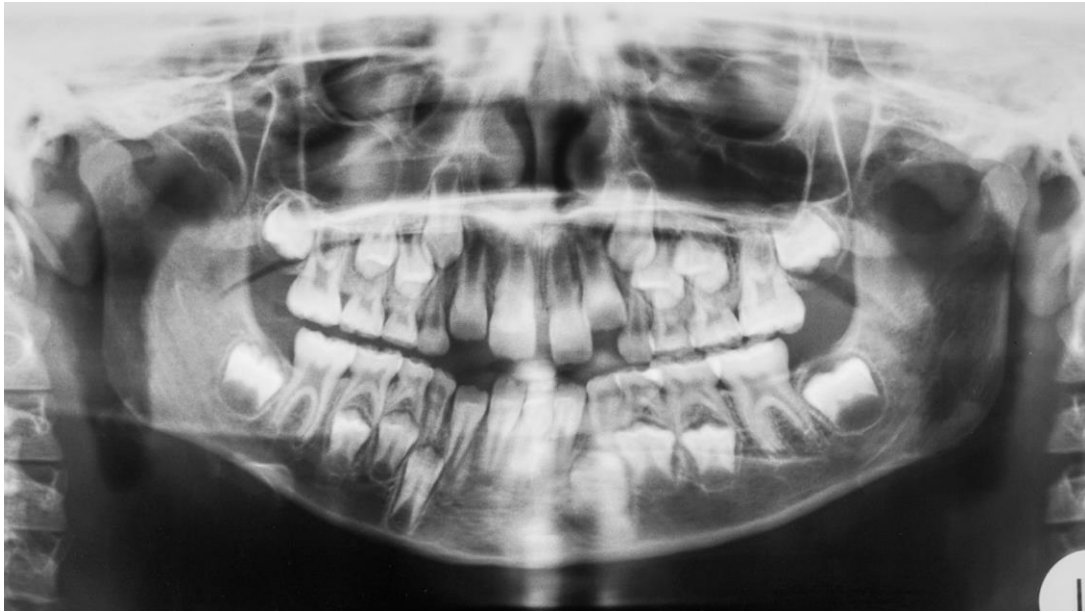


Abbildung 36: Frühes Wechselgebiss eines Patienten, u. a. Zähne 12 bis 22 im Durchbruch mit noch nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum. Aufnahmedatum: 24.02.1998.



Abbildung 37: Derselbe Patient wie in Abb. 36. Zahn 11 weist nun eine röntgendichte Struktur auf, welche auf eine Kunststofffüllung (nach Trauma) schließen lässt. Keine Wurzelresorption an Zahn 11 sichtbar, Zahn 22 weist einen WR-Grad 1 auf. Aufnahmedatum: 27.10.2004.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Material und Methodik

In der vorliegenden Studie wurden externe apikale Wurzelresorptionen von 10- bis 18-Jährigen, die in der Abteilung für Kieferorthopädie im Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Philipps-Universität Marburg behandelt wurden, retrospektiv erfasst. Eingeschlossen wurden die Daten von Patienten, die im Zeitraum von Januar 2000 bis einschließlich Dezember 2019 vorstellig waren. Insgesamt wurden die Daten von 1156 Patienten erfasst, wobei pro Patient 38 Variablen, die im Zusammenhang mit Wurzelresorptionen stehen, aufgenommen wurden. Über diesen zwanzigjährigen Erfassungszeitraum konnte so eine verhältnismäßig große Datenmenge erfasst und ausgewertet werden. Eine Studie dieser Größenordnung ist aussagekräftiger als eine Studie mit kleiner Stichprobengröße. Darüber hinaus ist die weitestgehend ausgeglichene Patientenverteilung innerhalb der Geschlechter als positiv zu bewerten.

Die Erhebung der Daten erfolgte ausschließlich anhand der Aufzeichnungen in den Patientenakten, die dem Aktenarchiv der kieferorthopädischen Abteilung entnommen wurden. Allgemeine Angaben wie z. B. das Geburtsdatum und das Geschlecht, die Erstvorstellung der Patienten und die verwendeten kieferorthopädische Apparaturen waren in den Akten eindeutig vermerkt. Bei den speziellen Daten wie z. B. oralen Fehlfunktionen (Daumenlutschen, Mundatmung, Bruxismus etc.), Zahntraumata, frühere kieferorthopädische Behandlungen o. ä. musste auf die wahrheitsgemäße Aussage und vollständige Angaben der Patienten bzw. deren Erziehungsberechtigten vertraut werden. Diese Daten sind fehleranfällig, da die dokumentierenden Personen zu dem Zeitpunkt der Angabe ihrer Daten keine Kenntnis darüber hatten, dass diese für eine Studie genutzt werden würden. Diese Objektivität kann jedoch als Vorteil retrospektiver gegenüber prospektiven Studien angesehen werden.

Die Altersgrenzen der retrospektiv untersuchten Patienten wurden klar definiert und Daten von unter 10-Jährigen und Erwachsenen nicht erfasst. Erwachsene haben im Gegensatz zu Jugendlichen ein vermindertes Regenerationspotential externer Wurzelresorptionen [da Silva Filho et al., 2004; Mauès et al., 2015; Ge et al., 2021]. Wurzeln im Wachstum bleiben zudem häufig von Wurzelresorptionen verschont [Mauès et al., 2015]. Daneben treten im Alter physiologisch mehr Wurzelresorptionen leichter Ausprägungsgrade auf [Hotz,

1934; Dindaroglu & Dogan, 2017]. Diese Annahme konnte in der vorliegenden Arbeit weder bestätigt noch widerlegt werden, da lediglich Jugendliche aufgenommen wurden.

Die Beurteilung der Panoramaschichtaufnahmen (PSA) und Diagnostik auf vorliegende Kjaer-Merkmale erfolgte durch eine Untersucherin. Zur Objektivierung der Ergebnisse wurde die Untersucherin zu Beginn der Studie von einer erfahrenen Behandlerin trainiert und kalibriert. Die Kjaer-Merkmale wie z. B. schmale Zahnwurzeln oder schmale Zahnkronen unterliegen jedoch einer gewissen subjektiven Wahrnehmung des jeweiligen Untersuchers. Die Einschätzung des Wurzelresorptionsausmaßes erfolgte nach drei klar definierten Ausprägungsgraden, der exakte apikale Zahnwurzelverlust wurde dabei nicht in Millimetern quantifiziert. Weiterhin ist das Ausmaß einer Wurzelresorption auf Zahnfilmen und mittels digitaler Volumentomographie exakter darstellbar und skalierbar als auf Panoramaschichtaufnahmen [Sameshima & Asgarifar, 2001; Ahuja et al., 2017; Xie et al., 2019]. Die korrekte Aufnahmetechnik der PSA ist entscheidend für die suffiziente Darstellung morphologischer Charakteristika und Wurzelresorptionen. Bei inkorrekt positionierter Patientin im Röntgengerät kommt es zu nicht maßstabsgetreuen Abbildungen der geröntgten Strukturen, bspw. werden die Frontzähne bei zu weit nach anterior geneigtem Kopf verlängert bzw. verkürzt dargestellt. Die Beurteilung des Kjaer-Merkmals „kurze Zahnwurzeln“ war demnach mit einer Ungewissheit behaftet. Darüber hinaus erschwerte die Überlagerung der Wirbelsäule im Frontzahnbereich z. T. die Beurteilung der Apizes. Die Inklination der Frontzähne auf zweidimensionalen Röntgenaufnahmen kann zudem eine scheinbar verkürzte Zahnwurzel bedingen. Anfängliche Wurzelresorptionen können dadurch stärker ausgeprägt erscheinen und würden dementsprechend in einen höheren Wurzelresorptionsgrad eingeordnet werden. Ferner kann der Belichtungsbereich durch inkorrekte Patientenpositionierung nicht ausreichend groß genug sein und Strukturen wie z. B. die Kiefergelenkskondylen werden unvollständig oder gar nicht auf dem PSA abgebildet. Dadurch konnte die konkrete Beurteilung des Kjaer-Merkmals „Lipping“ nicht für alle ausgewerteten PSA gewährleistet werden.

Die Kjaer-Merkmale Foramen caecum, ein offener Biss und ein unsymmetrischer aufsteigender Unterkieferast wurden nicht erfasst, da eine Beurteilung dieser

anhand von PSA´s nicht hinreichend möglich ist und eine klinische Untersuchung und/oder Modellanalyse der Patienten erfordert.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Abhängigkeit vom Parameter Geschlecht

Die Geschlechterverteilung war in der vorliegenden Studie weitestgehend ausgeglichen (Abb. 25) und es konnte kein geschlechterspezifisches Wurzelresorptionsrisiko festgestellt werden (Tab. 11 & 12). Pastro et al. [2018] differenzierten gleichermaßen kein erhöhtes Wurzelresorptionsrisiko unter den homogen verteilten weiblichen und männlichen Patienten ihrer Studie. Der Einfluss des Geschlechts auf das Wurzelresorptionsrisiko während einer kieferorthopädischen Therapie erwies sich unter adulten Patienten weiter als irrelevant [Ageel et al., 2021]. Ageel et al. [2021] betrachteten jedoch nur eine Anzahl von 226 Patienten aufgrund inkompletter Patientenaufzeichnungen und größtenteils unscharfen Panoramaschichtaufnahmen. Andere Autoren wiederum berichteten über ein erhöhtes Resorptionsrisiko unter weiblichen Patientinnen [Kjaer, 1995; Jiang et al., 2017]. Jiang et al. [2017] stellten diese Hypothese jedoch nach der Untersuchung von achtzehn Patienten auf, von denen elf weiblich waren. Die extrem kleine Stichprobengröße und die deutliche Mehrheit der weiblichen Probanden verringern die Aussagekraft der Ergebnisse. Darüber hinaus wurde in der Studie lediglich eine Retraktionstherapie der Eckzähne durchgeführt und die Aussage, dass weibliche Patienten anfälliger für kieferorthopädisch induzierte externe Wurzelresorptionen sind, wurde pauschalisiert auf andere kieferorthopädische Apparaturen und Behandlungstechniken übertragen. In Kjaers Studie [1995] war das Ungleichgewicht der untersuchten Patienten noch stärker ausgeprägt: 70 Mädchen wurden 37 Jungen gegenübergestellt. Im Gegensatz dazu konnten andere Autoren ein erhöhtes Auftreten von Wurzelresorptionen unter männlichen Patienten feststellen [Bayir & Gumus, 2021]. Allerdings wurden die männlichen Patienten dieser Studie deutlich länger kieferorthopädisch therapiert als die untersuchten weiblichen Patienten. Die identifizierten Wurzelresorptionen könnten ebenso aufgrund der inkongruenten Behandlungsdauer aufgetreten sein.

Demzufolge scheint die Annahme, dass das Geschlecht keinen Einflussfaktor auf das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen

Therapie darstellt, korrekt zu sein. Die Hypothese 4 dieser Arbeit wurde somit bestätigt.

6.2.2 Abhängigkeit vom Parameter Patientenalter zu Behandlungsbeginn

In der vorliegenden Studie konnte der Zusammenhang zwischen dem dentalen Patientenalter zum kieferorthopädischen Behandlungsbeginn und auftretenden Wurzelresorptionen bestätigt werden (Tab. 11). Es wurden Jugendliche untersucht, die während der Behandlung in der Abteilung für Kieferorthopädie in Marburg zwischen dem zehnten und dem achtzehnten Lebensjahr alt waren und deren durchschnittliches Alter zum kieferorthopädischen Behandlungsbeginn $12,8 \pm 2,2$ Jahre betrug (s. Kapitel 5.2.1). Dementsprechend lag bei den meisten Patienten zu Behandlungsbeginn ein spätes Wechselgebiss vor (Tab. 3). Dies entspricht dem Zeitpunkt der kieferorthopädischen Normalbehandlung. Erwachsene wurden von der Studie ausgeschlossen. Insofern ist keine Aussage darüber zu treffen, dass adulte Patienten vermehrt zu externen Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie neigen [Sameshima & Sinclair, 2001; Dindaroglu & Dogan, 2017]. Jedoch ist das dentale Alter des Patienten ein signifikanter Einflussfaktor auf Wurzelresorptionen während orthodontischer Zahnbewegungen. Dies deckt sich mit den Beobachtungen anderer Studien, welche ebenfalls das Patientenalter als einen möglichen Einflussfaktor von apikalen Wurzelresorptionen identifizierten [Sameshima & Sinclair, 2001; da Silva Filho et al., 2004; Mauès et al., 2015; Ge et al., 2021]. In einer Langzeitstudie untersuchten Ge et al. [2021] eine Gruppe von Jugendlichen und eine Gruppe von Erwachsenen, die gleichermaßen festsitzend therapiert (straight-wire-Technik) und mit Hawley-Retainern versorgt wurden. Durch die Patientenauswahl garantierte die Forschergruppe, dass alle Patienten mit den gleichen kieferorthopädischen Apparaturen therapiert wurden und schlossen so einen Einfluss der angewandten Apparatur auf Wurzelresorptionen aus. Zudem wurden alle Patienten in der gleichen Universitätsklinik therapiert, sodass die Autoren eine ähnliche Therapievorgehensweise annehmen konnten. Ein Jahr nach Abschluss der kieferorthopädischen Behandlung verglichen sie das apikale Wurzelresorptionsausmaß der Oberkieferinzisivi beider Gruppen und kamen zu dem Entschluss, dass das Alter

einen entscheidenden Einfluss auf das Wurzelvolumen nach orthodontischen Zahnbewegungen hat. Jugendliche mit einer Klasse II/1- Malokklusion hatten ein hohes Regenerationspotential für Resorptionen nach Abschluss der kieferorthopädischen Behandlung [Ge et al., 2021]. Wurzeln im Wachstum mit nicht abgeschlossener apikaler Konfiguration sind darüber hinaus als weitestgehend resorptionsresistent beschrieben [da Silva Filho et al., 2004; Mauès et al., 2015]. Im Gegensatz dazu konnten andere Untersuchungen das Alter nicht als Risikofaktor für Wurzelresorptionen ausmachen [Jung & Cho, 2011; Pastro et al., 2018]. Das Durchschnittsalter lag in diesen Studien mit 14,2 bzw. 14,6 Jahren [Pastro et al., 2018] bzw. 23,1 Jahren [Jung & Cho, 2011] jedoch deutlich höher. Ein Vergleich von juvenilen Zahnwurzeln mit nicht abgeschlossener apikaler Konfiguration und Zähnen mit geschlossenem Apex konnte dementsprechend nur unzulänglich erfolgen, da anzunehmen ist, dass bei einem höheren Durchschnittsalter weniger Zahnwurzeln im Wachstum als vollständig entwickelte Zahnwurzeln vorhanden sind. Folglich spielte das Patientenalter keine Rolle für auftretende Wurzelresorptionen.

6.2.3 Abhängigkeit vom Parameter kieferorthopädische Behandlungsdauer

In der vorliegenden Studie lag die durchschnittliche Behandlungsdauer bei $3,1 \pm 1,6$ Jahren (s. Kapitel 5.2.1). Die Behandlungsgesamtdauer der kieferorthopädischen Therapie stellt in der bi- sowie in der multivariaten Analyse einen signifikanten Einflussfaktor auf die Entstehung von Wurzelresorptionen dar (Tab. 11 & 12). Die 3. Hypothese dieser Arbeit konnte somit bestätigt werden. Dieses Ergebnis korreliert mit denen, die in der aktuellen Literatur beschrieben sind: je länger die kieferorthopädische Therapie dauert, desto höher ist das Risiko für das Auftreten von Wurzelresorptionen [Sameshima & Sinclair, 2001; Lopatiene & Dumbravaite, 2008; Motokawa et al., 2012; Carlier et al., 2019]. Die Studie von Sameshima und Sinclair [2001] konzentrierte sich auf die Behandlungsdauer in Verbindung mit kieferorthopädisch indizierten Extraktions-therapien bleibender Zähne. Die Untersuchungen der Resorptionsausmaße der oberen zentralen Schneidezähne wurden anhand von Fernröntgenseiten- aufnahmen durchgeführt. Wenngleich diese Forschungsgruppe die Wurzelre-

sorptionen nur einer Zahngruppe (zentrale Inzisivi) erfasste und dazu eine andersartige zweidimensionale Röntgenaufnahme wie in der vorliegenden Arbeit verwendete, so sind die Ergebnisse dennoch gleich. Eine verlängerte Behandlungsdauer, wie sie z. B. infolge von Extraktionstherapien auftreten kann, stellt ein potenzielles Risiko für Wurzelresorptionen dar [Sameshima & Sinclair, 2001].

Eine Verkürzung des Behandlungszeitraums, z. B. durch Anwendung niedrig gepulsten Ultraschalls, erwies sich weiterhin als vorteilhaft [Raza et al., 2016; Kaur & El-Bialy, 2020]. Je kürzer die kieferorthopädische Therapie der untersuchten Patienten in der vorliegenden Studie andauerte, desto weniger Wurzelresorptionen traten auf den Kontroll-Röntgenbildern auf (s. Kapitel 5.2.4). Die Mehrheit der Wurzelresorptionen trat dabei in den ersten Monaten der Behandlung auf. Dies befürwortet eine röntgenologische Kontrolle ca. sechs Monaten nach Behandlungsbeginn, um frühzeitig Wurzelresorptionen zu detektieren und dementsprechend die Behandlung anzupassen oder ggf. zu pausieren.

Mehrfache kieferorthopädische Behandlungen wiesen mit einem p-Wert von 0,046 einen knapp signifikanten Zusammenhang zu Wurzelresorptionen auf (Tab. 11). Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass weniger die Häufigkeit der kieferorthopädischen Therapie, als die gesamte Behandlungsdauer aller kieferorthopädischen Behandlungen und/oder die angewandten Behandlungsapparaturen und Behandlungstechniken einen resorptionsbegünstigenden Einfluss auf die Zahnwurzeln ausüben. Folglich ist eine frühe Behandlung und eine mit zeitlichem Abstand durchgeführte Hauptbehandlung eines Patienten nicht unbedingt risikoreicher für Resorptionsschäden der Zahnwurzeln. Weitere Forschungen dazu sind notwendig.

6.2.4 Abhängigkeit vom Parameter verwendete kieferorthopädische Apparaturen und kombinierte chirurgische Begleittherapien

In der vorliegenden Studie wurde gezeigt, dass das Auftreten von Wurzelresorptionen abhängig von der angewandten kieferorthopädischen Apparatur ist. Hier wurde zwischen herausnehmbar, festsitzend und kombinierter herausnehmbar-festsitzender Therapie unterschieden (Tab. 4). Ein Einfluss der kieferortho-

pädischen Apparaturen auf Wurzelresorptionen während der Therapie konnte in der bi- und multivariaten Analyse identifiziert und die 2. Hypothese damit bestätigt werden (Tab. 11 & 12). Die Anzahl der therapierten Patienten in den verschiedenen Kategorien war jedoch nicht ausgeglichen. Die Mehrheit wurde feststehend und herausnehmbar kombiniert therapiert, wohingegen rein herausnehmbar therapierte Patienten vergleichsweise selten vorkamen (Tab. 4). Die Ausprägung der Wurzelresorptionsgrade wurde in den Gruppen nicht näher betrachtet, sodass keine Aussage darüber zu treffen ist, ob rein feststehend therapierte Patienten schwerwiegendere Wurzelresorptionen aufwiesen als Patienten, die mit herausnehmbaren Apparaturen behandelt wurden. In der Literatur ist unter feststehender kieferorthopädischer Therapie ein vermehrtes Auftreten von Wurzelresorptionen beschrieben [Picanço et al., 2013; Jyotirmay et al., 2021]. Jedoch können unter Aligner-Therapien ebenso Resorptionen vorkommen [Gay et al., 2017; Toyokawa-Sperandio et al., 2021]. Das Ausmaß der Wurzelresorptionen ist demnach abhängig von der gewählten Behandlungsstrategie und Apparatur.

In dieser Arbeit wurden außerdem Patienten mit kombiniert chirurgischen Begleittherapien aufgenommen. Dabei wurde zwischen Extraktionstherapien bleibender Zähne und kieferchirurgisch begleitenden Umstellungsosteotomien unterschieden (Tab. 5). In der bivariaten Analyse konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen Extraktionen und Wurzelresorptionen im Therapieverlauf identifiziert werden (Tab. 11). Dieses Ergebnis korreliert mit den Untersuchungen von Motokawa et al. [2012], die in ihrer Studie 113 Extraktionspatienten und 56 kieferchirurgisch-operierte Patienten mit 187 nicht-chirurgisch therapierten Patienten verglichen. Trotz einer ungleichmäßigen Patientenverteilung, konnten sie neben einer lange kieferorthopädische Behandlungsdauer begleitende Extraktionstherapien als zusätzliche Risikofaktoren für Resorptionen belegen [Motokawa et al., 2012]. In dieser Arbeit wurde ebenso kein Zusammenhang zwischen kombiniert kieferchirurgisch-kieferorthopädischen Therapien und vermehrten Wurzelresorptionen nachgewiesen (Tab. 11). Die Patientengruppe der kieferchirurgisch-kieferorthopädisch Therapierten fiel jedoch mit 1,9 % relativ gering aus (Tab. 5). Diese kleine Stichprobe mindert die Aussagekraft des Ergebnisses.

Grundsätzlich können kieferorthopädisch begleitende Extraktionstherapien bleibender Zähne prädestinierend für auftretenden Wurzelresorptionen während orthodontischer Zahnbewegungen sein. Sie sollten daher umsichtig und nur in ausgewählten Fällen durchgeführt werden. Der Einfluss kieferchirurgischer Umstellungsosteotomien auf Wurzelresorptionen sollte weiter untersucht werden, da nicht zuletzt aufgrund der ggf. verlängerten Behandlungsdauer ein erhöhtes Wurzelresorptionsrisiko nicht gänzlich auszuschließen ist.

6.2.5 Abhängigkeit vom Parameter Allgemeinerkrankungen und traumatisch geschädigten Zähnen

In der vorliegenden Studie hatten 25,5 % der Patienten anamnestisch eine Allgemeinerkrankung angegeben. Der Großteil von ihnen war allergisch prädisponiert (Tab. 5). Patienten mit Allergien und Asthma ebenso wie Patienten mit vegetativen Erkrankungen oder Syndromen wiesen kein erhöhtes Wurzelresorptionsrisiko auf (Tab. 11). Allerdings betrug die Anzahl der erkrankten Patienten deutlich weniger als die der Gesunden, welches eine limitierte Aussagekraft der Ergebnisse bedingt. Dies könnte ebenfalls ursächlich dafür sein, dass das Ergebnis dieser Arbeit von denen anderer Autoren abweicht. Diese konnten ein erhöhtes Risiko von Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie unter allergisch prädisponierte Patienten und Asthmatikern ausmachen [McNab et al., 1999; Owman-Moll & Kurol, 2000; Nishioka et al., 2006; Murata et al., 2013]. Wissenschaftliche Studien mit geringer Sicherheit gehen wiederum davon aus, dass Personen mit Asthma oder Allergien keine gesonderte Veranlagung für kieferorthopädisch induzierte Wurzelresorptionen haben als Gesunde [dos Santos et al., 2021]. Gleichmaßen konnte kein erhöhtes Wurzelresorptionsrisiko für traumatisch geschädigte Zähne bestätigt werden (Tab. 11). Für die Aufnahme dieser Daten musste abermals auf die korrekte anamnestische Aussage der Patienten bzw. derer Erziehungsberichterigen vertraut werden. Teilweise traten Zahntraumata erst im Verlauf der Therapie auf. Diese wurden dann jedoch nicht erfasst, da die Untersucherin z. B. bei neu auftretenden Füllungen der Frontzähne nur Mutmaßungen über die Gründe dafür anstellen konnte. Die Zähne, welche anamnestisch eindeutig traumatisch geschädigt wurden und evtl. abgerundete Apizes aufwiesen, wurden

bereits zu Beginn der kieferorthopädischen Behandlung einem Wurzelresorptionsgrad eins zugeordnet. Bei eindeutigem Voranschreiten der Wurzelresorption wurde die Gradeinstufung dementsprechend geändert bzw. bei keinerlei weiteren Resorptionsausdehnung beibehalten. Dadurch konnten sichergestellt werden, dass Wurzelresorptionen die bereits vor Beginn der kieferorthopädischen Therapie bestanden, nicht missinterpretiert und erst im Verlauf als neu hinzugekommene Wurzelresorptionen aufgenommen wurden. In der Literatur stellen traumatisch geschädigte Zähne und/oder Zähne mit Wurzelresorptionen vor kieferorthopädischen Behandlungsbeginn potenzielle Risikofaktoren für weitere Resorptionen unter orthodontischen Zahnbewegungen dar [Brezniak & Wasserstein, 1993; Picanço et al., 2013]. Wurzelgefüllte Zähne sind wiederum weniger anfällig für Wurzelresorptionen als vitale Zähne [Lee & Lee, 2016; Kolcuoglu & Zeynep Oz, 2020]. Demzufolge kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass traumatisch geschädigte Zähne immer anfälliger für Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie sind. Im Falle einer Wurzelkanalbehandlung, z. B. infolge einer Kronenfraktur mit Pulpabeteiligung, müssten diese Zähne weniger anfällig für Resorptionen sein als vitale Zähne. Eine Prädisposition traumatisch geschädigter Zähne für Wurzelresorptionen sollte nicht vollständig ausgeschlossen werden, wenngleich dies in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden konnte. Das Ausmaß des Traumas und die anschließende Therapie der Zähne scheint dabei nicht unerheblich zu sein. Es bedarf weiterer Untersuchungen um den Zusammenhang zwischen dentalen Traumata und Wurzelresorptionen zu evaluieren.

6.2.6 Abhängigkeit vom Parameter Dysfunktionen und Dyskinesien

Mit 66,2 % war die Mehrheit der retrospektiv untersuchten Patienten dieser Studie von oralen Fehlfunktionen betroffen (Tab. 5). Eine Prädisposition dieser Patienten für Wurzelresorptionen konnte nicht nachgewiesen werden (Tab. 11). Dies korreliert mit den Ergebnissen anderer Studien [Owman-Moll & Kuroi, 2000; Pastro et al., 2018; Bartzela et al., 2020]. Jedoch ist der Einfluss von oralen Fehlfunktionen auf kieferorthopädisch induzierte Wurzelresorptionen in der Literatur kontrovers beschrieben. Es wird mehrfach angenommen, dass gewisse Angewohnheiten, wie z. B. Nägelkauen, ein pathologischer Zungendruck oder

Rauchen, Wurzelresorptionen begünstigen können und das Risiko für das Auftreten dieser während einer kieferorthopädischen Therapie erhöhen [Brezniak & Wasserstein, 1993; Hartsfield et al., 2004; Ullrich et al., 2021]. Da in der vorliegenden Arbeit die Dysfunktionen und Dyskinesien der Patienten nicht näher notiert und zusammengefasst betrachtet wurden ist keine Aussage darüber zu treffen, ob bestimmte orale Fehlfunktion im Einzelnen prädisponierend für Wurzelresorptionen sein können. Ferner musste z. T. auf die korrekten anamnestischen Angaben der Patienten bzw. derer Erziehungsberechtigten vertraut werden, z. B. bei der Angabe eines bestehenden Daumenlutschens. Dahingegen konnte der Behandler einen bestehenden Sigmatismus oder ein viszerales Schluckmuster in der Erstvorstellung der Patienten selber diagnostizieren und in der Patientenakte vermerken. Ungeachtet dessen, dass der Einfluss von Dysfunktionen und Dyskinesien mit dieser Studie nicht bestätigt werden konnte, bedarf es nähere Untersuchungen einzelner oraler Fehlfunktionen um die Aussage zu konkretisieren. In keinem Fall darf daher das Ergebnis pauschalisiert und angenommen werden, dass Dysfunktionen und Dyskinesien keinerlei Einfluss auf Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie haben. Nicht ohne Grund werden dysfunktional aktive Patienten von einigen Studien zu Wurzelresorptionen bewusst im Vorfeld ausgeschlossen [Marques et al., 2010; Bayir & Gumus, 2021]. Es ist scheint möglich, dass bestimmte parafunktionelle Bewegungsmuster durch Druck und Jiggling-Belastung auf die Zahnwurzeln, Wurzelresorptionen begünstigen können. Ein bspw. parafunktioneller Zungendruck, der zu einem offenen Biss führt, welcher dann mit größeren bzw. langandauernden kieferorthopädischen Kräften korrigiert werden muss, kann rückschließend ebenfalls Zahnwurzelresorptionen begünstigen [Brezniak & Wasserstein, 1993; Motokawa et al., 2013]. Parafunktionen sollten daher generell vor Behandlungsbeginn abgestellt werden [Brezniak & Wasserstein, 1993].

6.2.7 Abhängigkeit vom Parameter Kjaer-Merkmale

Bei 97,8 % Patienten konnte zum kieferorthopädischen Behandlungsbeginn mindestens ein Kjaer-Merkmal identifiziert werden, dabei verzeichnete der überwiegende Anteil zwei Kjaer-Merkmale pro Person (Abb. 26). Durch die

Diversität der Kjaer-Merkmale konnten daher kaum Patienten ohne Merkmale ausgemacht werden (Abb. 33). Diese Verteilung macht das aktuelle Problem sichtbar: eine Risikoeinschätzung ausschließlich anhand von der Beurteilung der Kjaer-Merkmale kann nicht hinreichend erfolgen, da die Kjaer-Merkmale zu breit gefächert sind. Für den Großteil der Kjaer-Merkmale konnte weiterhin keine Korrelation zu auftretenden Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie bestätigt werden (Tab. 11 & 12). In der bivariaten Analyse präsentierten sich von den untersuchten Kjaer-Merkmalen ausschließlich „kurze Zahnwurzeln“, „Aplasien“ und „atypische Wurzelresorptionen der ersten Dentition“ als relevant für die Entstehung von externen apikalen Wurzelresorptionen im Verlauf der kieferorthopädischen Therapie (Tab. 11). In der multivariaten Analyse konnte neben den Kjaer-Merkmalen „kurze Zahnwurzeln“ und „Aplasien“ für das Merkmal „schmale Zahnwurzeln“ ein signifikanter Zusammenhang zu Wurzelresorptionen bestätigt werden (Tab. 12). Die anatomische Wurzelform wird in der Literatur immer wieder als ausschlaggebend für die Resorptionsanfälligkeit eines Zahnes beschrieben [Levander & Malmgren, 1988; Smale et al., 2005; Nigul & Jagomagi, 2006; Abuabara, 2007; Marques et al., 2010; Kamble et al., 2012; Valladares Neto et al., 2013]. Dabei ist v. a. die Konfiguration der Zahnapizes ausschlaggebend. Diese wurde u. a. in der Studie von Nigul und Jagomagi [2006] näher eingeteilt in kurze, abgerundete, pipettenförmige Wurzelspitzen und Wurzeln mit apikaler Wurzelkrümmung. Pipettenförmige oder abgerundete Zahnwurzeln [Levander & Malmgren, 1988; Thongudomporn & Freer, 1998; Sameshima & Sinclair, 2001; Lopatiene & Dumbravaite, 2008; Kamble et al., 2012] und/oder triangulär geformte Apizes [Marques et al., 2010] sind besonders resorptionsanfällig während orthodontischen Zahnbewegungen. In der vorliegenden Arbeit wurde die anatomische Apexkonfiguration nicht näher betrachtet. Es konnte jedoch eine erhöhte Resorptionsanfälligkeit für schmale Zahnwurzeln, die häufig pipettenförmig zusammenlaufen, registriert werden (Tab. 12). Zahnwurzelkrümmungen kamen unter den Patienten relativ häufig vor (Abb. 27). Es konnten Resorptionen dieser, insbesondere der lateralen Oberkieferinzisivi, durch die Untersucherin befundet werden. Das Kjaer-Merkmal „Zahnwurzelkrümmungen“ korrelierte in dieser Arbeit jedoch nicht mit verstärkten Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie. Die Einstufung, ab wann ein Apex

gekrümmt einzustufen ist oder ob es sich lediglich um eine leicht gebogene Zahnwurzel handelt, unterlag der subjektiven Einschätzung und Befundung der Untersucherin. In der Literatur werden Wurzelabknickungen/-krümmungen hingegen häufig als resorptionsanfällig beschrieben [Kamble et al., 2012; Motokawa et al., 2013]. Eine Häufung von Resorptionen an den lateralen Inzisivi konnte ebenfalls bestätigt werden [Chen & Liu, 2020]. Eine Prädisposition für Resorptionen abgeknickter Zahnwurzeln ist demnach nicht gänzlich auszuschließen, wenngleich die vorliegende Studie zu einem konträren Ergebnis gekommen ist.

In dieser Studie ist zudem ein Risiko für Wurzelresorptionen kurzer Zahnwurzeln bestätigt worden (Tab. 12). Dies korreliert mit den Ergebnissen anderer Studien [Valladares Neto et al., 2013; Wang & Feng, 2017]. Die genetisch bedingte Anomalie kurzer Zahnwurzeln (engl. „short root anomaly“, SRA) stellt nachweislich ein hohes Risiko für Zahnwurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie dar [Wang & Feng, 2017]. Dementsprechend sollten bei Vorliegen einer SRA orthodontische Zahnbewegungen noch behutsamer und unter regelmäßigen radiologischen sowie klinischen Kontrollen der Zähne durchgeführt werden.

Kjaer [1995] stellte u. a. eine Resorptionsanfälligkeit erster UK-Molaren mit kurzer distaler Wurzel fest. Dies konnte in dieser Arbeit nicht bestätigt werden (Tab. 11). Jedoch scheinen v. a. die distalen Wurzeln, der kieferorthopädischen Kraft abgewandten Seite, resorptionsanfälliger zu sein als die mesialen Wurzeln der ersten UK-Molaren [Kanas & Kanas, 2012; Iglesias-Linares et al., 2016] (Abb. 35). Die Zahnwurzelanatomie spielt somit eine entscheidende Rolle für die Disposition für Wurzelresorptionen unter orthodontischen Zahnbewegungen und sollte vor Therapiebeginn röntgenologisch erfasst werden. Bei Vorhandensein von schmalen, dünnen und kurzen Zahnwurzeln besteht ein erhöhtes Wurzelresorptionsrisiko während einer kieferorthopädischen Therapie. Dadurch kann eine erste Risikoeinschätzung anhand von Röntgenbildern erfolgen.

Betrachtet man die Zahnkronenmorphologie, so führten schmale Zahnkronen nicht zu vermehrten Wurzelresorptionen unter den Patienten (Tab. 11). Dieses Kjaer-Merkmal ist jedoch anhand von Panoramaschichtaufnahmen nicht immer eindeutig zu beurteilen, da es aufgrund inkorrekt, asymmetrischer Patientenpositionierung im Röntgengerät zu nicht maßstabsgetreuer Abbildung der

belichteten Strukturen oder Röntgenartefakten kommen kann. Außerdem scheint eine erhöhte Resorptionsanfälligkeit der Wurzeln aufgrund der Kronenform unwahrscheinlich, da die Entwicklung der Zahnkronen und -wurzeln über verschiedene Kontrollmechanismen erfolgt [Wang & Feng, 2017]. So spielt u. a. der Transkriptionsfaktor Nfic (nuclear factor I C) in dem Signalweg für die Wurzelformation eine entscheidende Rolle, jedoch nicht in dem der Zahnkronenformation [Wang & Feng, 2017]. Weiterhin konnten abnorme Zahnformen, wie taurodonte oder mikrodonte Zähne, nicht im Zusammenhang mit vermehrt auftretenden Wurzelresorptionen gebracht werden (Tab. 11).

Ein Lipping an einer Fläche des Kiefergelenks kam bei nahezu allen Patienten vor und korrelierte ebenfalls nicht mit einem verstärkten Auftreten von Wurzelresorptionen (Tab. 11). Aufgrund des Charakteristikums „Lipping“ besaßen lediglich 25 von 1156 Patienten dieser Studie kein Kjaer-Merkmal. Dieses Kjaer-Merkmal ist zu unspezifisch für eine Risikoeinschätzung. Zumindest bei einer dezenten Abflachung des Kiefergelenks sollte daher von einer anatomischen Normvariante des Kondylus ausgegangen werden, die keinerlei Einfluss auf apikale Resorptionen hat.

Dahingegen stellten sich atypische Wurzelresorptionen der ersten Dentition, ebenso wie Aplasien in der bivariaten Analyse, als signifikante Einflussfaktoren für Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie dar (Tab. 11). In der aktuellen Literatur gibt es kaum Studien über diese Zusammenhänge. Van Parys et al. [2012] stellten in ihren Untersuchungen fest, dass Aplasien nicht relevant für Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie sind. Sie kamen jedoch auch zu dem Entschluss, dass pipettenförmige Apizes ebenso wenig resorptionsanfällig seien [van Parys et al., 2012]. Dies widerspricht jedoch dem Großteil der Ergebnissen anderer Studien [Levander & Malmgren, 1988; Thongudomporn & Freer, 1998; Sameshima & Sinclair, 2001; Lopatiene & Dumbravaite, 2008; Kamble et al., 2012]. Zudem wurde eine relativ kleine Patientengruppe von 88 Probanden untersucht, was wiederum ebenfalls eine limitierte Aussagekraft der Studie bedingt. Ihre Ergebnisse sollten daher kritisch betrachtet werden.

Anhand der vorliegenden Daten lässt sich schlussfolgern, dass die von Kjaer [1995] aufgestellten morphologischen Charakteristika in Zusammenhang mit auftretenden Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen

Behandlung weitestgehend irrelevant und für eine vorherige Risikoeinschätzung ungeeignet sind. Kjaers Ergebnisse basieren auf einer Studie, in der keine standardisierten Röntgenbilder ausgewertet wurden. Es wurden vielfach Panoramaschichtaufnahmen und Zahnfilme ausgewertet, z. T. lagen aber nur Zahnfilme und Bissflügel eines Patienten vor. Außerdem wurde lediglich bei der Hälfte der Patienten Röntgenbilder des gesamten Behandlungszeitraums erfasst. Kjaers Theorien eines Zusammenhangs der ersten und zweiten Dentition stützen sich auf die Auswertung von einer geringen Anzahl von Röntgenbildern des Milchzahngabisses. Insgesamt wertet Kjaer die Röntgenbilder von 107 Patienten aus, die von 35 verschiedenen Kieferorthopäden aus 28 dänischen Kommunen angefertigt und Kjaer zugeschickt wurden. Als Voraussetzung musste mindestens eine oder mehrere Wurzel/n zu einem Drittel resorbiert sein. Röntgenbilder in der kieferorthopädischen Retentionsphase wurden von der Studie ausgeschlossen und der Fokus bei der Auswahl der Röntgenbilder lag auf der kieferorthopädischen Erstdiagnostik. Wurzelresorptionen, die erst später im Verlauf der Behandlung oder in der Retentionsphase auftraten, konnten demnach nicht auffindig gemacht werden. Außerdem gab es in Kjaers Studie keine Kontrollgruppe ohne Wurzelresorptionen oder morphologischen Charakteristika und es gab keinen Vergleich zu anderen Untersuchern der Röntgenbilder. Obwohl Kjaer die Röntgenbilder drei Mal selbst analysierte und verglich, unterlagen die Ergebnisse dennoch ihren subjektiven Einschätzungen. Neben der vergleichsweisen kleinen Stichprobe von knapp über 100 Patienten war die Geschlechterverteilung der Patienten ebenfalls unausgeglichen (70 weibliche und 37 männliche Patienten). Dies limitiert die Aussagekraft, dass weibliche Patienten häufiger von externen Wurzelresorptionen während der kieferorthopädischen Therapie betroffen sind [Kjaer, 1995]. Darüber hinaus legte Inger Kjaer resorptionsprädestinierende morphologische Charakteristika anhand von zweidimensionalen Röntgenbildern fest, welche auf diesen nur schwer oder z. T. gar nicht zu erkennen sind (z. B. Foramen caecum, offener Biss, asymmetrischer aufsteigender Unterkieferast etc.). Dementsprechend wurden die Kjaer-Merkmale Foramen caecum, ein offener Biss und ein asymmetrischer Ramus mandibulae in der vorliegenden Arbeit nicht erfasst.

6.2.8 Gesamtanzahl der Wurzelresorptionen

Zum Behandlungsabschluss kamen milde Wurzelresorptionen ersten Grades (Blunting) an einzelnen Zähnen häufig vor (Tab. 8). Außerdem traten apikale Wurzelresorptionen mit steigender kieferorthopädischer Behandlungsdauer vermehrt auf (Tab. 7). Diese Ergebnisse stimmen mit denen von anderen Forschern überein: das Auftreten milder Wurzelresorptionen unter kieferorthopädisch therapierten Patienten ist keine Seltenheit [Jatania et al., 2012; Linkous et al., 2020]. Lokalisierte Zahnwurzelresorptionen an ein bis drei Zähnen kommen häufig vor [Kanas & Kanas, 2012]. Die kieferorthopädische Behandlungsdauer sollte daher generell nicht zu lange andauern um das Risiko für Wurzelresorptionen gering zu halten [Sameshima & Sinclair, 2001; Roscoe et al., 2015; Xiao et al., 2020; Bayir & Gumus, 2021]. Eine bestimmte maximale Behandlungsdauer kann jedoch nicht pauschal festgelegt und sollte patientenindividuell immer vor Behandlungsbeginn bestimmt werden.

Wurzelresorptionen schweren Ausprägungsgrades kamen vergleichsweise seltener an einzelnen Zähnen vor (Tab. 7 & 8). In der Studie um Mauès et al. [2015] wurden schwerwiegende Wurzelresorptionen ebenso selten unter kieferorthopädisch therapierten Patienten beobachtet. Schwere Wurzelresorptionsgrade sind die Ausnahme. Dennoch sollte eine Röntgenkontrolle auf anfängliche Wurzelresorptionen, sechs bis neun Monaten nach dem Einsetzen der kieferorthopädischen Apparatur und am Ende der Therapie, erfolgen [Consolaro, 2019]. Dieses Vorgehen wird an der Zahnklinik der Philipps-Universität Marburg umgesetzt. Die entsprechenden Röntgenaufnahmen wurden in Form von Panoramaschichtaufnahmen in dieser Studie ausgewertet.

Für den Großteil der Kjaer-Merkmale konnte kein statistisch signifikanter Effekt für das Auftreten von Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie festgestellt werden. Externe Wurzelresorptionen traten in der Gruppe der Patienten ohne und mit Kjaer-Merkmalen auf (Abb. 33). Die Gruppenverteilung war jedoch aufgrund der Vielfältigkeit der Kjaer-Merkmale sehr unausgeglich zugunsten der Merkmalsträger. Im Ergebnis konnte ein erhöhtes Wurzelresorptionsrisiko an schmalen und kurzen Zahnwurzeln, sowie unter Patienten mit Aplasien ermittelt und die Hypothese 1 dieser Studie nur zum Teil bestätigt werden (Tab. 12).

6.3 Schlussfolgerung und klinische Relevanz

Für die Entstehung von Wurzelresorptionen während orthodontischen Zahnbewegungen konnten verschiedene Prädilektionsfaktoren identifiziert werden, welche z. T. durch den Behandler beeinflusst werden können. So sollte die Behandlung idealerweise im Wechselgebiss bei noch nicht abgeschlossenen Wurzelwachstum beginnen, da Wurzeln im Wachstum nachweislich seltener resorbiert werden als vollständig ausgebildete Apizes [da Silva Filho et al., 2004; Mauès et al., 2015; Ge et al., 2021]. Die Behandlungsdauer sollte möglichst kurz und mit der entsprechenden kieferorthopädischen Apparatur in einem adäquaten Zeitumfang durchgeführt werden [Roscoe et al., 2015; Carlier et al., 2019]. Es empfiehlt sich eine radiologische Zwischenkontrolle ca. sechs Monate nach Behandlungsbeginn durchzuführen um beginnende Wurzelresorptionen frühzeitig zu detektieren, obwohl ein Blunting einzelner Zähne recht häufig auftreten kann [Bayir & Gumus, 2021; Sameshima & Iglesias-Linares, 2021]. Weiterhin können Extraktionstherapien bleibender Zähne zu Wurzelresorptionen führen, da höhere Kräfte zum Lückenschluss auf die Zahnwurzeln wirken [Marques et al., 2010]. Patienten mit kurzen und schmalen Zahnwurzeln sollten zudem vor der kieferorthopädischen Behandlung über das Risiko potenzieller Wurzelresorptionen aufgeklärt werden. Dies gilt ebenso für Patienten mit atypischen Milchzahnresorptionen und/oder Aplasien. Orale Fehlfunktionen sollten vor Behandlungsbeginn abgestellt werden. Eine Korrelation von Dysfunktionen und Dyskinesien mit Wurzelresorptionen konnte in der vorliegenden Arbeit zwar nicht bestätigt werden, ein negativer Einfluss aufgrund von Fehlbelastungen ist jedoch nicht gänzlich auszuschließen. Zudem ist ein muskuläres Gleichgewicht, welches unter oralen Fehlfunktionen nicht generiert werden kann, entscheidend für einen langfristigen Behandlungserfolg [D'Onofrio, 2019].

Aktuell gibt es keine vergleichbare Studie in der die Kjaer-Merkmale in Zusammenhang mit Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Therapie überprüft wurden. Die röntgenologische Beurteilung dentaler Charakteristika eignet sich jedoch nicht ausschließlich für eine suffiziente prätherapeutische Risikoeinschätzung. Externe apikale Wurzelresorptionen entstehen aufgrund multifaktorieller Faktoren und Resorptionsmechanismen scheinen übergeordneten zellulären Geschehen und genetischen

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

Prädispositionen zugrunde zu liegen. Ein simples prätherapeutisches Diagnostiktool ist für den klinischen Alltag noch nicht gegeben und weitere Untersuchungen zur Früherkennung von Wurzelresorptionen sind notwendig.

7 Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung Deutsch

Problemstellung: Externe Wurzelresorptionen können im Verlauf einer kieferorthopädischen Therapie an einzelnen oder mehreren Zähnen auftreten. Das Wurzelresorptionsrisiko ist individuell sehr verschieden und eine approximative Risikoeinschätzung vor Behandlungsbeginn erfolgt unter anderem durch röntgenologisch darstellbare dentale, resorptionsspezifische Merkmale.

Ziel der Arbeit: Ziel dieser retrospektiven Untersuchung war es, die von Inger Kjaer [1995] aufgestellten dentalen Charakteristika (Kjaer-Merkmale), die mit einem erhöhten Auftreten für externe Wurzelresorptionen während einer kieferorthopädischen Behandlung in Verbindung gebracht worden sind, auf ihre Relevanz zu prüfen. Darüber hinaus wurden patientenspezifische Eigenschaften, wie das Alter, Allgemeinerkrankungen, orale Fehlfunktionen, Zahntraumata und kieferorthopädische Behandlungsfaktoren, die in einem Kontext mit Wurzelresorptionen beschrieben worden sind, erhoben. Auf diese Weise sollte eine adäquate Risikoeinschätzung der Patienten für Wurzelresorptionen vor einer kieferorthopädischen Therapie erfolgen.

Material und Methode: Die Behandlungsunterlagen und die Panoramaschichtaufnahmen von 1156 Patienten wurden retrospektiv ausgewertet. Die Patienten waren zwischen zehn und achtzehn Jahre alt und wurden im Zeitraum von 2000 bis 2019 in der Abteilung für Kieferorthopädie im Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Philipps-Universität Marburg behandelt. Die Daten wurden anonymisiert erfasst und die Röntgenbilder auf vorliegende Kjaer-Merkmale und externe apikale Wurzelresorptionen untersucht. Die Ausprägung der Wurzelresorptionen wurde dabei in drei verschiedenen Schweregraden zahnbezogen dokumentiert. Anschließend erfolgten bivariate und multivariate Analysen, als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 0,05$ definiert.

Ergebnisse: Die Mehrheit der aufgenommenen Patienten wies mindestens ein Kjaer-Merkmal auf, lediglich 2,2 % der Patienten besaßen keines der untersuchten morphologischen Charakteristika. Im Verlauf der kieferorthopädischen Therapie traten bei den Patienten mit und ohne Kjaer-Merkmalen milde

Wurzelresorptionen einzelner Zähne auf (72,9 %). Im Schnitt waren $3,22 \pm 3,24$ Zähne von einem Blunting betroffen. Bei 15,5 % der Patienten lag ein Wurzelresorptionsgrad zwei vor. Schwere Wurzelresorptionen traten mit 2 % vergleichsweise selten auf. In der multivariaten Analyse konnte eine Korrelation von Wurzelresorptionen mit dem Vorhandensein der Kjaer-Merkmale kurze Zahnwurzeln ($p < 0,001$), schmale Zahnwurzeln ($p = 0,006$) und Aplasie ($p < 0,001$) bestätigt werden. Weiterhin hatten die untersuchten Parameter Dentitionsphase zum Behandlungsende ($p < 0,001$), die verwendete kieferorthopädische Apparatur (herausnehmbar: $p < 0,001$; kombiniert herausnehmbar und festsitzend: $p = 0,008$) und die kieferorthopädische Behandlungsdauer ($p < 0,001$) einen statistisch signifikanten Effekt für das Auftreten von externen Wurzelresorptionen. Dahingegen konnte kein Zusammenhang zu Wurzelresorptionen und Extraktionstherapien ($p = 0,154$) eruiert werden, ebenso war das Kjaer-Merkmal atypische Milchzahnresorptionen ($p = 0,087$) irrelevant für die Entstehung von Resorptionen.

Schlussfolgerung: Basierend auf den Daten der vorliegenden Studie ist die Pathogenese von externen apikalen Wurzelresorptionen komplex und eine alleinige Risikoeinschätzung anhand von Röntgenbildern nur sehr begrenzt bis gar nicht möglich. In der Erstdiagnostik sollten anhand von Panoramaschichtaufnahmen u. a. schmale und kurze Zahnwurzeln detektiert werden und die Patienten über etwaige Wurzelresorptionen dieser Zähne aufgeklärt werden. Betroffene Zähne sollten möglichst schonend orthodontisch bewegt und in regelmäßigen Abständen klinisch und röntgenologisch auf Resorptionen untersucht werden. Die kieferorthopädisch kontrollierbaren Faktoren wie die verwendeten Apparaturen und die Behandlungsdauer sollten generell so angewandt werden, dass ein Risiko des Zahnhartsubstanzverlusts möglichst vermieden wird und allenfalls gering ausfällt. Es bedarf weiterer Untersuchungen anderer Einflussfaktoren, wie genetischer Prädispositionen und die Zusammensetzung des gingivalen Sulkusfluid, um ein individuelles Risiko für Wurzelresorptionen während orthodontischen Zahnbewegungen prognostizieren zu können.

7.2 Zusammenfassung Englisch (summary)

Objektive: External root resorption can occur in the course of orthodontic therapy on single or multiple teeth. The risk of root resorption varies greatly from individual to individual, and approximate risk assessment prior to the start of treatment is based, among other things, on radiographically depictable dental, resorption-specific features.

Aim of the study: The aim of this retrospective study was to assess the relevance of the dental characteristics (Kjaer characteristics) established by Inger Kjaer [1995], which have been associated with an increased incidence of external root resorption during orthodontic treatment. In addition, patient-specific characteristics, such as age, general disease, oral dysfunction, dental trauma, and orthodontic treatment factors that have been described in a context of root resorptions were collected. In this way, an adequate risk assessment of patients for root resorptions before orthodontic therapy should be performed.

Material and methods: The treatment records and panoramic radiographs of 1156 patients were retrospectively analyzed. Patients were between ten and eighteen years of age and were treated in the Department of Orthodontics at the Center for Dental, Oral and Maxillofacial Medicine, Philipps University Marburg, Germany, from 2000 to 2019. Data were collected anonymously and radiographs were examined for present Kjaer features and external apical root resorption. The severity of the root resorptions was documented in three different degrees of tooth-related severity. Bivariate and multivariate analyses were then performed, with $\alpha = 0.05$ defined as the significance level.

Results: The majority of the patients included had at least one Kjaer feature, and only 2.2 % of the patients did not have any of the morphological characteristics investigated. During the course of orthodontic therapy, mild root resorption of individual teeth occurred in patients with and without Kjaer features (72.9 %). On average 3.22 ± 3.24 teeth were affected by blunting. Root resorption grade two was present in 15.5 % of patients. Severe root resorptions were comparatively rare at 2 %. Multivariate analysis confirmed a correlation of root resorptions with the presence of the Kjaer characteristics short tooth roots ($p < 0.001$), narrow

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

tooth roots ($p = 0.006$), and aplasia ($p < 0.001$). Furthermore, the studied parameters dentition phase at the end of treatment ($p < 0.001$), orthodontic appliance used (removable: $p < 0.001$; combined removable and fixed: $p = 0.008$), and orthodontic treatment duration ($p < 0.001$) had a statistically significant effect for the occurrence of external root resorption. In contrast, no correlation could be found between root resorptions and extraction therapies ($p = 0.154$), and the Kjaer trait atypical deciduous tooth resorptions ($p = 0.087$) was irrelevant for the occurrence of resorptions.

Conclusion: Based on the data of the present study, the pathogenesis of external apical root resorption is complex and a simple risk assessment based on radiographs alone is very limited or even impossible. In the initial diagnosis, panoramic radiographs should be used to detect narrow and short tooth roots, among other things, and patients should be informed about any root resorption of these teeth. Affected teeth should be moved orthodontically as gently as possible and examined clinically and radiographically for resorptions at regular intervals. Orthodontically controllable factors, such as the appliances used and the duration of treatment, should generally be applied in such a way that the risk of tooth structure loss is avoided as far as possible and is at best minimal. Further investigation of other influencing factors, such as genetic predispositions and composition of the gingival sulcus fluid, is needed to predict an individual risk of root resorption during orthodontic tooth movement.

8 Literaturverzeichnis

- Abuabara, A. (2007). Biomechanical aspects of external root resorption in orthodontic therapy. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, *12*, E610-E613.
- Ageel, B., Siraj, E., Zawawi, K., & Afify, A. (2021). The Prevalence of Root Resorption after Orthodontic Treatment in Patients Attending a University Hospital Dental Clinic. *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, *13*, 965–968.
- Ahuja, P. D., Mhaske, S. P., Mishra, G., Bhardwaj, A., Dwivedi, R., & Mangalekar, S. B. (2017). Assessment of Root Resorption and Root Shape by Periapical and Panoramic Radiographs: A Comparative Study. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, *18*, 479–483.
- Aidos, H., Diogo, P., & Santos, J. M. (2018). Root Resorption Classifications: A Narrative Review and a Clinical Aid Proposal for Routine Assessment. *European Endodontic Journal*, *3*, 134–145.
- Al-Qawasmi, R. A., Hartsfield, J. K., Everett, E. T., Flury, L., Liu, L., Foroud, T. M., Macri, J. V., Roberts, W. E. (2003). Genetic predisposition to external apical root resorption. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *123*, 242–252.
- Amaro, E. R. S., Ortiz, F. R., Dorneles, L. S., Santos, M. de S., Barrioni, B. R., Miranda, R. M., Garlet, G. P., Teixeira, M. M., Szawka, R. E., Silva, T. A., Macari, S. (2020). Estrogen protects dental roots from orthodontic-induced inflammatory resorption. *Archives of Oral Biology*, *117*.
<https://doi.org/10.1016/J.ARCHORALBIO.2020.104820>,
Internetzugriff am: 18.10.2022
- Atsawasuwan, P., Lazari, P., Chen, Y., Zhou, X., Viana, G., & Evans, C. A. (2018). Secretory microRNA-29 expression in gingival crevicular fluid during orthodontic tooth movement. *PloS One*, *13*, 1–11.
<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0194238>,
Internetzugriff am: 18.10.2022
- Bartzela, T. N., Mang de la Rosa, M. R., Wolf, K., Schmidt, A., & Opitz, C. (2020). Apical root resorption after orthodontic treatment in patients with unilateral cleft lip and palate. *Clinical Oral Investigations*, *24*, 1807–1819.

- Bates, S., Jones, K., & Bluck, L. (1856). Absorption. *British Journal of Dental Science*, 1, 256.
- Baumrind, S., Korn, E. L., & Boyd, R. L. (1996). Apical root resorption in orthodontically treated adults. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 110, 311–320.
- Bayir, F., & Gumus, E. B. (2021). External apical root resorption after orthodontic treatment: Incidence, severity and risk factors. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 15, 100–105.
- Becks, H. (1936). Root resorptions and their relation to pathologic bone formation: Part I: Statistical data and roentgenographic aspect. *International Journal of Orthodontia and Oral Surgery*, 22, 445–482.
- Bendoraitiene, E., Zemgulyte, S., & Borisovaite, M. (2017). Reasonable Outcome of Avulsed Permanent Upper Incisor after Seven Years Follow-Up Period: a Case Report. *Journal of Oral & Maxillofacial Research*, 8. <https://doi.org/10.5037/JOMR.2017.8406>,
Internetzugriff am: 18.10.2022
- Bletsa, A., Berggreen, E., & Brudvik, P. (2006). Interleukin-1 α and tumor necrosis factor- α expression during the early phases of orthodontic tooth movement in rats. *European Journal of Oral Sciences*, 114, 423–429.
- Bolat, E., Esenlik, E., Öncü, M., Özgöçmen, M., Avunduk, M. C., & Yüksel, Ö. (2020). Evaluation of the effects of vitamins C and E on experimental orthodontic tooth movement. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 14, 131–137.
- Borges de Castilhos, B., Machado de Souza, C., Simas Netta Fontana, M. L. S., Pereira, F. A., Tanaka, O. M., & Trevilatto, P. C. (2019). Association of clinical variables and polymorphisms in RANKL, RANK, and OPG genes with external apical root resorption. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 155, 529–542.

- Boyce, B. F., & Xing, L. (2007). The RANKL/RANK/OPG pathway. *Current Osteoporosis Reports*, 5, 98–104.
- Brezniak, N., & Wasserstein, A. (1993a). Root resorption after orthodontic treatment: Part 1. Literature review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 103, 62–66.
- Brezniak, N., & Wasserstein, A. (1993b). Root resorption after orthodontic treatment: Part 2. Literature review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 103, 138–146.
- Brezniak, N., & Wasserstein, A. (1993c). Root resorption after orthodontic treatment: Part 2. Literature review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 103, 138–146.
- Brezniak, N., & Wasserstein, A. (2002a). Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part I: The Basic Science Aspects. *Angle Orthodontist*, 72, 175–179.
- Brezniak, N., & Wasserstein, A. (2002b). Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part II: The Clinical Aspects. *Angle Orthodontist*, 72, 180–184.
- Brin, I., Tulloch, J. F. C., Koroluk, L., & Philips, C. (2003). External apical root resorption in Class II malocclusion: A retrospective review of 1- versus 2-phase treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 124, 151–156.
- Brudvik, P., & Rygh, P. (1993). The initial phase of orthodontic root resorption incident to local compression of the periodontal ligament. *European Journal of Orthodontics*, 15, 249–263.
- Carlier, A., van de Casteele, E., van Erum, R., & Nadjmi, N. (2019). Orthodontic - Surgical management in a Class II case with idiopathic root resorption. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, 120, 263–266.
- Chen, Y., & Liu, D. (2020). Morphologic evaluation of root resorption after miniscrew assisted en mass retraction in adult bialveolar protrusion patients. *Head & Face Medicine*, 16. <https://doi.org/10.1186/S13005-020-00229-Z>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Ciurla, A., Marruganti, C., Doldo, T., & Szymańska, J. (2021a). Association between Polymorphisms in the IL-1 β , TNFRSF11B, CASP1, and IL-6

- Genes and Orthodontic-Induced External Apical Root Resorption. *Journal of Clinical Medicine*, 10. <https://doi.org/10.3390/JCM10184166>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Ciurla, A., Marruganti, C., Doldo, T., & Szymańska, J. (2021b). Association between Polymorphisms in the IL-1 β , TNFRSF11B, CASP1, and IL-6 Genes and Orthodontic-Induced External Apical Root Resorption. *Journal of Clinical Medicine*, 10. <https://doi.org/10.3390/JCM10184166>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Consolaro, A. (2019). Extreme root resorption in orthodontic practice: teeth do not have to be replaced with implants. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 24, 20–28.
- Consolaro, A. (2020). Extensive orthodontically induced dental resorption: What to do? *Dental Press Journal of Orthodontics*, 25, 18–23.
- da Silva Filho, O. G., de Freitas Mendes, O., Ozawa, T. O., Ferrari, F. M., & Correa, T. M. (2004). Behavior of partially formed roots of teeth submitted to orthodontic movement. *The Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 28, 147–154.
- de Araújo, T. M., & Caldas, L. D. (2019). Tooth extractions in Orthodontics: first or second premolars? *Dental Press Journal of Orthodontics*, 24, 88–98.
- Dindaroglu, F., & Dogan, S. (2017). Root Resorption in Orthodontics. *Turkish Journal of Orthodontics*, 29, 103–108.
- D'Onofrio, L. (2019). Oral dysfunction as a cause of malocclusion. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 22, 43–48.
- dos Santos, C. C. O., Bellini-Pereira, S. A., Medina, M. C. G., & Normando, D. (2021). Allergies/asthma and root resorption: a systematic review. *Progress in Orthodontics*, 22, <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00351-x>, Internetzugriff am 18.10.2022
- El-Bialy, T., El-Shamy, I., & Graber, T. M. (2004). Repair of orthodontically induced root resorption by ultrasound in humans. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 126, 186–193.
- Fernandes, L. Q. P., Figueiredo, N. C., Antonucci, C. C. M., Lages, E. M. B., Andrade, I., & Junior, J. C. (2019). Predisposing factors for external

- apical root resorption associated with orthodontic treatment. *Korean Journal of Orthodontics*, *49*, 310–318.
- Fontana, M. L. S. S. N., de Souza, C. M. H., Bernardino, J. F., Hoette, F., Hoette, M. L., Thum, L., Ozawa, T. O., Capelozza Filho, L., Olandoski, M., Trevilatto, P. C. (2012). Association analysis of clinical aspects and vitamin D receptor gene polymorphism with external apical root resorption in orthodontic patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *142*, 339–347.
- Fukushima, H., Kajiya, H., Takada, K., Okamoto, F., & Okabe, K. (2003). Expression and role of RANKL in periodontal ligament cells during physiological root-resorption in human deciduous teeth. *European Journal of Oral Sciences*, *111*, 346–352.
- Gay, G., Ravera, S., Castroflorio, T., Garino, F., Rossini, G., Parrini, S., Cugliara, G., Deregibus, A. (2017). Root resorption during orthodontic treatment with Invisalign®: a radiometric study. *Progress in Orthodontics*, *18*. <https://doi.org/10.1186/S40510-017-0166-0>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Ge, L. L., Lyu, Q., Bai, X., Wu, S. H., & Jiang, X. L. (2021). [Comparison of apical root resorption of maxillary incisors between adolescents and adults after orthodontic treatment]. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue = Shanghai Journal of Stomatology*, *30*, 187–190.
- Goldie, R. S., & King, G. J. (1984). Root resorption and tooth movement in orthodontically treated, calcium-deficient, and lactating rats. *American Journal of Orthodontics*, *85*, 424–430.
- Göz, G., & Rakosi, T. (1989). Die apikale Wurzelresorption unter kieferorthopädischer Behandlung. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, *50*, 196–206.
- Gunraj, M. N. (1999). Dental root resorption. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, *88*, 647–653.
- Guo, Y., He, S., Gu, T., Liu, Y., & Chen, S. (2016). Genetic and clinical risk factors of root resorption associated with orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *150*, 283–289.

- Gutmann, J. L., Ne, R. F., & Witherspoon, D. E. (1999). Tooth Resorption. *Quintessence International*, *30*, 9–25.
- Hartsfield, J. K., Everett, E. T., & Al-Qawasmi, R. A. (2004). Genetic factors in external apical root resorption and orthodontic treatment. *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine: An Official Publication of the American Association of Oral Biologists*, *15*, 115–122.
- Hasegawa, N., Kawaguchi, H., Ogawa, T., Uchida, T., & Kurihara, H. (2003). Immunohistochemical characteristics of epithelial cell rests of Malassez during cementum repair. *Journal of Periodontal Research*, *38*, 51–56.
- Helsing, E., & Hammarström, L. (1996). The hyaline zone and associated root surface changes in experimental orthodontics in rats: a light and scanning electron microscope study. *European Journal of Orthodontics*, *18*, 11–18.
- Hershaw, C. M., Mhani, N., & Brown, A. (2021). The diagnostic value of orthopantomograms in detecting resorption of lateral incisors associated with ectopic canines: a CBCT study. *Journal of Orthodontics*, *49* (2), 195-204.
- Hotz, R. (1934). Wurzelresorptionen an bleibenden Zähnen. (Root resorption in permanent teeth.). *Fortschritte der Kieferorthopädie*, *28*, 217–224.
- Hu, Q., Zhou, J., Xu, X., & Dai, H. (2018). Effect of EMD on the orthodontically induced root resorption repair process in rats. *Journal of Orofacial Orthopedics*, *79*, 83–95.
- Huang, J., Yao, Y., Jiang, J., & Li, C. (2018). Effects of motivational methods on oral hygiene of orthodontic patients A systematic review and meta-analysis. *Medicine (United States)*, *97*.
<https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013182>,
Internetzugriff am: 18.10.2022
- Iglesias-Linares, A., Morford, L. A., & Hartsfield, J. K. (2016). Bone Density and Dental External Apical Root Resorption. *Current Osteoporosis Reports*, *14*, 292–309.
- Iglesias-Linares, A., Yañez-Vico, R. M., Ortiz-Ariza, E., Ballesta, S., Mendoza-Mendoza, A., Perea, E., & Solano-Reina, E. (2012). Postorthodontic external root resorption in root-filled teeth is influenced by interleukin-1 β polymorphism. *Journal of Endodontics*, *38*, 283–287.

- Jatania, A., Shivalinga, B. M., & Kiran, J. (2012). Root resorption after orthodontic treatment: a review. *International Journal of Orthodontics (Milwaukee, Wis.)*, 23, 45–49.
- Jiang, F., Chen, J., Kula, K., Gu, H., Du, Y., & Eckert, G. (2017). Root resorptions associated with canine retraction treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 152, 348–354.
- Jiang, H., Kitaura, H., Liu, L., Mizoguchi, I., & Liu, S. (2021). The miR-155-5p inhibits osteoclast differentiation through targeting CXCR2 in orthodontic root resorption. *Journal of Periodontal Research*, 56, 761–773.
- Jönsson, A., Malmgren, O., & Levander, E. (2007). Long-term follow-up of tooth mobility in maxillary incisors with orthodontically induced apical root resorption. *European Journal of Orthodontics*, 29, 482–487.
- Jordan, A. R., Kuhr, K., Ohm, C., Frenzel Baudisch, N., & Kirschneck, C. (2021). Sechste Deutsche Mundgesundheitsstudie: Zahn- und Kieferfehlstellungen bei Kindern. Pressemitteilung der Bundeszahnärztekammer:
<https://www.bzaek.de/presse/presseinformationen/presseinformation/sechste-deutsche-mundgesundheitsstudie-gestartet.html>,
Internetzugriff am: 18.10.2022
- Jung, Y. H., & Cho, B. H. (2011). External root resorption after orthodontic treatment: a study of contributing factors. *Imaging Science in Dentistry*, 41, 17–21.
- Jyotirmay, Singh, S. K., Adarsh, K., Kumar, A., Gupta, A. R., & Sinha, A. (2021). Comparison of Apical Root Resorption in Patients Treated with Fixed Orthodontic Appliance and Clear Aligners: A Cone-beam Computed Tomography Study. *Journal of Contemporary Dental Practice*, 22, 763–768.
- Kamble, R. H., Lohkare, S., Hararey, P. v., & Mundada, R. D. (2012). Stress distribution pattern in a root of maxillary central incisor having various root morphologies: a finite element study. *The Angle Orthodontist*, 82, 799–805.

- Kanas, R. J., & Kanas, S. J. (2011, April). Dental Root Resorption: A Review of the Literature and a Proposed New Classification. Retrieved February 16, 2022, Compendium of Continuing Education in Dentistry: <https://www.aegisdentalnetwork.com/cced/2011/04/dental-root-resorption-a-review-of-the-literature-and-a-proposed-new-classification>, Internetzugriff am: 16.02.2022
- Kanas, R. J., & Kanas, S. J. (2012). Localized idiopathic apical root resorption: a report of five cases with emphasis on differential diagnosis. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, 33, 184–195.
- Kanungo, M., Khandelwal, V., Nayak, U. A., & Nayak, P. A. (2013). Multiple idiopathic apical root resorption. *BMJ Case Reports*, 2013. <https://doi.org/10.1136/BCR-2013-009696>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Kapoor, P., Kharbanda, O. P., Monga, N., Miglani, R., & Kapila, S. (2014). Effect of orthodontic forces on cytokine and receptor levels in gingival crevicular fluid: a systematic review. *Progress in Orthodontics*, 15. <https://doi.org/10.1186/S40510-014-0065-6>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Karnati, P. K. R., Seth, P., Zamzuri, A. T. bin, & Tharwani, P. (2021). Orthodontically Induced External Apical Root Resorption in Class II Malocclusion. *Case Reports in Dentistry*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8290429>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Kaur, H., & El-Bialy, T. (2020). Shortening of Overall Orthodontic Treatment Duration with Low-Intensity Pulsed Ultrasound (LIPUS). *Journal of Clinical Medicine*, 9. <https://doi.org/10.3390/JCM9051303>, Internetzugriff am 18.10.2022
- Kereshanan, S., Stephenson, P., & Waddington, R. (2008). Identification of dentine sialoprotein in gingival crevicular fluid during physiological root resorption and orthodontic tooth movement. *European Journal of Orthodontics*, 30, 307–314.
- Ketcham, A. H. (1927). A preliminary report of an investigation of apical root resorption of permanent teeth. *The International Journal of Orthodontia, Oral Surgery and Radiography*, 13, 97–127.

- Khalaf, K., Mustafa, S., & Maarouf, T. (2022). Is Orthodontic Treatment a Risk Factor of Cervical Root Resorption? A Systematic Review. *European Journal of Dentistry*. <https://doi.org/10.1055/S-0041-1742127>, Internetzugriff am 18.10.2022
- Kjaer, I. (1995). Morphological characteristics of dentitions developing excessive root resorption during orthodontic treatment. *European Journal of Orthodontics*, *17*, 25–34.
- Kjaer, I. (2013). External root resorption: Different etiologies explained from the composition of the human root-close periodontal membrane. *Dental Hypotheses*, *4*, 75–79.
- Kjaer, I., Nielsen, M. H., & Skovgaard, L. T. (2008). Can persistence of primary molars be predicted in subjects with multiple tooth agenesis? *European Journal of Orthodontics*, *30*, 249–253.
- Kjaer, I., Strøm, C., & Worsaae, N. (2012). Regional Aggressive Root Resorption Caused by Neuronal Virus Infection. *Case Reports in Dentistry*, *2012*, <https://doi.org/10.1155/2012/693240>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Kolcuoglu, K., & Zeynep Oz, A. (2020). Comparison of orthodontic root resorption of root-filled and vital teeth using micro-computed tomography. *The Angle Orthodontist*, *90*, 56–62.
- Kulkarni, R. N., Bakker, A. D., Everts, V., & Klein-Nulend, J. (2012). Mechanical loading prevents the stimulating effect of IL-1 β on osteocyte-modulated osteoclastogenesis. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *420*, 11–16.
- Kumar, V., Logani, A., & Shah, N. (2013). Dentine sialoprotein expression in gingival crevicular fluid during trauma-induced root resorption. *International Endodontic Journal*, *46*, 371–378.
- Kurol, J., & Owman-Moll, P. (1998). Hyalinization and root resorption during early orthodontic tooth movement in adolescents. *The Angle Orthodontist*, *68*, 161–166.
- Lambrechts, P., & Vanhoorebeeck, B. (1992). [Root resorption]. *Revue Belge de Medecine Dentaire*, *47*, 54–75.

- Leach, H. A., Ireland, A. J., & Whaites, E. J. (2001). Radiographic diagnosis of root resorption in relation to orthodontics. *British Dental Journal*, *190*, 16–22.
- Lee, R. Y., Artun, J., & Alonzo, T. A. (1999). Are dental anomalies risk factors for apical root resorption in orthodontic patients? *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, *116*, 187–195.
- Lee, Y. J., & Lee, T. Y. (2016). External root resorption during orthodontic treatment in root-filled teeth and contralateral teeth with vital pulp: A clinical study of contributing factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *149*, 84–91.
- Levander, E., & Malmgren, O. (1988). Evaluation of the risk of root resorption during orthodontic treatment: a study of upper incisors. *European Journal of Orthodontics*, *10*, 30–38.
- Levander, E., & Malmgren, O. (2000). Long-term follow-up of maxillary incisors with severe apical root resorption. *European Journal of Orthodontics*, *22*, 85–92.
- Levander, E., Malmgren, O., & Eliasson, S. (1994). Evaluation of root resorption in relation to two orthodontic treatment regimes. A clinical experimental study. *European Journal of Orthodontics*, *16*, 223–228.
- Levander, E., Malmgren, O., & Stenback, K. (1998). Apical root resorption during orthodontic treatment of patients with multiple aplasia: a study of maxillary incisors. *European Journal of Orthodontics*, *20*, 427–434.
- Li, Y., Deng, S., Mei, L., Li, Z., Zhang, X., Yang, C., & Li, Y. (2020). Prevalence and severity of apical root resorption during orthodontic treatment with clear aligners and fixed appliances: a cone beam computed tomography study. *Progress in Orthodontics*, *21*, <https://doi.org/10.1186/s40510-019-0301-1>,
Internetzugriff am: 18.10.2022
- Lima, T. C. da S., Amaro, R. G., dos Santos, L. C. M., Coste, S. C., Silva, E. F. e., Barbato-Ferreira, D. A., Colosimo, E. A., Silva, T. A., Bastos, J. V. (2021). Expression of matrix metalloproteinases 2 and 9 in replanted teeth with external root resorption: A cross-sectional study.

Archives of Oral Biology, 129.

<https://doi.org/10.1016/J.ARCHORALBIO.2021.105194>,

Internetzugriff am: 18.10.2022

Lin Y; Zhong PP; Zhang DQ. (2007). Investigation of the possible factors related to root resorption during orthodontic treatment in adolescents. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue*, 16, 7–24.

Linkous, E. R., Trojan, T. M., & Harris, E. F. (2020). External apical root resorption and vectors of orthodontic tooth movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 158, 700–709.

Liou, E. J. W., & Chang, P. M. H. (2010). Apical root resorption in orthodontic patients with en-masse maxillary anterior retraction and intrusion with miniscrews. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 137, 207–212.

Lombardo, L., Carinci, F., Martini, M., Gemmati, D., Nardone, M., & Siciliani, G. (2016). Quantitative evaluation of dentin sialoprotein (DSP) using microbeads - a potential early marker of root resorption. *ORAL & Implantology*, 9, 132–142.

Lopatiene, K., & Dumbravaite, A. (2008). Risk factors of root resorption after orthodontic treatment. *Stomatologija, Baltic Dental and Maxillofacial Journal*, 10, 89–95.

Lossdörfer, S., Götz, W., & Jäger, A. (2002). Immunohistochemical localization of receptor activator of nuclear factor kappaB (RANK) and its ligand (RANKL) in human deciduous teeth. *Calcified Tissue International*, 71, 45–52.

Low, E., Zoellner, H., Kharbanda, O. P., & Darendeliler, M. A. (2005). Expression of mRNA for osteoprotegerin and receptor activator of nuclear factor kappa beta ligand (RANKL) during root resorption induced by the application of heavy orthodontic forces on rat molars. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official*

Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics, 128, 497–503.

Mah, J., & Prasad, N. (2004). Dentine phosphoproteins in gingival crevicular fluid during root resorption. *European Journal of Orthodontics, 26, 25–30.*

Marinescu, I. R., Bănică, A. C., Mercuț, V., Gheorghe, A. G., Drăghici, E. C., Cojocaru, M. O., Scriciu, M., Popescu, S. M. (2019). Root Resorption Diagnostic: Role of Digital Panoramic Radiography. *Current Health Sciences Journal, 45, 156–166.*

Marques, L. S., Ramos-Jorge, M. L., Rey, A. C., Armond, M. C., & de Oliveira Ruellas, A. C. (2010a). Severe root resorption in orthodontic patients treated with the edgewise method: Prevalence and predictive factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 137, 384–388.*

Marques, L. S., Ramos-Jorge, M. L., Rey, A. C., Armond, M. C., & de Oliveira Ruellas, A. C. (2010b). Severe root resorption in orthodontic patients treated with the edgewise method: Prevalence and predictive factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 137, 384–388.*

Massler, M., & Malone, A. J. (1954). Root resorption in human permanent teeth. A roentgenographic study. *American Journal of Orthodontics, 40, 619–633.*

Mauès, C. P. R., do Nascimento, R. R., & Vilella, O. de V. (2015a). Severe root resorption resulting from orthodontic treatment: prevalence and risk factors. *Dental Press Journal of Orthodontics, 20, 52–58.*

Mauès, C. P. R., do Nascimento, R. R., & Vilella, O. de V. (2015b). Severe root resorption resulting from orthodontic treatment: Prevalence and risk factors. *Dental Press Journal of Orthodontics, 20, 52–58.*

McNab, S., Battistutta, D., Taverne, A., & Symons, A. L. (1999). External apical root resorption of posterior teeth in asthmatics after orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics, 116, 545–551.*

- Melsen, B. (2001). Tissue reaction to orthodontic tooth movement--a new paradigm. *European Journal of Orthodontics*, *23*, 671–681.
- Mirabella, A. D., & Årtun, J. (1995). Risk factors for apical root resorption of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, *108*, 48–55.
- Mona, M., Abbasi, Z., Kobeissy, F., Chahbandar, A., & Pileggi, R. (2021). A Bioinformatics Systems Biology Analysis of the Current Oral Proteomic Biomarkers and Implications for Diagnosis and Treatment of External Root Resorption. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*, <https://doi.org/10.3390/ijms22063181>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Motokawa, M., Sasamoto, T., Kaku, M., Kawata, T., Matsuda, Y., Terao, A., & Tanne, K. (2012). Association between root resorption incident to orthodontic treatment and treatment factors. *European Journal of Orthodontics*, *34*, 350–356.
- Motokawa, M., Terao, A., Kaku, M., Kawata, T., Gonzales, C., Darendeliler, M. A., & Tanne, K. (2013). Open bite as a risk factor for orthodontic root resorption. *European Journal of Orthodontics*, *35*, 790–795.
- Murata, N., Ioi, H., Ouchi, M., Takao, T., Oida, H., Aijima, R., Yamaza, T., Kido, M. A. (2013). Effect of allergen sensitization on external root resorption. *Journal of Dental Research*, *92*, 641–647.
- Nigul, K., & Jagomagi, T. (2006). Factors related to apical root resorption of maxillary incisors in orthodontic patients. *Stomatologija, Baltic Dental and Maxillofacial Journal*, *8*, 76–79.
- Nishida, D., Arai, A., Zhao, L., Yang, M., Nakamichi, Y., Horibe, K., Hosoya, A., Kobayashi, Y., Udugawa, N., Mizoguchi, T. (2021). RANKL/OPG ratio regulates odontoclastogenesis in damaged dental pulp. *Scientific Reports*, *11*. <https://doi.org/10.1038/S41598-021-84354-Y>, Internetzugriff am: 18.10.2022
- Nishioka, M., Ioi, H., Nakata, S., Nakasima, A., & Counts, A. (2006). Root Resorption and Immune System Factors in the Japanese. *Angle Orthodontist*, *76*, 103–108.

- Oppenheim, A. (1911). Tissue changes, particularly of the bone, incident to tooth movement. *Transaction of the European Orthodontic Society*, 303–359.
- Oppenheim, A. (1936). Biologic Orthodontic Therapy and Reality. *Angle Orthodontist*, 6, 69–116.
- Ottolengui, R. (1914). The physiological and pathological resorption of tooth roots. *Items of Interest*, 36, 332–362.
- Owman-Moll, P., & Kurol, J. (2000a). Root resorption after orthodontic treatment in high- and low-risk patients: analysis of allergy as a possible predisposing factor. *European Journal of Orthodontics*, 22, 657–663.
- Owman-Moll, P., & Kurol, J. (2000b). Root resorption after orthodontic treatment in high- and low-risk patients: analysis of allergy as a possible predisposing factor. *European Journal of Orthodontics*, 22, 657–663.
- Owman-Moll, P., & Kurol, J. (1998). The early reparative process of orthodontically induced root resorption in adolescents--location and type of tissue. *European Journal of Orthodontics*, 20, 727–732.
- Ozkalayci, N., Karadeniz, E. I., Elekdag-Turk, S., Turk, T., Cheng, L. L., & Darendeliler, M. A. (2018). Effect of continuous versus intermittent orthodontic forces on root resorption: A microcomputed tomography study. *The Angle Orthodontist*, 88, 733–739.
- Paatero, Y. v. (1954). Pantomography in theory and use. *Acta Radiologica*, 41, 321–335.
- Palmqvist, P., Persson, E., Conaway, H. H., & Lerner, U. H. (2002). IL-6, leukemia inhibitory factor, and oncostatin M stimulate bone resorption and regulate the expression of receptor activator of NF-kappa B ligand, osteoprotegerin, and receptor activator of NF-kappa B in mouse calvariae. *Journal of Immunology*, 169, 3353–3362.
- Pastro, J. D. V., Nogueira, A. C. A., Salvatore de Freitas, K. M., Valarelli, F. P., Cançado, R. H., de Oliveira, R. C. G., & de Oliveira, R. C. G. (2018). Factors Associated to Apical Root Resorption after Orthodontic Treatment. *The Open Dentistry Journal*, 12, 331–339.
- Picanço, G. V., Freitas, K. M. S. de, Cançado, R. H., Valarelli, F. P., Picanço, P. R. B., & Feijão, C. P. (2013). Predisposing factors to severe external

- root resorption associated to orthodontic treatment. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 18, 110–120.
- Rahmel, S., & Schulze, R. K. W. (2019). Accuracy in Detecting Artificial Root Resorption in Panoramic Radiography versus Tomosynthetic Panoramic Radiographs. *Journal of Endodontics*, 45, 634-639.
- Raza, H., Major, P. W., Dederich, D., & El-Bialy, T. (2016). Effect of low-intensity pulsed ultrasound on orthodontically induced root resorption caused by torque: A prospective, double-blind, controlled clinical trial. *Angle Orthodontist*, 86, 550-557.
- Reitan, K. (1974). Initial tissue behavior during apical root resorption. *Angle Orthodontist*, 44, 68–82.
- Reitan, K., & Kvam, E. (1971). Comparative Behavior of Human and Animal Tissue During Experimental Tooth Movement. *The Angle Orthodontist*, 41, 1–14.
- Reitan, K. (1967). Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics*, 53, 721–745.
- Remington, D. N., Joondeph, D. R., Årtun, J., Riedel, R. A., & Chapko, M. K. (1989). Long-term evaluation of root resorption occurring during orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 96, 43–46.
- Ritchie, H. (2018). The functional significance of dentin sialoprotein-phosphoryn and dentin sialoprotein. *International Journal of Oral Science*, 10. <https://doi.org/10.1038/S41368-018-0035-9>,
Internetzugriff am: 18.10.2022
- Roscoe, M. G., Meira, J. B. C., & Cattaneo, P. M. (2015a). Association of orthodontic force system and root resorption: A systematic review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 147, 610–626.
- Rudolph, D. J., Willes, M. G., & Sameshima, G. T. (2001). A Finite Element Model of Apical Force Distribution From Orthodontic Tooth Movement. *The Angle Orthodontist*, 71, 127–131.

- Sameshima, G. T., & Asgarifar, K. O. (2001). Assessment of Root Resorption and Root Shape: Periapical vs Panoramic Films. *Angle Orthodontist*, *71*, 185–189.
- Sameshima, G. T., & Iglesias-Linares, A. (2021). Orthodontic root resorption. *Journal of the World Federation of Orthodontists*, *10*, 135–143.
- Sameshima, G. T., & Sinclair, P. M. (2001a). Predicting and preventing root resorption: Part I. Diagnostic factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *119*, 505–510.
- Sameshima, G. T., & Sinclair, P. M. (2001b). Predicting and preventing root resorption: Part II. Treatment factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *119*, 511–515.
- Sasaki, T. (2003). Differentiation and functions of osteoclasts and odontoclasts in mineralized tissue resorption. *Microscopy Research and Technique*, *61*, 483–495.
- Schwarzkopf, E. (1887). Resorption der Zahnwurzeln bei Regulierung. *Deutsche Monatsschrift für Zahnheilkunde*, *5*, 180.
- Seifi, M., Eslami, B., & Saffar, A. S. (2003). The effect of prostaglandin E2 and calcium gluconate on orthodontic tooth movement and root resorption in rats. *European Journal of Orthodontics*, *25*, 199–204.
- Seifi, M., Hamed, R., & Khavandegar, Z. (2015). The Effect of Thyroid Hormone, Prostaglandin E2, and Calcium Gluconate on Orthodontic Tooth Movement and Root Resorption in Rats. *Journal of Dentistry (Shiraz, Iran)*, *16*, 35–42.
- Sekhvat, A. R., Mousavizadeh, K., Pakshir, H. R., & Aslani, F. S. (2002). Effect of misoprostol, a prostaglandin E1 analog, on orthodontic tooth movement in rats. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, *122*, 542–547.
- Sharab, L. Y., Morford, L. A., Dempsey, J., Falcão-Alencar, G., Mason, A., Jacobson, E., Kluemper, G. T., Macri, J. V., Hartsfield, J. K. (2015). Genetic and treatment-related risk factors associated with external apical root resorption (EARR) concurrent with orthodontia. *Orthodontics and Craniofacial Research*, *18*, 71–82.

- Silva, T. A., Lara, V. S., Silva, J. S., Oliveira, S. H. P., Butler, W. T., & Cunha, F. Q. (2005). Macrophages and mast cells control the neutrophil migration induced by dentin proteins. *Journal of Dental Research*, *84*, 79–83.
- Smale, I., Årtun, J., Behbehani, F., Doppel, D., Van't Hof, M., & Kuijpers-Jagtman, A. M. (2005). Apical root resorption 6 months after initiation of fixed orthodontic appliance therapy. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *128*, 57–67.
- Smith, N. H. H. (1978). Monostotic Paget's disease of the mandible presenting with progressive resorption of the teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, and Oral Pathology*, *46*, 246–253.
- Sondeijker, C. F. W., Lamberts, A. A., Beckmann, S. H., Kuitert, R. B., van Westing, K., Persoon, S., & Kuijpers-Jagtman, A. M. (2020). Development of a clinical practice guideline for orthodontically induced external apical root resorption. *European Journal of Orthodontics*, *42*, 115–124.
- Stuteville, O. H. (1938). Injuries caused by orthodontic forces and the ultimate results of these injuries. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*, *24*, 103–119.
- Tehranchi, A., Sadighnia, A., Younessian, F., Abdi, A. H., & Shirvani, A. (2017). Correlation of Vitamin D status and orthodontic-induced external apical root resorption. *Dental Research Journal*, *14*, 403–411.
- Thongudomporn, U., & Freer, T. J. (1998). Anomalous dental morphology and root resorption during orthodontic treatment: a pilot study. *Australian Orthodontic Journal*, *15*, 162–167.
- Toyokawa-Sperandio, K. C., Conti, A. C. de C. F., Fernandes, T. M. F., de Almeida-Pedrin, R. R., de Almeida, M. R., & Oltramari, P. V. P. (2021). External apical root resorption 6 months after initiation of orthodontic treatment: A randomized clinical trial comparing fixed appliances and orthodontic aligners. *Korean Journal of Orthodontics*, *51*, 329–336.
- Tyrovola, J. B., Spyropoulos, M. N., Makou, M., & Perrea, D. (2008). Root resorption and the OPG/RANKL/RANK system: a mini review. *Journal of Oral Science*, *50*, 367–376.

- Ullrich, N., Schröder, A., Bauer, M., Spanier, G., Jantsch, J., Deschner, J., Proff, P., Kirschneck, C. (2021). The role of HIF-1 α in nicotine-induced root and bone resorption during orthodontic tooth movement. *European Journal of Orthodontics*, 43, 516–526.
- Väänänen, H. K., & Härkönen, P. L. (1996). Estrogen and bone metabolism. *Maturitas*, 23, 65–69.
- Valladares Neto, J., Rino Neto, J., & de Paiva, J. B. (2013). Orthodontic movement of teeth with short root anomaly: Should it be avoided, faced or ignored? *Dental Press Journal of Orthodontics*, 18, 72–85.
- van Parys, K., Aartman, I. H. A., Kuitert, R., & Zentner, A. (2012). Relationship between dental anomalies and orthodontic root resorption of upper incisors. *European Journal of Orthodontics*, 34, 571–574.
- Vázquez-Landaverde, L. A., Rojas-Huidobro, R., Gallegos-Corona, M. A., & Aceves, C. (2002). Periodontal 5'-deiodination on forced-induced root resorption--the protective effect of thyroid hormone administration. *European Journal of Orthodontics*, 24, 363–369.
- Wang, J., & Feng, J. Q. (2017). Signaling Pathways Critical for Tooth Root Formation. *Journal of Dental Research*, 96, 1221–1228.
- Weber, T. (2017). *Memorix Zahnmedizin* (5th ed.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 354-355
- Weiland, F. (2003). Constant versus dissipating forces in orthodontics: the effect on initial tooth movement and root resorption. *European Journal of Orthodontics*, 25, 335–342.
- Weiland, Frank. (2006). External root resorptions and orthodontic forces: correlations and clinical consequences. *Progress in Orthodontics*, 7, 156–163.
- Weltman, B., Vig, K. W. L., Fields, H. W., Shanker, S., & Kaizar, E. E. (2010). Root resorption associated with orthodontic tooth movement: A systematic review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 137, 462–476.
- Xiao, S., Li, L., Wang, L., Wang, Y., Zhang, M., Yao, J., & Fan, Y. (2020). Root surface microcracks induced by orthodontic force as a potential primary indicator of root resorption. *Journal of Biomechanics*, 110. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOMECH.2020.109938>,

Internetzugriff am: 18.10.2022

- Xie, X. Y., Jia, S. M., Sun, Z. H., & Zhang, Z. Y. (2019). [Diagnostic accuracy of cone beam computed tomography with different resolution settings for external root resorption]. *Journal of Peking University, Health Sciences (Beijing Da Xue Xue Bao. Yi Xue Ban)*, 51, 75–79.
- Xu, T., & Baumrind, S. (2002). The relationship between apical root resorption and orthodontic tooth movement in growing subjects. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi = Zhonghua Kouqiang Yixue Zazhi = Chinese Journal of Stomatology*, 37, 265–268.
- Yamaguchi, M. (2009). RANK/RANKL/OPG during orthodontic tooth movement. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 12, 113–119.
- Yamaguchi, M., Aihara, N., Kojima, T., & Kasai, K. (2006). RANKL increase in compressed periodontal ligament cells from root resorption. *Journal of Dental Research*, 85, 751–756.
- Yamamoto, R., Oida, S., & Yamakoshi, Y. (2015). Dentin sialophosphoprotein-derived proteins in the dental pulp. *Journal of Dental Research*, 94, 1120–1127.
- Yao, Z., Xing, L., Qin, C., Schwarz, E. M., & Boyce, B. F. (2008). Osteoclast precursor interaction with bone matrix induces osteoclast formation directly by an interleukin-1-mediated autocrine mechanism. *The Journal of Biological Chemistry*, 283, 9917–9924.
- Yuan, G., Wang, Y., Gluhak-Heinrich, J., Yang, G., Chen, L., Li, T., Wu, L. A., Chen, Z., MacDougall, M., Chen, S. (2009). Tissue-specific expression of dentin sialophosphoprotein (DSPP) and its polymorphisms in mouse tissues. *Cell Biology International*, 33, 816–829.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

9 Anhang

9.1 Lebenslauf

Die Seite 120 enthält persönliche Daten. Sie ist daher nicht Bestandteil der Online-Veröffentlichung.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

9.2 Verzeichnis der akademischen Lehrer/-innen

Meine akademischen Lehrerenden in Marburg an der Philipps-Universität waren folgende Damen und Herren Professoren, Dozenten und Oberärzte:

Althaus, Arweiler, Auschill, Brandt, Bremmer, Cetin, Engler, Feuser, Fischer, Frankenberger, Gente, Glörfeld, Halaszovich, Huster, Jablonski-Momeni, Kinscherf, Korbmacher-Steiner, Lill, Lotzmann, Mengel, Meisgeier, Mey, Milani, Mittag, Moll, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Plant, Roggendorf, Rost, Thöne-Mühling, Weber, Weihe, Winter, Wrocklage, Ziebart

9.3 Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Korbmacher-Steiner für die Überlassung des Themas und ebenso für die gute Betreuung bedanken.

Ein großer Dank geht an Frau Prof. Dr. Jablonski-Momeni, die mich während der Vorbereitung und der gesamten Dissertation intensiv mit betreut hat und immer ein offenes Ohr für Fragen hatte.

Bei Frau Heinzl-Gutenbrunner möchte ich mich für die biometrische Beratung bedanken.

Ich danke Frau Kleinsteuber und Frau Schmidt von der kieferorthopädischen Abteilung für die Bereitstellung der Patientenakten.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, die mich immer motiviert, mir den Rücken freigehalten und mich auf meinem Weg begleitet hat.

Insbesondere danke ich meinem Vater, der mich während des gesamten Studiums und während der Dissertation unterstützt hat und der immer für mich da ist.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.

9.4 Ehrenwörtliche Erklärung