

Aus der Poliklinik für Parodontologie und Zahnerhaltung der Klinik für Zahn-, Mund-
und Kieferkrankheiten der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität
Mainz

In-vitro-Untersuchung des Pulpenraums mandibulärer primärer Prämolaren im Micro-
CT

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Zahnmedizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

vorgelegt von

Paul Kim
aus Frankfurt am Main

Mainz, 2020

Tag der Promotion:

08.12.2020

Meiner Frau und meiner Familie
in Liebe gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis.....	II
Bildverzeichnis	III
1. Einleitung	1
2. Literaturdiskussion	2
2.1 Die Anatomie der Pulpa	2
2.2 Untersuchungsmethoden.....	5
2.2.1 Histologische Schnitte und Hartgewebe-Schliffpräparate.....	6
2.2.2 Korrosionsmethode und Ausgussmethode.....	6
2.2.3 Aufhellungsverfahren	8
2.2.4 Konventionelle Röntgentechnik.....	9
2.2.5 Computertomographie.....	10
2.2.6 Digitale Volumetomographie	11
2.2.7 Micro-CT	12
2.3 Wurzelkanal-Klassifikationen	13
2.3.1 Klassifikation nach Weine	13
2.3.2 Klassifikation nach Vertucci.....	14
2.3.3 Vierziffriges-Codesystem	17
2.4 Der erste mandibuläre Prämolare.....	19
2.4.1 Wurzelkanalkonfigurationen	20
2.4.2 Akzessorische Kanäle	22
2.4.3 Anastomosen	23
2.4.4 Nebenforamina.....	24
2.4.5 Hauptforamina Durchmesser	25
3. Material und Methoden.....	27
3.1 Auswahlkriterien und Vorbereitung der Präparate	27
3.2 Micro-CT & Rohdaten	28

3.3	Bildbearbeitungs-Software.....	29
3.4	Analyse.....	31
4.	Ergebnisse.....	34
4.1	Wurzelkanalkonfiguration.....	34
4.2	Akzessorische Kanäle.....	35
4.3	Anastomosen.....	36
4.4	Nebenforamina.....	37
4.5	Hauptforamina Durchmesser.....	38
5.	Diskussion.....	39
6.	Zusammenfassung.....	48
	Literaturverzeichnis.....	51
	Danksagung.....	62

Abkürzungsverzeichnis

μCT/MCT	Micro-Computertomographie
μm	Mikrometer
CT	Computertomographie
CBCT	Cone-beam computerized tomography
DVT	Digitale Volumetomographie

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wurzelkanal-Klassifikation nach Weine (94).....	13
Tabelle 2: Wurzelkanal-Klassifikation nach Vertucci 1974 (77).....	15
Tabelle 3: Gegenüberstellung der Klassifikationen nach Vertucci et al., Weine et al., Briseño-Marroquín B et al.....	18
Tabelle 4: Hardwaredetails μ CT 40 (109).....	29
Tabelle 5: Wurzelkanalkonfigurationen der mandibulären primären Prämolaren (Micro-CT). Häufigste Wurzelkanalkonfiguration 1-1-1/1 (70.64%), gefolgt von 1-1-2/2 & 1-2-2/2 (jeweils 7.34%) und 1-2-1/1 (5.50%).....	34
Tabelle 6: Verteilung der akzessorischen Kanäle innerhalb der Wurzeldritteln. In 31.19% aller Präparate befanden sich akzessorische Kanäle. Ein Großteil (25.69%) ist im apikalen Drittel lokalisiert, danach 5.5% im mittleren Drittel. Im koronalen Drittel befanden sich keine akzessorischen Kanäle.....	35
Tabelle 7: Inzidenz von Anastomosen in verschiedenen Wurzelkanalkonfigurationen	36
Tabelle 8: Prozentuale Angabe der Präparate mit jeweils 0-6 Nebenforamina.	37
Tabelle 9: Schmale und breite Durchmesser bei einem, zwei und drei beobachteten Hauptforamina.....	38

Bildverzeichnis

Abbildung 1: a: Pulpahörner, b: Pulpakammerdach, c: Pulpakammer, d: Pulpakammerboden, e: Wurzelkanal, f: Akzessorischer Kanal, g: Anastomose, h: Apikale Ramifikation, i: Nebenforamen, j: Hauptforamen, k: Anatomischer Apex	2
Abbildung 2: Micro-CT Aufnahme: a: Pulpakammerdach, b: Pulpakammer, c: Pulpakammerboden, d: Anastomose, e: Akzessorischer Kanal, f: Wurzelkanal, g: Apikales Foramen, h: Anatomischer Apex	4
Abbildung 3: Wurzelkanal-Klassifikation nach Vertucci. Typ I-VIII.....	16
Abbildung 4: Vierziffriges-Codesystem nach Briseño-Marroquín B et al.	17
Abbildung 5: Vorbereitung der Präparate nach abgeschlossener Identifizierung.	27
Abbildung 6: Dreidimensional rekonstruierter, farblich markierter mandibulärer primärer Prämolare. Vestibuläre Ansicht.....	30
Abbildung 7: Dreidimensional rekonstruierter, farblich markierter mandibulärer primärer Prämolare. Approximale Ansicht.....	30
Abbildung 8: Mandibulärer primärer Prämolare mit der Wurzelkanalkonfiguration 1-2-1/2	31
Abbildung 9: Mandibulärer primärer Prämolare.....	32
Abbildung 10: Mandibulärer primärer Prämolare.....	33

Gem. § 9, Abs. 4 der Promotionsordnung vom 23. Oktober 2017 wurden einige Ergebnisse dieser Dissertation vorab publiziert. (1)

1. Einleitung

Lange Zeit galt eine entzündete Pulpa als Extraktionsgrund eines Zahnes (2). Erst durch die stetige Weiterentwicklung in der Zahnheilkunde und der enormen Fortschritte in der Forschung wie die Entwicklung von Anästhetika, Röntgenaufnahmen zur Diagnose pulpitischer Erkrankungen, Aufbereitungsinstrumentarien, Antiseptika und Abfüllmaterialien war es möglich pulpitischer auffällige Zähne endodontisch zu behandeln (3). So wurde schließlich die Endodontie zu einem eigenen Teilgebiet der konservierenden Zahnheilkunde und dem Wunsch des Patienten, den eigenen Zahn möglichst lange zu erhalten, konnte nachgekommen werden (4, 5).

Eine erfolgreiche endodontische Behandlung setzt die suffiziente Durchführung von drei grundlegenden Arbeitsschritten voraus. Die mechanische und chemische Aufbereitung, die Desinfektion und die vollständige Obturation der Wurzelkanäle (6). Dies ist erforderlich, um eine Reinfektion des behandelten Zahnes zu vermeiden. Als die häufigsten Ursachen für eine misslungene endodontische Behandlung nennt Ingle, J.I. (7) eine unvollständige Wurzelkanalfüllung mit 58,65% und die Wurzelperforation mit 9,62% der Fälle. Oft werden durch die Variabilität der Wurzelkanalmorphologie zusätzliche Kanäle vom Behandler übersehen und nicht behandelt. Somit wird für den Erfolg einer endodontischen Behandlung ein umfangreiches Wissen des Behandlers der internen Wurzelkanalmorphologie vorausgesetzt (8). Die höchste Variabilität in Hinsicht auf die Wurzelkanalmorphologie findet man in den mandibulären primären Prämolaren, infolgedessen wird die suffiziente Therapie dieser als schwierig angesehen. Auch in der Literatur wird diese Diskrepanz in Bezug auf die interne Wurzelkanal-Morphologie durch etliche Studien belegt (6, 9-49).

Nach heutigem Stand wurden keine umfangreichen Untersuchungen der deutschen und der schweizerischen Population durchgeführt, somit wird in dieser Studie mit Hilfe eines Micro-CTs, welches gegenüber herkömmlichen Untersuchungsmethoden als überlegen angesehen wird (24, 50-55), die Morphologie der mandibulären primären Prämolaren nochmals genau untersucht und beschrieben. Da komplexere Wurzelkanalkonfigurationen jedoch nicht in denen von Weine FS (56) und Vertucci (6) beschriebenen Klassifikationen zugeordnet werden können, wurde in dieser Studie das von Briseño-Marroquín B et al. (57) vorgeschlagene vierziffrige-Codesystem zur Klassifizierung der untersuchten Präparate verwendet.

2. Literaturdiskussion

2.1 Die Anatomie der Pulpa

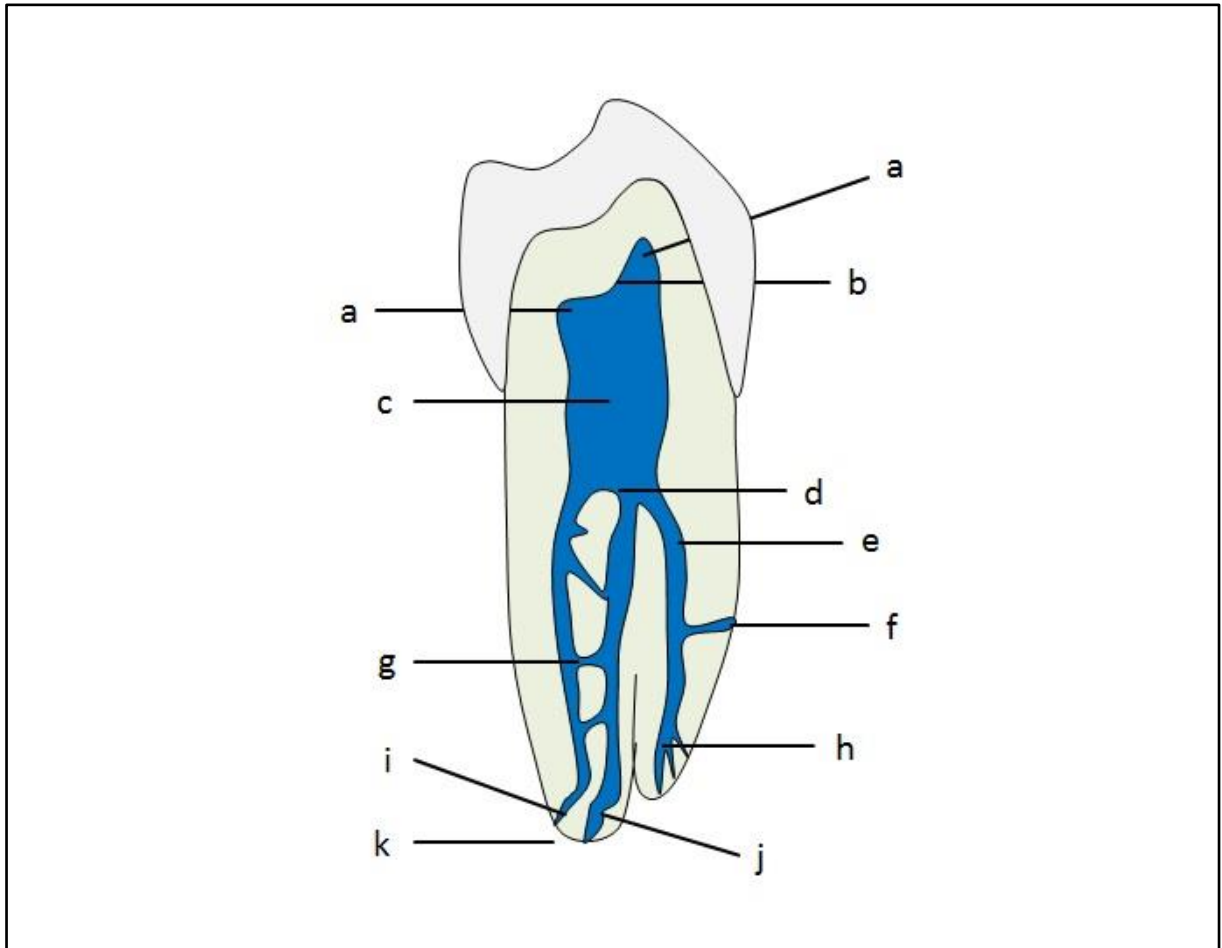


Abbildung 1: a: Pulpahörner, b: Pulpakammerdach, c: Pulpakammer, d: Pulpakammerboden, e: Wurzelkanal, f: Akzessorischer Kanal, g: Anastomose, h: Apikale Ramifikation, i: Nebenforamen, j: Hauptforamen, k: Anatomischer Apex

Im Inneren der Zahnhartsubstanz befindet sich ein lockerer, stark vaskularisierter Weichgewebekern aus spezialisiertem Bindegewebe, dieser wird auch Zahnpulpa genannt und ist mesodermalen Ursprungs (58). Gemeinsam mit dem Dentin bildet die Pulpa nicht nur entwicklungsgeschichtlich, sondern auch strukturell und funktionell eine Einheit, denn sie ist für die Bildung des Primär- und Sekundärdentins sowie des Dentalliquors verantwortlich und dient als Signal- und Warnorgan gegenüber physikalischen, chemischen und infektiös-toxischen Reizen (58, 59).

Im Bereich der Krone befindet sich die Pulpa in einem hartgewebefreien Raum, welcher auch als Pulpakammer bezeichnet wird (58). Ihre koronalen und kaudalen Wände bestehen aus einer Dentinschicht und werden auch als Pulpakammerdach und Pulpakammerboden beschrieben (58). Das im Wurzelbereich befindliche Lumen wird als Wurzelkanal bezeichnet und verbindet die Pulpakammer mit dem Periapex während es sich apikal verjüngt und als Foramen apicale ins Parodontium mündet (58). Der Bereich des schmalsten Durchmessers des Wurzelkanals wird als apikale Konstriktion bezeichnet und bildet das Foramen physiologicum (60). Oft befindet sich in diesem Bereich der Übergang von Wurzelzement und Dentin. Dieser Bereich wird auch als „cemento-dentinal junction“ bezeichnet (60). Vor seinem Übertritt in den Zementmantel des Apex kann sich der Wurzelkanal in mehrere divergierende Äste aufteilen, dies wird als Ramifikation oder apikales Delta bezeichnet und betrifft häufiger mehrwurzelige Zähne als einwurzelige Zähne (58). Dadurch ergeben sich zentrale Hauptforamina und periphere Nebenforamina (58). Nicht selten ist eine vielgestaltige Darstellung der Wurzelkanäle durch die Präsenz von akzessorischen Kanälen und Anastomosen vorzufinden, sodass man allgemein von einem Wurzelkanalsystem sprechen muss (58). Die akzessorischen Kanäle sind senkrecht oder fast senkrecht verlaufende Verbindungen des Wurzelkanals zum Parodontalraum und sind häufiger in Prämolaren und Molaren vorzufinden als in den Inzisiven (58, 61). Die Präsenz von akzessorischen Kanälen sind im apikalen Drittel mit 17.0% häufiger zu beobachten als im medialen Drittel (8.8%) und im koronalen Drittel (1.6%) (61). Als Anastomosen werden hingegen seitliche Querverbindungen zwischen mindestens zwei Wurzelkanälen bezeichnet. Sie sind in der Regel seltener vorzufinden als akzessorische Kanäle und der größte Anteil befindet sich im medialen Drittel der Wurzel (62).

Die Pulpakammer und das Wurzelkanalsystem unterliegen einer ständigen Veränderung, zumal die kontinuierliche Apposition des Sekundärdentins pulpawärts die anfänglich ausgeprägten Pulparäume juveniler Zähne immer weiter einengt (63, 64) und sogar fast zu deren vollständigen Obliteration führen kann (65). Zum anderen führen äußere Reize wie Karies, Abrasion oder Erosion zu Pulpairritationen, wodurch als defensive Reizantwort die Entstehung des Tertiärdentins von pulpalen Ersatzzellen zum Schutz vor weiteren Reizen angeregt wird (58, 66). Somit können wir davon ausgehen, dass die interne Wurzelkanalmorphologie einer ständigen Veränderung

unterliegt. Zudem sind populations-, geschlechter- und altersspezifische morphologische Unterschiede Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen.

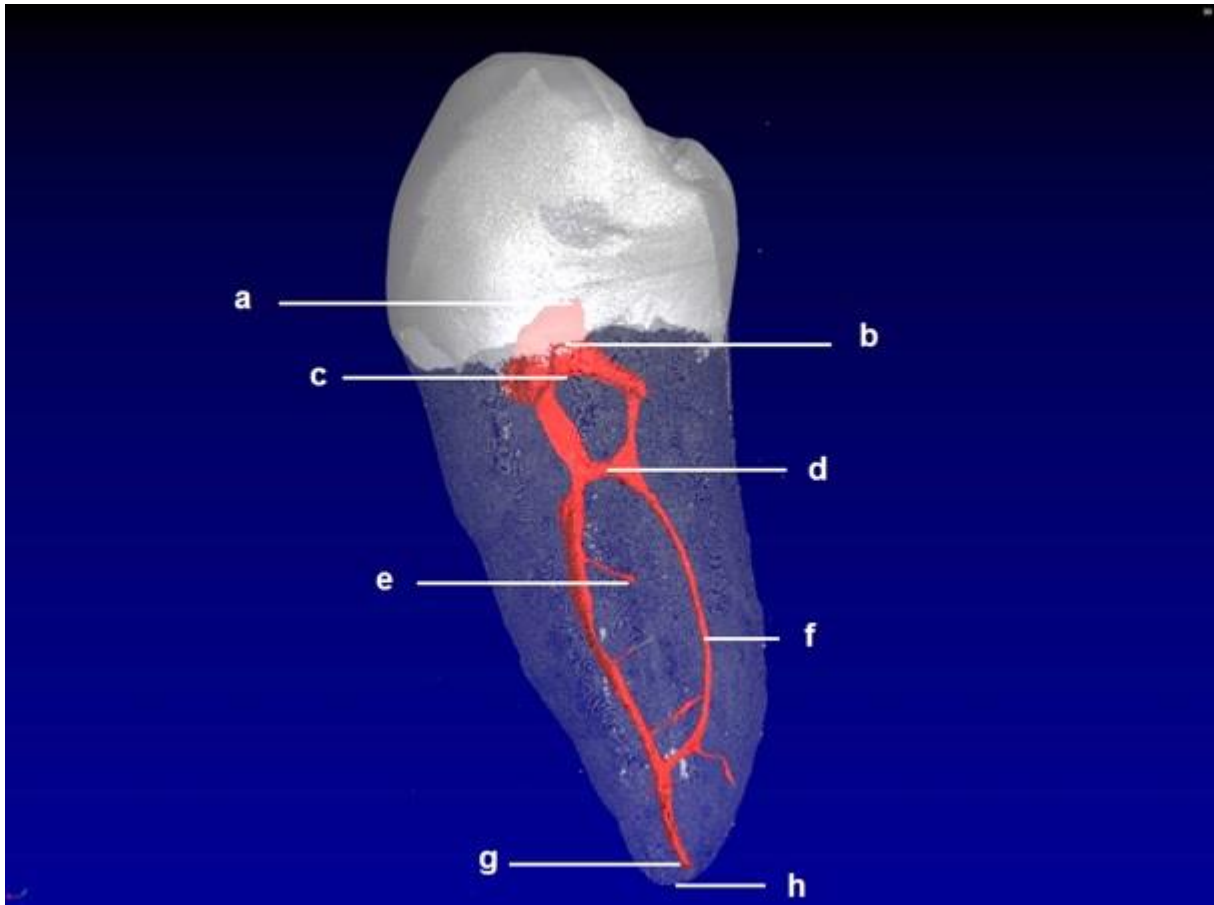


Abbildung 2: Micro-CT Aufnahme: a: Pulpakammerdach, b: Pulpakammer, c: Pulpakammerboden, d: Anastomose, e: Akzessorischer Kanal, f: Wurzelkanal, g: Apikales Foramen, h: Anatomischer Apex

2.2 Untersuchungsmethoden

Seit der Veröffentlichung der wissenschaftlichen Werke „Geschichtliche Übersicht der Zahnheilkunde, Vol. 1. Wien, 1831“ und „Systemisches Handbuch der Zahnheilkunde. Anatomie des Mundes, Vol. 2. Braumüller und Seidel, Wien, 1844“ gilt der ungarisch-österreichischer Zahnarzt Georg Carabelli als Avantgardist in der Erforschung und der ausführlichen und systematischen Darstellung der Wurzelkanalmorphologie (67), denn zuvor hatte man nur eine vage Vorstellung über die Innenmorphologie der Zähne. Die Werke Carabellis aus dem 19. Jahrhundert enthielten bereits Längs- und Querschnitte von Zähnen zur genauen Veranschaulichung des Endodonts und seines Aufbaus (67). Die stetige technologische Weiterentwicklung führte schließlich zu weiteren Untersuchungen und zur Veröffentlichung der renommierten Studien des letzten Jahrhunderts. Dazu zählen unter anderem die Werke von Preiswerk (1903), Fischer (1907), Hess (1917) und Fasoli & Arlotta (1913). Diese trugen dazu bei ein besseres Verständnis über das komplexe Wurzelkanalsystem menschlicher Zähne zu bekommen. Heutzutage können durch dreidimensionale Wiedergabemethoden detailreiche Bilder hergestellt werden und ermöglichen die genauere Betrachtung des komplexen Wurzelkanalsystems aus allen Ebenen und führen die Herausforderungen einer endodontischen Behandlung nochmals vor Augen.

Zur Untersuchung des internen Wurzelkanalsystems können verschiedene Methoden angewendet werden. Grundsätzlich können sie „in vivo“, also am lebenden Patienten, oder „ex vivo“, an extrahierten Zähnen, durchgeführt werden. Zudem gibt es eine Unterteilung in destruktive und non-destruktive Verfahren, in denen das Präparat zur Erforschung entweder zerstört werden muss oder fast vollständig erhalten bleiben kann. Zu den destruktiven Verfahren gehören histologische Schnitte und Hartgewebe-Schliffpräparate, die Ausgussmethode und Korrosionsmethode oder die Transparenzmethode. Zu den non-destruktiven Verfahren gehören alle Röntgenaufnahme-techniken wie die konventionelle zweidimensionale Röntgentechnik, die Computertomographie, die digitale Volumetomographie oder das Micro-CT.

2.2.1 Histologische Schnitte und Hartgewebe-Schliffpräparate

Die im Jahre 1844 publizierte detaillierte Beschreibung des Wurzelkanalsystems (68) durch Carabelli wurde mit Hilfe von Hartgewebe-Schliffpräparaten durchgeführt, die durch Längs- und Querschnitte die Anzahl und die Richtungen der Wurzelkanäle erstmalig offenlegten. Bedauerlicherweise war Carabelli seiner Zeit zu weit voraus, somit stießen seine Studien auf wenig Interesse in der wissenschaftlichen Welt. Erst Mühlreiters und Blacks Untersuchungen von Schliffpräparaten und der systematischen Beschreibung der internen sowie der externen Zahnmorphologie im Jahre 1870 (69) und 1890 (34) erweckten das öffentliche Interesse und trieben die wissenschaftliche Erforschung der Zähne weiter voran.

1894 veröffentlichten Gysi und Röse die ersten Mikrophotographien zur Veranschaulichung der mikroskopischen Struktur menschlicher Zähne (70). Diese Sammlung enthielt unter anderem detailreiche Bilder des Pulpa-Dentin Komplexes mit den darin enthaltenen Odontoblasten und Bindegewebszellen. Damit gilt diese Sammlung als eine der ersten genaueren Darstellungen der internen Wurzelkanalmorphologie.

2.2.2 Korrosionsmethode und Ausgussmethode

Preiswerk wandte 1903 erstmalig die Korrosionsmethode an, um die interne Wurzelkanalmorphologie von Oberkiefer- und Unterkieferzähnen darzustellen (71). Dies war ein langwieriger Prozess, denn die Zähne mussten zuvor 3 Wochen lang mazerieren bevor die Wurzeln in Vliespapier umwickelt aufrecht in Gips aufgestellt werden konnten. Nach vorheriger Bohrung bis zur Pulpahöhle, dem Anlegen eines mit Leim fixierten Trichters und nach erfolgter Vorwärmung wurde Wood'sches Metall kontinuierlich in den Trichter eingeschmolzen bis die Metallsäule eine gewisse Höhe erreicht hatte, um genügend Druck aufzubauen und das flüssige Metall in feinere Kanäle einzupressen. Nach dem Abkühlen mussten die Zähne bei einer Temperatur von 40°-50°C in 20%iger Kalilauge für 3-4 Wochen dekalzifizieren, woraufhin der dreidimensionale Metallkern zum Vorschein kam. Der Nachteil dieser Methode war nicht nur der langwierige Prozess und die vollständige Zerstörung des Präparates, sondern auch der Umstand, dass das Metall nicht in feinere Äste des Wurzelkanals penetrieren und diese nicht darstellen konnte. Dennoch konnte Preiswerk mit seinen Präparaten die

Präsenz von Anastomosen nachweisen, die nicht selten im Wurzelkanalsystem vorzufinden waren und zeigte nochmals die Komplexität des Wurzelkanalsystems auf. Zudem fand er heraus, dass in großer Häufigkeit diese Anastomosen in den mesiobukkalen Wurzeln der oberen Molaren sowie in den mesialen Wurzeln der unteren Molaren präsent waren.

1907 modifizierte Fischer die zuvor von Preiswerk angewandte Methode, um das Problem nicht dargestellter feiner Seitenäste des Wurzelkanals zu umgehen, indem er Anstelle des Metalls verdünnte Zelluloidflüssigkeit verwendete (72). Ungefähr 700 Zähne wurden mit dieser Ausgussmethode behandelt und nach 2-3 wöchiger Aushärtungszeit konnte man ein dreidimensionales Wurzelkanalsystem mit Darstellungen feinsten Verästelungen vorfinden. Dennoch war es nicht unüblich, dass die fragile Natur des Zelluloids zu Frakturen der feineren Verästelungen führte und infolgedessen die Vollständigkeit der Darstellungen nicht gewährleistet werden konnte. Fischer legte den Fokus auf die Untersuchung der Verästelungen des Wurzelkanals, der akzessorischen Kanäle, der Anastomosen und der Einwirkung pathologischer und physiologischer Einflüsse auf die Bildung der Wurzelkanäle und deren apikalen Verzweigungen. Schlussendlich kam er zu dem Ergebnis, dass die vollständige Entfernung der Pulpa der oberen Weisheitszähnen, Molaren und Prämolaren aufgrund ihres komplexen internen Aufbaus nicht immer möglich war (73).

1917 griff Hess die Arbeiten von Preiswerk, Fischer und weiterer Autoren auf und führte eine groß angelegte Untersuchung von 2800 Präparaten durch (73). Verschiedene Untersuchungsmethoden vorheriger Autoren wurden von Hess nochmals überprüft und die Vor- und Nachteile jeder dieser Methoden beschrieben. Nach gründlicher Evaluation entschied sich Hess schließlich für die Ausgussmethode nach Fischer und modifizierte sie, um die Nachteile dieser Methode zu eliminieren. Zu der Modifikation gehörte auch die Verwendung von Kautschuk mit anschließender Vulkanisation anstelle des instabilen Zelluloids. Mit Hilfe dieser makroskopischen Untersuchung und einer zusätzlich mikroskopischen Betrachtung von Schliffpräparaten konnte Hess eine systematische Charakterisierung jedes einzelnen menschlichen Zahntyps durchführen. Hess beschrieb nicht nur die interne Morphologie der Zähne wie die Präsenz und Lage von Anastomosen, akzessorischen Kanälen, seitlichen Kanalverästelungen und apikalen Pulpaverästelungen, sondern stellte auch deren Zusammenhang zum Alter des Patienten her, wonach aufgrund der nicht fortgeschrit-

tenen Dentinapposition juvenile Zähne eine einfache Morphologie aufwiesen und sich diese mit fortschreitendem Alter in ein komplexeres Wurzelkanalsystem differenzierten. Die oben genannten Untersuchungsmethoden waren zu ihrer Zeit innovativ, bedauerlicherweise erforderten diese jedoch die vollständige Zerstörung des Zahnes, wodurch eine genaue Beziehung des internen Wurzelkanalsystems zum vollständigen Zahn nicht genau darzustellen war. Dies änderte sich mit der Einführung des Aufhellungsverfahrens.

2.2.3 Aufhellungsverfahren

Der deutsche Anatom Werner Spalteholz veröffentlichte 1911 ein neues Verfahren „zum Durchsichtigmachen von menschlichen und tierischen Präparaten“ (74), welches Wissenschaftler nun ermöglichte selektiv gefärbte Gewebe und Hohlräume zu studieren.

Zwei Jahre danach nutzte Adloff dieses Verfahren für sich, um die Beziehungen des Pulpahohlraumes ganzheitlich zum Zahn zu studieren (75). In die Hohlräume der zuvor präparierten Zähne wurde, ähnlich dem Korrosionsverfahren nach Preiswerk, Wood'sches Metall geschleudert. Diese wurden dann in Folge dekalzifiziert, dehydriert und in Zedernholzöl aufgehellt bevor sie in Kanadabalsam eingebettet wurden. Somit hatte man eine vollständige Darstellung der internen sowie externen Morphologie des Präparates. Trotz des Vorteils der gesamtheitlichen Betrachtung des Zahnes, blieb der Nachteil des Korrosionsverfahrens weiterhin bestehen und feinere Verästelungen des Wurzelkanals konnten nicht abgebildet werden.

Fasoli und Arlotta veröffentlichten ihrerseits eine Untersuchungen mit einer weiteren Modifikation dieses Verfahrens (76). Die Zähne wurden dabei für einige Tage bei einer Temperatur von 30°C mazeriert. Nach Eröffnung der Pulpahöhle erfolgte die Reinigung des Wurzelkanals, dabei wurde der Nerv vorsichtig mittels Extraktors entfernt bevor das restliche Gewebe in einer 5%igen Sodalösung ausgekocht wurde. Nach der vollständigen Reinigung der Wurzelkanäle erfolgte die Injektion eines Färbemittels. Danach wurden die Zähne in Formalin fixiert, dekalzifiziert und mit einer aufsteigenden Alkoholreihe dehydriert bevor sie nach dem von Spalteholz veröffent-

lichten Verfahren aufgeheilt wurden. Dieses Verfahren wird heutzutage noch, teils weiter modifiziert, angewandt und ist im Englischen als Clearing-Technique bekannt.

Mit Hilfe der Clearing-Technik führten Vertucci et al. umfangreiche Studien zur Untersuchung der morphologischen Variationen der Wurzelkanäle durch (6, 8, 77, 78) und die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden zum Teil immer noch die Grundlagen neuerer Studien. Die angewandte Clearing-Technik wurde seitdem von vielen Wissenschaftlern als Goldstandard in der Erforschung der internen Wurzelkanalmorphologie erachtet und werden weiterhin benutzt (15, 79, 80).

2.2.4 Konventionelle Röntgentechnik

Als eines der ersten non-destruktiven Verfahren führte Mueller AH. im Jahre 1933 die röntgenologische Untersuchung von Zähnen ein. Dabei wurden 1394 zuvor extrahierte Oberkiefer und Unterkiefer Inzisiven, Canini und Prämolaren untersucht, indem er diese in labiolingualer oder buccolingualer und zusätzlich in mesiodistaler Richtung röntgte (81). Einige der Zähne wurden vorher mit Guttapercha befüllt. Die röntgenologische Aufnahme aus zwei Richtungen ermöglichte die Detektion von zusätzlichen Wurzeln und Wurzelkanälen, die sonst durch Überlagerungen aufgrund der zweidimensionalen Bildbetrachtung verborgen geblieben wären. Dennoch erwähnte der Autor, dass die Präsenz von Wurzelkanalkrümmungen die Detektion aller Kanäle, trotz der röntgenologischen Aufnahme aus zwei Ebenen, erschwere und eine Fehlerfreiheit nicht gewährleistet werden kann.

Auch Nattress und Martin kamen bei der röntgenologischen Untersuchung von 455 extrahierten Inzisiven und 340 mandibulären Prämolaren zu dem Ergebnis, dass bei der buccolingualen Betrachtung der Zähne die Präsenz eines zweiten Kanals in ein Drittel aller Fälle missinterpretiert wurde und somit die röntgenologische Diagnostik für den Behandler nur als zusätzliches Hilfsmittel zur Beurteilung der Wurzelkanalmorphologie dienen sollte (82). Aufgrund der qualitativen Unterlegenheit der konventionellen Röntgentechnik in Bezug auf Präzision und Detailwiedergabe gegenüber den heutzutage modernen Verfahren wie die Computertomographie, digitale Volumetomographie und Micro-CT kann eine akkurate Beurteilung des dreidimensiona-

len Wurzelkanalsystems durch eine zweidimensionale Bildbetrachtung nicht suffizient durchgeführt werden (83).

2.2.5 Computertomographie

Die Entwicklung der Computertomographie durch den britischen Elektrotechniker und Nobelpreisträger für Medizin Hounsfield im Jahre 1973 brachte einen signifikanten Fortschritt in der medizinischen Diagnostik mit sich (84), denn nun war man in der Lage überlagerungsfreie, dreidimensionale Darstellung von verschiedenen Körperstrukturen herzustellen. Vereinfacht formuliert ist die Funktionsweise des CTs die Erzeugung von zweidimensionalen Schnittbildern durch die Errechnung der aus dem Körper austretenden Röntgensignalen und deren Absorptionswerten. Hierfür werden aus verschiedenen Richtungen aufgenommene Röntgenaufnahmen ausgewertet und digitale zweidimensionale Schnittbilder hergestellt. Diese wiederum werden rechnerisch zu einem dreidimensionalen Bild rekonstruiert, womit man somit in der Lage ist das Objekt aus allen Winkeln zu betrachten.

Die Japaner Tachibana und Matsumoto empfahlen 1990 die Anwendung der Computertomographie auch im Bereich der Endodontie in Betracht zu ziehen (85). Männliche Probanden im Alter von 24, 28 und 37 wurden für diese Studie untersucht. Nach dem CT-Scan wurden die Schnittbilder zur dreidimensionalen Visualisierung und Analyse rekonstruiert und die maxillären sowie die mandibulären Zähne begutachtet. Man war in der Lage die anatomischen Konfigurationen der Zähne sowie auch die Relation zum Parodont zu beurteilen. Weiterhin untersuchte man die Anzahl und Lokalisation der Wurzeln, die Wurzelkanalkonfigurationen, die buccolingualen und die mesiodistalen Durchmesser der Zähne sowie die Präsenz oder die Absenz von Wurzelkanalfüllungsmaterialien. Dies stellte eine Neuheit in der non-destruktiven, dreidimensionalen In-vivo Untersuchungen dar. Der große Nachteil jedoch lag in der hohen Strahlenbelastung, der langen Untersuchungsdauer, der hohen finanziellen Kosten und in der niedrigen räumlichen Auflösung zur genauen und detaillierten Beurteilungen der Strukturen. Dies bewegte die Autoren dazu die Entwicklung von geeigneten Computersoftware zu empfehlen, um die Vorteile der Computertomographie auch für dentale Zwecke nutzen zu können.

2.2.6 Digitale Volumentomographie

Die Nutzung der digitalen Volumentomographie, im Englischen aufgrund des kegelförmigen Röntgenstrahls auch Cone-beam computerized tomography (CBCT) genannt, wurde erst durch die Entwicklung des CBCT-Algorithmus durch Feldkamp et al. im Jahre 1984 möglich (86). Diesen Algorithmus nutzten wiederum die Japaner Arai et al. (87) und die Italiener Mozzo et al. (88), um in den 90er Jahren unabhängig voneinander den CBCT-Scanner zur Diagnostik des maxillofazialen und dentalen Bereichs zu verwenden. Diese technologische Erweiterung erweckte das Interesse weiterer Forschungsgruppen und trieb die Weiterentwicklung der CBCT-Scanner und Softwares rapide voran.

Heutzutage werden die digitale Volumentomographie und ihre Modifikationen in verschiedenen Bereichen der Medizin genutzt. So sind sie im Bereich der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie, Traumatologie und in der Zahnmedizin als diagnostisches Mittel nicht mehr wegzudenken. Der Vorteil der digitalen Volumentomographie gegenüber der konventionellen Computertomographie ist nicht nur die deutlich verkürzte Scandauer mit einer geringeren Strahlenbelastung des Patienten, der geringere finanzielle Aufwand für die Herstellung und Erwerb der Scanner, sondern auch die höhere Detailgenauigkeit gegenüber der herkömmlichen Computertomographie, denn durch die Weiterentwicklung der Scanner und der Computersoftwares war man in der Lage die Schichtstärke der Aufnahmen deutlich zu reduzieren und ein höheres Auflösungsvermögen zu erzielen. Mit der Entwicklung der digitalen Volumentomographie war es nun möglich routinemäßige am Patienten in-vivo Diagnosen durchzuführen. Dies ermöglichte verschiedene Autoren aus einer großen Anzahl an vorhandenen CBCT Datensätzen die interne Wurzelkanalmorphologie von Zähnen zu untersuchen, ohne dass diese vorher extrahiert werden mussten (16-18, 20-22, 26, 27, 30, 33, 89, 90). Einige Studien belegen, dass feinste Seitenkanäle des Wurzelkanalsystems dennoch von CBCT-Scannern nicht detektiert werden können. Die Detektion kleinster Strukturen wurde durch den Einsatz des Micro-CTs möglich.

2.2.7 Micro-CT

Elliot und Dover entwickelten 1981 den ersten hochauflösenden Micro-CT mit einer Auflösung von 15 µm, um das Schneckengehäuse der *Biomphalaria glabrata* dreidimensional zu rekonstruieren (91). 3 Jahre später untersuchten sie die Histomorphometrie eines menschlichen Oberschenkelknochens mittels Micro-CT (92) und konnten somit das hohe Potenzial des neu entwickelten Scanners für diagnostische Zwecke aufzeigen. Der Name Micro leitet sich von der Pixelgröße der digitalen Schnittbilder ab, die sich im Mikrobereich befindet und somit hochauflösende Darstellungen ermöglicht.

Als eine der ersten Autoren empfahlen Nielsen et al. das Micro-CT auch für endodontische Untersuchungen zu nutzen (52). Sie benutzten die Micro-CT Technologie, um die externe und interne Anatomie von vier zuvor extrahierten maxillären, stark kalzifizierten Molaren zu untersuchen. Dabei wurden diese jeweils vor und nach der Aufbereitung und Obturation der Wurzelkanäle gescannt und die unterschiedlichen Strukturen konnten isoliert betrachtet werden. Damit war es erstmals möglich Volumenveränderungen innerhalb der Wurzelkanäle zu registrieren. Zudem bezeichneten auch sie die Möglichkeit Zähne ohne vorherige Destruktion und ohne Überlagerungen, wie dies bei zweidimensionalen Bildern der Fall wäre, dreidimensional zu untersuchen als klaren Vorteil gegenüber den herkömmlichen Methoden. Einen Vorteil sah man aber auch gegenüber der konventionellen Computertomographie, die eine niedrigere Auflösung aufwies und somit keine detaillierten Abbildungen von feinsten Strukturen darstellen konnte.

2.3 Wurzelkanal-Klassifikationen

2.3.1 Klassifikation nach Weine

Durch die Vielzahl an Wurzelkanalkonfigurationen war die Einführung einer Klassifikation zur Beschreibung der internen Wurzelkanalmorphologie notwendig. Die erste bekannte und relativ einfache Wurzelkanal-Klassifikation publizierte Okumura im Rahmen des 16. internationalen Dental Kongresses in Philadelphia im Jahre 1927 (93). Franklin S. Weine führte 1969 mit der Untersuchung der Wurzelkanalkonfiguration der mesiobuccalen Wurzel des oberen ersten Molaren (56) eine weitere Klassifikation ein. Dabei wurden 208 extrahierte obere erste Molaren freigelegt und deren Wurzelkanäle begutachtet. Eine Klassifikation mit drei Typen wurde eingeführt, welches 1982 (94) um einen weiteren Typ ergänzt wurde.

Typ I. 1-1	Ein Kanal verläuft von der Pulpakammer zum Apex
Typ II. 2-1	Zwei Kanäle verlassen die Pulpakammer und vereinigen sich schließlich zu einem apikalen Foramen
Typ III. 2-2	Zwei Kanäle verlassen die Pulpakammer und bilden zwei separate apikale Foramina
Typ IV. 1-2	Ein Kanal verlässt die Pulpakammer bevor sie sich schließlich in zwei separate Kanäle teilt

Tabelle 1: Wurzelkanal-Klassifikation nach Weine (94)

2.3.2 Klassifikation nach Vertucci

Die von Weine eingeführte Einteilung in vier Typen reichte jedoch nicht, um die große Menge an verschiedenen Wurzelkanalkonfigurationen zu kategorisieren. Dies veranlasste im Jahre 1974 Frank J. Vertucci dazu mit der Untersuchung der internen Wurzelkanalmorphologie von 200 maxillären Prämolaren (77) eine eigene Klassifikation einzuführen. Dabei wurden die von verschiedenen chirurgischen Praxen gesammelten Zähne mittels der Clearing-Technik präpariert und untersucht. Die nach der Extraktion in 10%iger Formaldehydlösung aufbewahrten Zähne wurden in 5%iger Salzsäure-Lösung dekalzifiziert. Nach gründlicher Spülung der Präparate mit Wasser wurden diese für 24 Stunden in 5%igem Kaliumhydroxid eingelegt. Anschließend wurde das Färbemittel Hämatoxylin in die Pulpakavität injiziert. Nach der Färbung wurden die Zähne für jeweils 5 Stunden in 70%, 95% und 100%iger Alkohol-Lösung dehydriert und schließlich zur stereomikroskopischen Begutachtung in klares Gießharz eingelegt. Vertucci untersuchte die Anzahl und Lokalisation der Wurzelkanäle, der akzessorischen Kanäle, der apikalen Foramina und der Anastomosen und unterteilte die Präparate in acht unterschiedliche Typen.

Typ I. 1-1	Ein Kanal verläuft von der Pulpakammer zum Apex
Typ II. 2-1	Zwei Kanäle verlassen die Pulpakammer und vereinigen sich zu einem Kanal
Typ III. 1-2-1	Ein Kanal verlässt die Pulpakammer, teilt sich in zwei Kanäle und vereinigt sich schließlich wieder zu einem Kanal
Typ IV. 2-2	Zwei separate Kanäle verlaufen von der Pulpakammer zum Apex
Typ V. 1-2	Ein Kanal verlässt die Pulpakammer bevor sie sich schließlich in zwei separate Kanäle teilt
Typ VI. 2-1-2	Zwei Kanäle verlassen die Pulpakammer, vereinigen sich zu einem Kanal und verlaufen wieder als zwei getrennte Kanäle zum Apex
Typ VII. 1-2-1-2	Ein Kanal verlässt die Pulpakammer, trennt sich in zwei Kanäle, vereinigt sich wieder zu einem Kanal, bevor er wieder als zwei Kanäle zum Apex verläuft
Typ VIII. 3-3	Drei separate Kanäle verlaufen von der Pulpakammer zum Apex

Tabelle 2: Wurzelkanal-Klassifikation nach Vertucci 1974 (77)

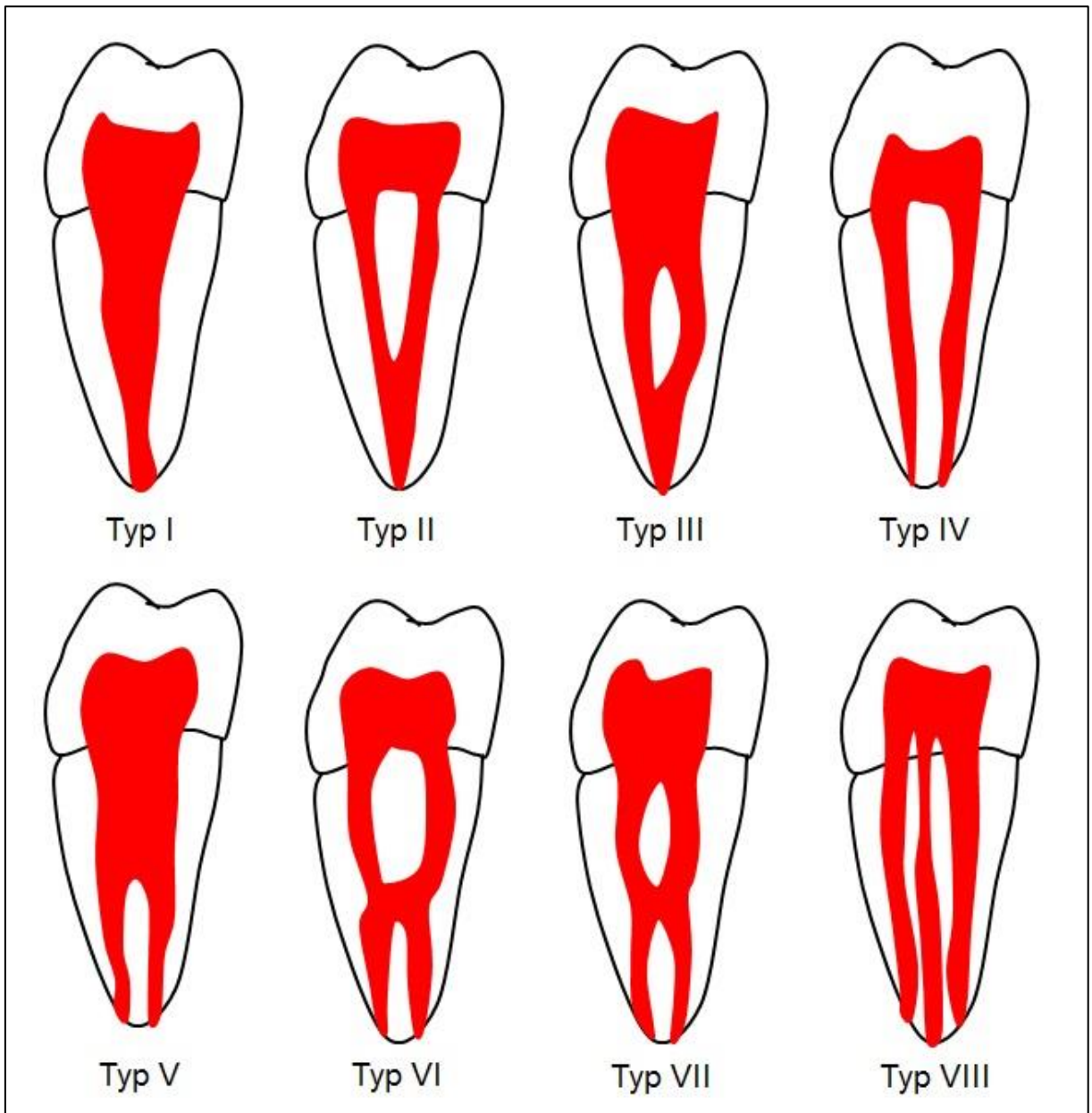


Abbildung 3: Wurzelkanal-Klassifikation nach Vertucci. Typ I-VIII

2.3.3 Vierziffriges-Codesystem

Die von Weine et al. (56) und Vertucci et al. (77) empfohlenen Klassifizierungen werden in der Literatur häufig benutzt und sind zur Beschreibung vieler Wurzelkanal-Konfigurationen vorteilhaft. Jedoch wurde durch die Entwicklung hochpräziser diagnostischer Geräte wie das Micro-CT die Komplexität der Wurzelkanal-Morphologie nochmals vor Augen geführt und neu detektierte komplexere Strukturen konnten somit nicht mehr in die zuvor bewährten Klassifikationen eingeordnet werden (95).

Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit für die Kategorisierung der untersuchten Wurzelkanal-Konfigurationen ein vierziffriges-Codesystem verwendet, welches von Briseño-Marroquín B et al. in der Studie zur Untersuchung der Wurzelkanal-Morphologie von 179 maxillären primären Molaren empfohlen wurde (57). Dabei wurde die Wurzel in drei Drittel unterteilt. Die erste, zweite und die dritte Ziffer geben jeweils die Anzahl der Wurzelkanäle im koronalen, mittleren und dem apikalen Drittel der Wurzel wieder. Die vierte Ziffer wird durch einen Schrägstrich hervorgehoben und gibt die Anzahl der Hauptforamina wieder. Als Hauptforamen wurden jene Foramina definiert, die einen Durchmesser von mindestens 0.2 mm aufwiesen. Wiesen sie Werte unterhalb von 0.2 mm auf, wurden diese als Nebenforamina beschrieben.

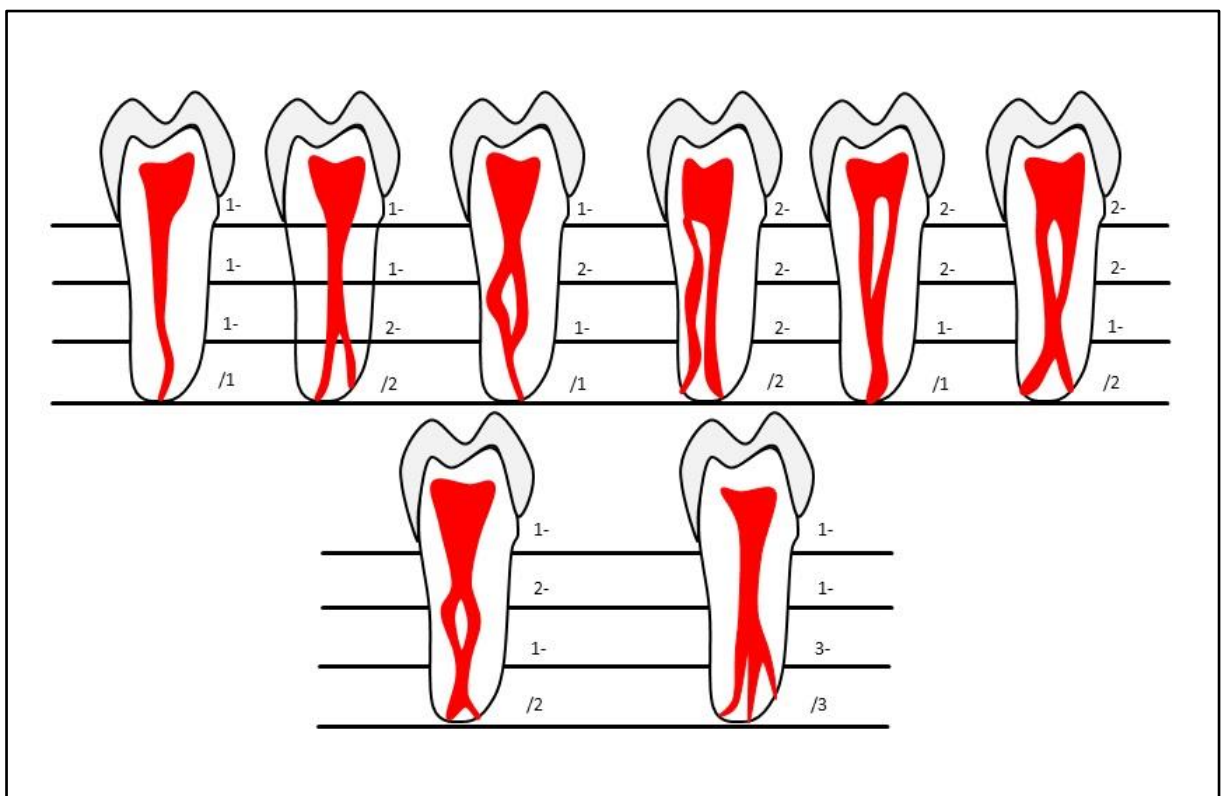


Abbildung 4: Vierziffriges-Codesystem nach Briseño-Marroquín B et al.

In diesem vierziffrigen-Codesystem können bestimmte Konfigurationen, im direkten Vergleich, verschiedenen Typen der Klassifikation von Vertucci et al. (77) zugeordnet werden. Jedoch können, je nach Höhe der Kanalvereinigung, mehrere Konfigurationen einem Vertucci Typen entsprechen. Dies bedeutet, dass man die Konfigurationen 1-1-1/2, 1-1-2/2 und 1-2-2/2 dem Vertucci Typen V (1-2) zuordnen könnte. Für die Übersicht wurde eine Tabelle mit den äquivalenten Klassifikation nach Vertucci et al. (77), Weine et al. (96) und Briseño-Marroquín B et al. (57) erstellt.

Vertucci	I 1	II 2-1	III 1-2-1	IV 2-2	V 1-2	VI 2-1-2	VII 1-2-1-2	VIII 3-3	*
Weine	I	II		III	IV				*
Briseño	1-1- 1/1	2-2- 1/1	1-2- 1/1	2-2-2- /2	1-1- 2/2	2-1- 2/2	1-2- 1/2	1-1- 3/3	*

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Klassifikationen nach Vertucci et al., Weine et al., Briseño-Marroquín B et al.

2.4 Der erste mandibuläre Prämolare

Der Erfolg einer endodontischen Behandlung hängt von der suffizienten Aufbereitung, Desinfektion und Obturation des gesamten Wurzelkanalsystems ab, dies setzt jedoch genaue Kenntnisse über die interne Morphologie der Zähne voraus (6, 56). Die ersten anatomischen Forschungen menschlicher Zähne führte Carabelli zu Beginn des 19. Jahrhunderts durch (68), welche jedoch nicht die Komplexität der internen Morphologie aufzeigen konnten. Erst durch die Werke von Preiswerk (71), Fischer (72) und Hess (73) konnte man sich ein Bild von dem komplizierten Aufbau des Wurzelkanalsystems mit seinen akzessorischen Kanälen, Anastomosen und Ramifikationen machen. Weitere Wissenschaftler nutzten die technologischen Erneuerungen, um detaillierte Studien ihrerseits zu publizieren. Mit der Einführung von Klassifikationen des Wurzelkanalsystems wie durch Okamura (93), Weine (56), Vertucci (77) und vielen weiteren Autoren war es nun möglich diese interne Variabilität systematisch zu kategorisieren.

Die Dentition des ersten mandibulären Prämolars erfolgt im Durchschnitt zwischen dem 10. und 12. Lebensjahr (97). Die Lingualkippung der Krone wird Kronenflucht genannt und ist das gemeinsame Merkmal der mandibulären posterioren Zähne. Im Inneren des Zahnes findet man im Regelfall zwei Pulpahörner, bei denen der bukkale Anteil spitz und der linguale Anteil rund geformt ist (42). Aufgrund der ausgeprägten Kronenflucht und des kleineren lingualen Höckers, erfolgt die Zugangskavität vestibulär der Zentralfissur, dies bedeutet auch die teilweise Entfernung des tragenden Höckers (67). Der in orovestibulär gerichtete ovale Umriss der Wurzel spiegelt sich auch im Umriss des koronalen Wurzelkanalanteils wider (67). Im Verlauf zur Wurzelmitte hin besteht die Tendenz, dass der ursprünglich ovale Wurzelkanal eine runde Form annimmt. Sind zwei Kanäle vorhanden, scheinen diese von der Pulpakammer aus zum Foramen hin durchgehend rund zu sein (42). In der Regel weisen die mandibulären primären Promolaren eine Wurzel auf, es sind jedoch auch Fälle bekannt in denen zwei (1.8%), drei (0.2%) oder vier (0.1%) Wurzeln beobachtet wurden, diese stellen jedoch eine Seltenheit dar (98). Viele Studien befassten sich schon mit der Untersuchung der internen Morphologie der ersten mandibulären Prämolaren, denn aufgrund der hohen Variabilität des Wurzelkanalsystems werden sie als schwierig endodontisch zu behandelnde Zähne erachtet (99). Der alters-, geschlech-

ter- oder populationsspezifische Einfluss wird zudem wissenschaftlich diskutiert (16, 17, 21, 26, 27, 73, 90, 100-104).

2.4.1 Wurzelkanalkonfigurationen

Bei den Untersuchungen der mandibulären Prämolaren lag die Inzidenz der Wurzelkanalkonfiguration nach Vertucci (77) Typ I am höchsten, gefolgt von Typ V (6, 9-11, 13, 14, 16, 18-20, 22-27, 30-36, 42, 44). In einigen Fällen war die zweithäufigste Konfiguration jedoch auch in Typ IV zu beobachten (15, 17, 29, 37, 39, 41, 43).

1972 führten Pineda und Kuttler eine mesiodistale und buccolinguale röntgenologische Untersuchung von 4183 zuvor extrahierten Zähnen (45) durch. Von insgesamt 202 untersuchten mandibulären primären Prämolaren entsprachen 69.3% der Wurzelkanalkonfiguration Typ I nach Vertucci, 23.4% Typ II, 4.9% Typ III und 1.5% Typ IV. Apikal waren 74.2% einkanalig, 24.9% zweikanalig und 0.9% waren dreikanalig.

Auch Zillich et al. (49) führten 1973 eine mesiodistale und buccolingale röntgenologische Untersuchung von 1393 zuvor extrahierten mandibulären primären Prämolaren und 938 sekundären Prämolaren durch. 69% der primären Prämolaren waren einkanalig, davon waren in 1.5% ein akzessorischer Kanal und in 1.8% ein Nebenforamen vorzufinden. 22.7% waren zweikanalig, davon 5.2% mit einem physiologischen Foramen und 17.5% mit zwei Foramina.

1984 untersuchte Vertucci in den USA die Wurzelkanalmorphologie von 2400 zuvor extrahierten Zähnen erwachsener Patienten mittels der Clearing-Technik und kategorisierte diese in acht verschiedene Typen (6). Der Extraktionsgrund sowie das Alter, das Geschlecht und die Ethnie der Patienten wurden nicht dokumentiert. Insgesamt wurden dabei 400 mandibuläre primäre Prämolaren untersucht. 74% aller untersuchten Präparate wiesen jeweils einen Kanal im Apex auf, davon waren 70% durchgehend einkanalig und wurden so dem Vertucci Typen I zugeordnet. 25.5% der Präparate wiesen zwei Kanäle im Apex auf, davon waren 24% koronal einkanalig bevor der Kanal sich vor dem Apex zweiteilte und so dem Typen V zugeordnet werden konnte. In 0.5% der untersuchten Präparate verliefen 3 Kanäle im Apex.

Rahimi et al. untersuchten die Wurzelkanalkonfigurationen von 163 extrahierten mandibulären Prämolaren einer iranischen Population mittels der Clearing-Technik (42). Hauptindikation für die Extraktion der Zähne waren parodontale Ursachen. Die Untersuchung ergab, dass 2% aller untersuchten Präparate zweiwurzellig waren. Von den 160 einwurzelligen Zähnen waren 70.6% einkanalig, während 27.8% zweikanalig und 1.2% dreikanalig waren (Vertucci 70%, 25.5%, 0.5%). Im Apex waren in Bezug auf die Anzahl der Kanäle folgendes vorzufinden: ein Kanal (76.2%), zwei Kanäle (23.1%) und drei Kanäle (0.6%). Somit entsprach dies den Ergebnissen von Vertucci (6), dennoch war eine leichte Diskrepanz in den Konfigurationstypen selbst zu beobachten. Der Konfigurationstyp V war konträr zu Vertuccis Beobachtungen (24%) lediglich in 16.9% zu beobachten, vertreten waren zudem Typ II (1.9%), Typ III (3.8%), Typ IV (3.8%), Typ VI (1.2%), Typ VII (0.6%) und 1.2% mit dreikanalige Konfigurationen.

Corbella et al. untersuchten CBCT-Bilder von 97 mandibulären primären Prämolaren hellhäutiger, in Italien geborener Patienten (17). Das Alter und das Geschlecht wurden dokumentiert. 31 männliche und 34 weibliche Patienten wurden untersucht. Die Altersspanne betrug 45.8 ± 17.5 Jahre. Die Wurzelkanalkonfiguration Typ I war mit 79.2% am häufigsten vorzufinden, als zweithäufigste Konfiguration wurde Typ IV mit 11.5% angegeben. Typ II und Typ V waren in 7.3% und 2.1% der Fälle zu beobachten. Somit zeigte sich eine Abweichung in der Präsenz der Typ V- beziehungsweise Typ IV-Konfiguration gegenüber den Untersuchungen von Vertucci und Rahimi et al. Eine Korrelation zwischen dem Alter, dem Geschlecht und der Wurzelkanalkonfiguration konnte nicht festgestellt werden.

OK et al. führten eine CBCT-Untersuchung der maxillären und mandibulären Prämolaren einer türkischen Population durch (27). Dabei wurden 5496 Aufnahmen von 849 Patienten ausgewertet und unter anderem die Anzahl der Wurzelkanäle und die Wurzelkanalkonfigurationen evaluiert. Das Alter (14-84 Jahre), das Geschlecht der Patienten (weiblich, n=421; männlich, n=428) und der Quadrant der Präparate wurden aufgelistet. Von 1471 untersuchten mandibulären primären Prämolaren entsprachen 92.8% dem Typ I, Typ II 0.3%, Typ III 1%, Typ IV 1.4%, Typ V 4.4% und 0.06% dem Typ VIII. Dies unterschied sich erheblich von den Beobachtungen Vertuccis (6), von Rahimi et al. (42) und von Corbella et al (17). Außerdem wurde beobachtet, dass die Inzidenz einkanaliger Wurzeln bei weiblichen Patienten höher war als bei männli-

chen Patienten. Diese wiederum zeigten eine größere Häufigkeit zwei- und dreikanaliger Wurzeln.

Auch die Ergebnisse von Celikten B et al. ergaben ähnliche Resultate. Sie führten eine CBCT-Evaluation der Wurzelkanal-Morphologie der maxillären und mandibulären Prämolaren einer türkisch-zypriotischen Population durch (19). Die Daten von 263 Patienten im Alter von 16-80 Jahren wurden erfasst, das Geschlecht sowie der Quadrant der Präparate wurden dokumentiert. Von insgesamt 506 untersuchten mandibulären primären Prämolaren waren 93.3% im Apex einkanalig und 6.4% zweikanalig, ein dritter Kanal wurde nicht beobachtet. 89.5% der Wurzelkanalkonfigurationen entsprachen dem Typ I, Typ II 0.3%, Typ III 3.5%, Typ IV 0.3% und 6.1% dem Typ V.

Die Ergebnisse von Ok et al., Celikten et al. und Corbella et al. zeigten, dass Abweichungen der Studienergebnisse durch ethnische Unterschiede der untersuchten Population oder der Untersuchungsmethode begründet sein konnten.

2.4.2 Akzessorische Kanäle

Vertuccis Untersuchung (6) ergab, dass akzessorische Kanäle in 44.3% der 400 untersuchten mandibulären primären Prämolaren zu beobachten waren. Diese waren jedoch, abhängig von der Lokalisation innerhalb der Wurzel, in unterschiedlicher Häufigkeit vorhanden. Im zervikalen Bereich betrug die Häufigkeit 4.3%, im mittleren Bereich 16.1% und im apikalen Bereich 78.9%. Das größte Vorkommen war somit im apikalen Drittel der Wurzel zu beobachten.

Calışkan MK et al. (14) verwendeten die Clearing-Technik, um unter anderem das Wurzelkanalsystem von 100 mandibulären primären Prämolaren zu untersuchen. Die Inzidenz akzessorische Kanäle lag mit 52.83% etwas höher als in Vertuccis Beobachtung (44.3%). Eine größere Divergenz war jedoch in der Häufigkeit hinsichtlich der Lokalisation zu beobachten. Bezogen auf die Gesamtmenge der untersuchten Präparate lag die Präsenz akzessorischer Kanäle im zervikalen Bereich bei 3.77%, im mittleren Bereich 16.98% und im apikalen Bereich 7.55%. Bei 11.32% zog der akzessorische Kanal von zervikal nach medial, bei 5.66% von medial nach apikal

und bei 7.55% von zervikal nach apikal. Im Gegensatz zu Vertuccis Untersuchungsergebnissen war das größte Vorkommen akzessorischer Kanäle im mittleren Bereich der Wurzel festzustellen.

Die Micro-CT Untersuchung einer Population südwestlich Chinas von Liu et al. (25) kam zu dem Ergebnis, dass von 115 Präparaten lediglich in 35.7% akzessorische Kanäle vorhanden waren. Diese befanden sich mit 92.7% fast ausschließlich im apikalen Bereich. Im mittleren Bereich betrug die Häufigkeit bei 7.3% und im zervikalen Bereich wurden keine akzessorischen Kanäle beobachtet.

Auch Dou et al. (32) führten eine Micro-CT Untersuchung von 178 zuvor extrahierten Zähnen einer südwestchinesischen Population durch. Ähnlich zu den Beobachtungen von Liu et al. lag die Inzidenz von akzessorischen Kanälen bei 39.98%. Obwohl beide Autoren dieselbe Population mit derselben Methode untersuchten, gab es eine Abweichung in der Lokalisation der Kanäle. Zervikal waren akzessorische Kanäle in 5.95%, medial in 46.43% und apikal in 47.62% der Fälle zu beobachten.

Alhadainys Studie (34) von 250 zuvor extrahierten Zähnen einer ägyptischen Population mittels der Clearing-Technik ergab, dass nur in 22.8% aller untersuchten Präparate akzessorische Kanäle vorhanden waren. Im Hinblick auf die Gesamtmenge der untersuchten Präparate lag die Verteilung bei 0.8% zervikal, 4.4% medial und 11.2% apikal. In 6.4% durchzog der Kanal mehrere Bereiche der Wurzel. Insgesamt wies die Studie somit die niedrigste Inzidenz akzessorischer Kanäle auf.

2.4.3 Anastamosen

Laut Vertuccis Studie (6) fand man in 32.1% der untersuchten Präparate Anastamosen in unterschiedlicher Lokalisation. Zervikal betrug dies 20.6%, medial 52.9% und apikal 26.5%. Der Hauptteil der Anastamosen befand sich demnach im mittleren Bereich der Wurzel. In 67.9% wurden keine Anastamosen festgestellt.

Die Untersuchung von Calişkan MK et al. (14) zeigte eine Inzidenz von Anastamosen bei 16.98% aller evaluierten Präparate einer türkischen Population. Dies lag deutlich unter dem Wert Vertuccis (32.1%), jedoch war auch hier zu beobachten, dass das

größte Vorkommen im medialen Bereich der Wurzel vorzufinden war, gefolgt vom apikalen Bereich und zervikalen Bereich.

Abraham und Gopinath (31) beschrieben das interne Wurzelkanalsystem von 100 zuvor extrahierten mandibulären Prämolaren einer emiratischen Population. Wie Calişkan MK et al. und Vertucci zuvor wandten auch sie die Clearing-Technik an. 17% aller untersuchten Präparate wiesen Anastomosen auf. Der Großteil der Anastomosen befand sich im medialen Bereich, gefolgt vom apikalen Bereich und zervikalen Bereich. Somit sahen wir hier eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen von Calişkan MK et al. (16.98%).

Die Präsenz von Anastomosen wurde in der Untersuchung einer südwestchinesischen Population durch Dou et al. (32) mit 10.67% angegeben. Im Vergleich zu Vertucci (32.1%), Calişkan MK et al. (16.98%) und Abraham und Gopinath (17%) sahen wir hier den niedrigsten Wert. Dennoch konnte man auch hier feststellen, dass das größte Vorkommen im medialen Bereich, gefolgt vom apikalen Bereich und zervikalen Bereich lag.

Alhadainys Untersuchung einer ägyptischen Population (34) ergab eine Inzidenz von Anastomosen in 24.8% der untersuchten Zähne. Das größte Vorkommen fand man auch hier wieder im medialen Bereich, gefolgt von apikal und schließlich zervikal.

2.4.4 Nebenforamina

Wenn das Foramen einen Durchmesser von unter 0.1 mm aufwies, wurde dieses als Nebenforamen kategorisiert (47, 48, 105).

1960 führte Green D. (46) eine stereomikroskopische Untersuchung von maxillären und mandibulären posterioren Zähne durch, um die apikale Morphologie von 700 extrahierten Zähnen zu studieren. Dabei wurden die Apizes 7 mm oberhalb abgetrennt und mit der flachen Seite auf einen Glas-Objektträger zur stereomikroskopischen Begutachtung zementiert. Ein integriertes Messgerät ermöglichte die Vermessung im Mikro-Bereich, zusätzlich dienten Feilen mit einem Durchmesser von 0.001 mm an der Spitze zur Exploration der Foramina. Von 50 untersuchten mandibulären

primären Prämolaren wiesen 45% Nebenforamina auf. Davon waren jeweils ein Nebenforamen (25%), zwei (17%) und drei (5%) Foramina zu beobachten. In 55% wurden keine zusätzlichen Nebenforamina beobachtet.

Arora und Tewari (47) untersuchten die apikale Morphologie von posterioren Zähnen einer nordindischen Population. Dabei wurden 800 extrahierte obere und untere posteriore Zähne mit Methylenblau gefärbt und stereomikroskopisch untersucht. Von insgesamt 100 untersuchten mandibulären primären Prämolaren zeigten sich in 89% keine Nebenforamina. In 7% wurde ein Nebenforamen beobachtet, 2% wiesen zwei Nebenforamina auf. Insgesamt wurden in 11% Nebenforamina beobachtet.

Awawdeh et al. (48) führten ebenso eine stereomikroskopische Untersuchung der apikalen Morphologie von 101 extrahierten mandibulären primären Prämolaren einer jordanischen Population durch. In 5% aller Präparate wurden keine Nebenforamina beobachtet und wichen somit stark von den Beobachtungen von Arora und Tewari (91%) ab. Diese könnte durch ethnische Unterschiede begründet sein. In größter Häufigkeit konnte man ein (33.7%), zwei (24.8%) oder drei Nebenforamina (16.8%) beobachten.

2.4.5 Hauptforamina Durchmesser

Die Form des physiologischen Foramens kann als rund, oval oder irregulär beschrieben werden. Wenn das physiologische Foramen eine Größendifferenz des schmalsten und breitesten Durchmessers von 0.02 mm oder mehr aufwies, wurde die Form als oval angesehen Marroquin et al. (105). Dieses Kriterium ist entscheidend für die richtige Wahl der Aufbereitungsfeile, denn eine suffiziente Aufbereitung des Wurzelkanals bedeutet der vollständige Abtrag aller Kanalwände. Dies ist jedoch nur möglich, wenn ein Kanal in seinem größten Durchmesser vollständig aufbereitet wurde.

In Greens stereomikroskopischen Untersuchung (46) wurde der mittelwertige Durchmesser der apikalen Foramina mit 0.35 mm angegeben. Der breiteste und der schmalste Durchmesser eines Foramens wurden dabei nicht gemessen.

Arora und Tewari (47) gaben in ihrer stereomikroskopischen Untersuchung von 100 mandibulären primären Prämolaren den mittelwertigen breiten Durchmesser des apikalen Foramens mit 0.256 mm (± 0.122) und den schmalsten Durchmesser mit 0.173 mm (± 0.074) an. Von allen untersuchten Präparaten wurden apikal jeweils ein Hauptforamen (70%), zwei (24%), drei (3%), vier (2%) und fünf Hauptforamina (1%) beobachtet.

In der Studie von Awawdeh et al. (48) zeigte sich in 63.4% apikal ein physiologisches Hauptforamen. Zwei Hauptforamina wurden in 22.8%, drei in 9.9%, vier in 3% und fünf in 1% aller Präparate beobachtet. Die Untersuchung ergab, dass wenn ein physiologisches Hauptforamen beobachtet wurde, dann die mittelwertigen breiten und schmalen Durchmesser bei 0.294 mm (± 0.099) und 0.222 mm (± 0.077) lagen. Bei zwei beobachteten Hauptforamina wies das erste Foramen Werte von 0.244 mm (± 0.073) und 0.202 mm (± 0.065) auf und das zweite Foramen Werte von 0.164 mm (± 0.047) und 0.136 mm (± 0.037). Bei drei Foramina 0.254 mm (± 0.072) und 0.208 mm (± 0.072), 0.176 mm (± 0.038) und 0.156 mm (± 0.034) sowie 0.141 mm (± 0.020) und 0.126 mm (± 0.021). Insgesamt wurden Zähne mit bis zu 5 Hauptforamina beobachtet.

3. Material und Methoden

3.1 Auswahlkriterien und Vorbereitung der Präparate



Abbildung 5: Vorbereitung der Präparate nach abgeschlossener Identifizierung.

Für die Studie wurden 109 zuvor extrahierte mandibuläre primäre Prämolaren aus deutschen und schweizerischen zahnärztlichen, oralchirurgischen Praxen und Kliniken gesammelt und in 4%iger Formaldehydlösung aufbewahrt. Hauptindikation für die Extraktion der Zähne waren parodontal geschädigte Zähne mit stark erhöhten Lockerungsgraden oder kieferorthopädische Behandlungsmaßnahmen. Eine alters- und geschlechterspezifische Vorsortierung der Präparate wurde nicht durchgeführt. Die Präparate mussten eindeutig als mandibuläre primäre Prämolaren identifizierbar sein. Die Identifizierung wurde durch Betrachtung der Kauflächenmorphologie, Kronenflucht, Wurzel- und Krümmungsmerkmal durch drei Begutachter durchgeführt. Die Ausschlusskriterien der Zähne aus der Studie waren zudem Zahnanomalien, starke Zahnhartsubstanzdefekte, radikuläre und koronale Karies, großflächige Restaurationen, endodontisch behandelte Zähne, nicht abgeschlossenes Wurzelwachs-

tum, Wurzelfrakturen und Resorptionen im Bereich der Wurzeln. Nach gründlicher Entfernung der Präparate vom Weichgewebe und mineralischen Ablagerungen mittels Ultraschallscalers wurden diese anschließend nochmal in 3%iger Wasserstoffperoxidlösung im Ultraschallbad gereinigt. Nach erfolgter Reinigung wurden die Präparate in 70%iger Ethanol-Lösung für die weiteren Arbeitsschritte aufbewahrt. Für die Untersuchung der internen Morphologie mussten Zugangskavitäten mit einer Diamant-Kugelfräse 801-014 (Komet, Lemgo, Germany) und einem Hochgeschwindigkeits-Handstück präpariert werden. Dabei wurde das Pulpdach vollständig abgetragen und vorhandene Pulpasteine mit Hilfe einer Ultraschallspitze entfernt. Die Spülung zur Reinigung und Desinfektion der Pulpakammer wurde mit 1%iger Natriumhypochloridlösung für 60 Sekunden durchgeführt. Die anschließende Trockenlegung erfolgte mit einem Absauger.

3.2 Micro-CT & Rohdaten

Nach Abschluss der Vorbereitung wurden die Präparate nach der bewährten Methode (106-108) mit einem Micro-CT (μ CT 40; Scanco Medical AG, Brüttisellen, Switzerland) in einer isotropen Auflösung von 20 μ m bei Einstellungen von 114 μ A und 70 kV eingescannt und ein Rohdatensatz angelegt. Dieser Bestand aus circa 800 – 1200 Schnittbildern pro Zahn.

<u>Specifications</u>	<u>μCT 40</u>
Type	Desktop cone-beam microCT Fully shielded No external shielding required
X-ray source	Sealed Air-cooled Maintenance-free 30 - 70 kVp
Detector	2048 x 256 elements, 24 μ m pitch

Resolution	< 8 μm 10% MTF 3 - 72 μm nominal isotropic (pixel size)
Image matrix	512 x 512 to 4096 x 4096 pix
Max. scan size	36.9 x 80 mm (\varnothing xL)
Max. specimen size	36.9 x 80 mm (\varnothing xL)
Electrical	100 - 230 V / 50 - 60 Hz 345 W
Dimensions	730 x 910 x 470 mm (HxWxD)
Weight	150 kg

Tabelle 4: Hardwaredetails μCT 40 (109)

3.3 Bildbearbeitungs-Software

Zur dreidimensionalen Visualisierung des Rohdatensatzes wurde die Software (VGSTUDIO MAX 2.2, Volume Graphics GmbH, Heidelberg) verwendet.

Mit der Software VGSTUDIO wurden einzelne Schichtbilder des CT-Scanners in einen dreidimensionalen Volumendatensatz rekonstruiert. Dadurch war es möglich das Objekt in allen drei Dimensionen zu betrachten und eine genaue Analyse und Messung der zu interessierenden Bereiche durchzuführen.

Für eine genaue Messung und Analyse war es zudem nötig verschiedene Zahnstrukturen farblich zu differenzieren. Die Wurzelkanäle sowie die Pulpakammer wurden rot hervorgehoben. Das Enamelum wurde weiß und das Dentin transparent/gräulich dargestellt.

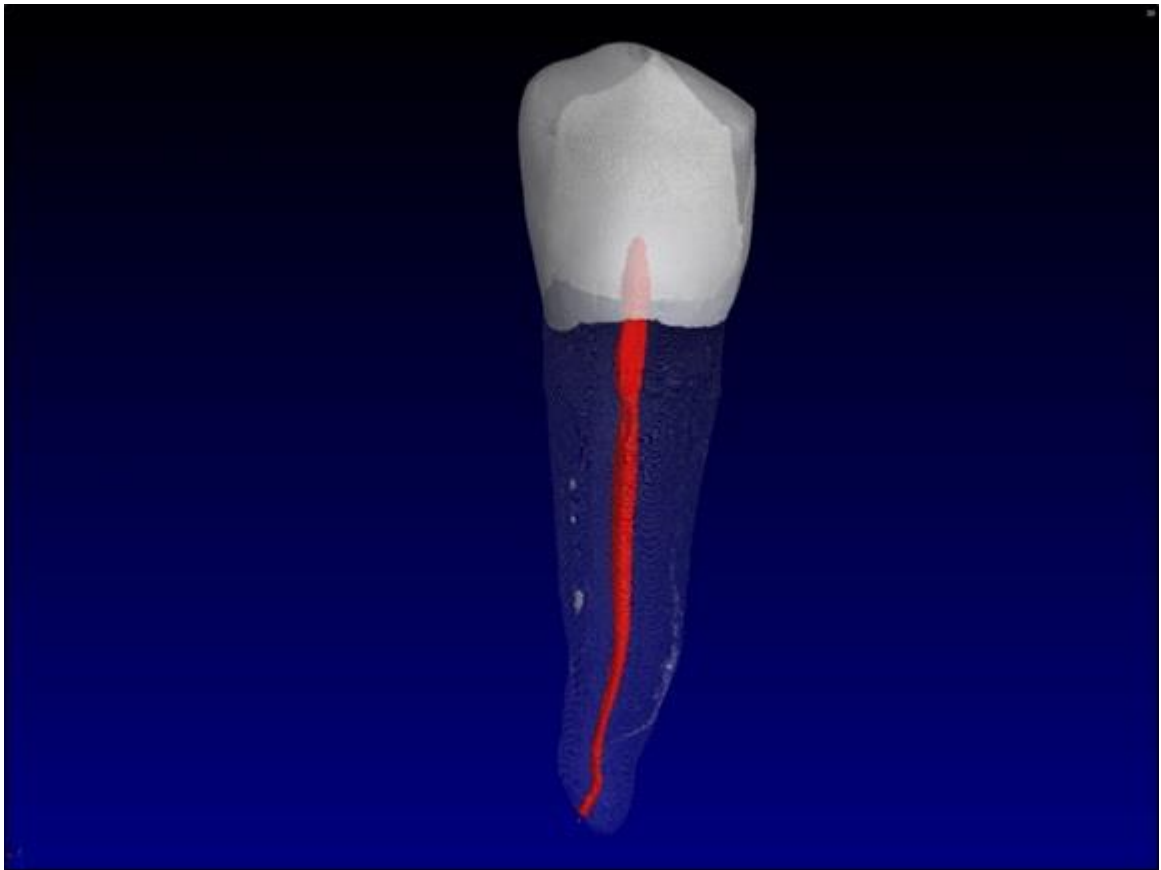


Abbildung 6: Dreidimensional rekonstruierter, farblich markierter mandibulärer primärer Prä-molar. Vestibuläre Ansicht

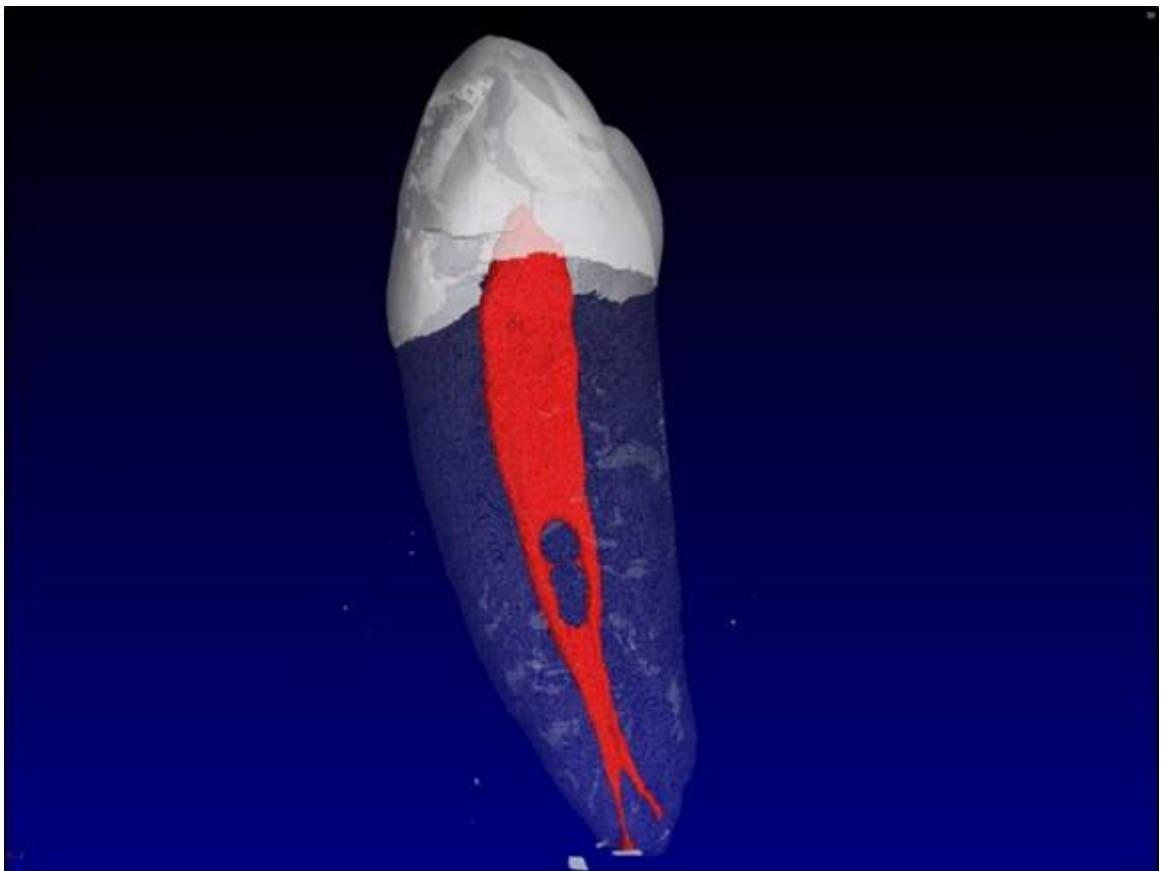


Abbildung 7: Dreidimensional rekonstruierter, farblich markierter mandibulärer primärer Prä-molar. Approximale Ansicht

3.4 Analyse

Jeder dreidimensional rekonstruierter und farblich markierter Zahn konnte nun aus allen Bildebenen betrachtet werden. Zur Beschreibung der Wurzelkonfigurationen wurde für das vierziffrige-Codesystem (57) die Zahnwurzel in ein koronales, mittleres und apikales Drittel unterteilt und die Anzahl der beobachteten Wurzelkanäle im jeweiligen Drittel als Ziffer angegeben. Mit einem Schrägstrich hervorgehoben, gab die vierte Ziffer die Anzahl der Hauptforamina wieder. Als Hauptforamina wurden jene Foramina bezeichnet, die einen Mindestdurchmesser von 0.2 mm aufwiesen. Foramina mit Werten unterhalb von 0.2 mm wurden als Nebenforamina gekennzeichnet. Die Anzahl der Nebenforamina wurde für jedes Präparat bestimmt und der prozentuale Anteil tabellarisch wiedergegeben. Die Präsenz von akzessorischen Kanälen sowie von Anastomosen wurde untersucht. Zusätzlich konnten über dreidimensionale Wurzelquerschnitte die schmalsten und breitesten Durchmesser der physiologischen Foramina eruiert werden.

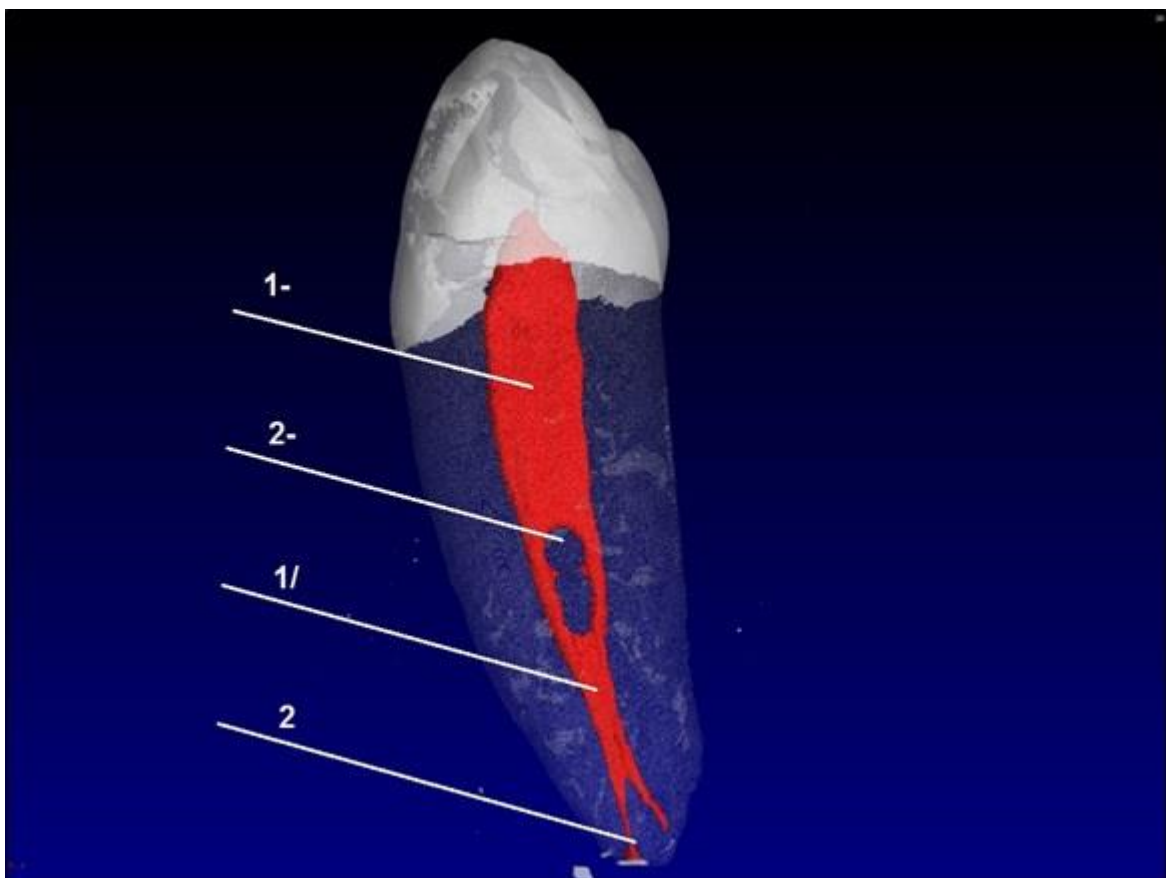


Abbildung 8: Mandibulärer primärer Prämolare mit der Wurzelkanalkonfiguration 1-2-1/2

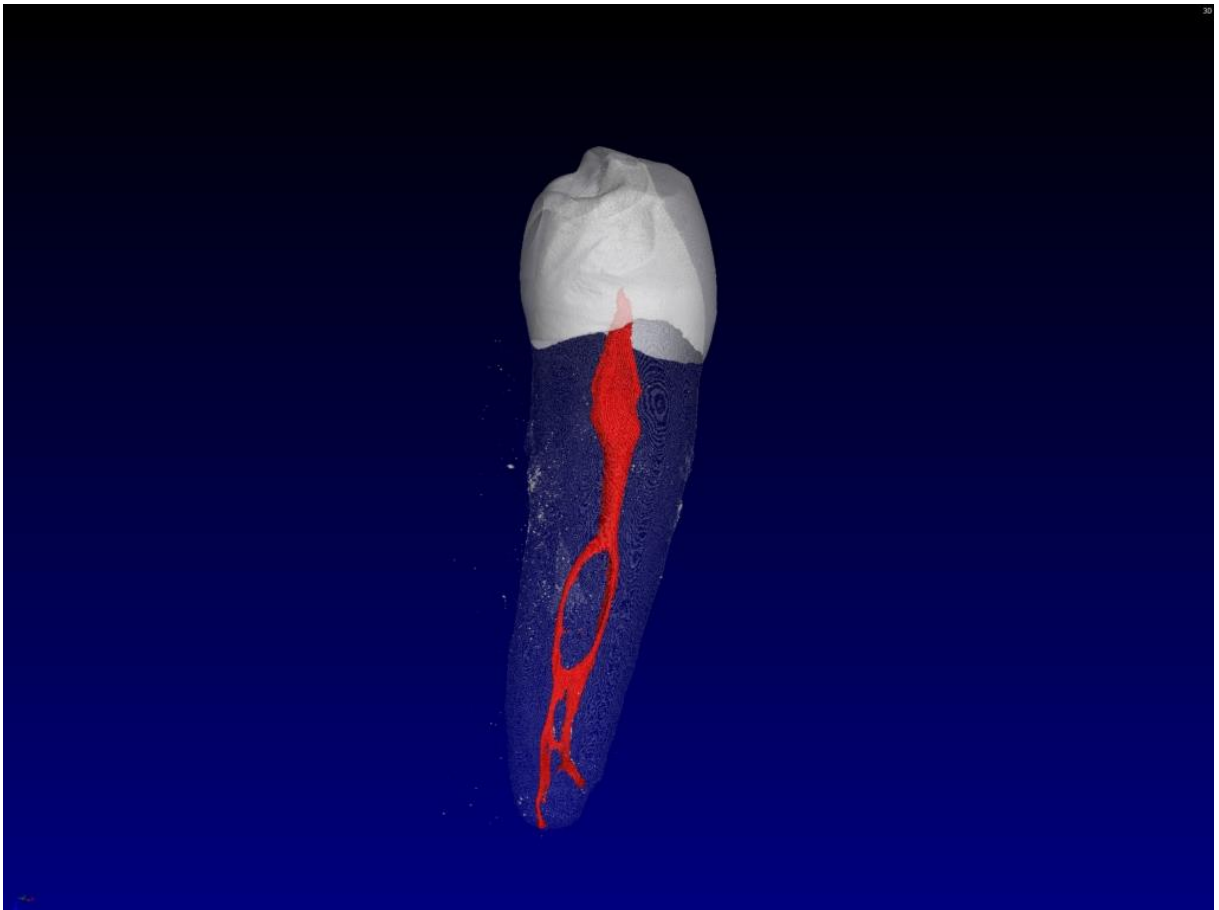


Abbildung 9: Mandibulärer primärer Prämolare

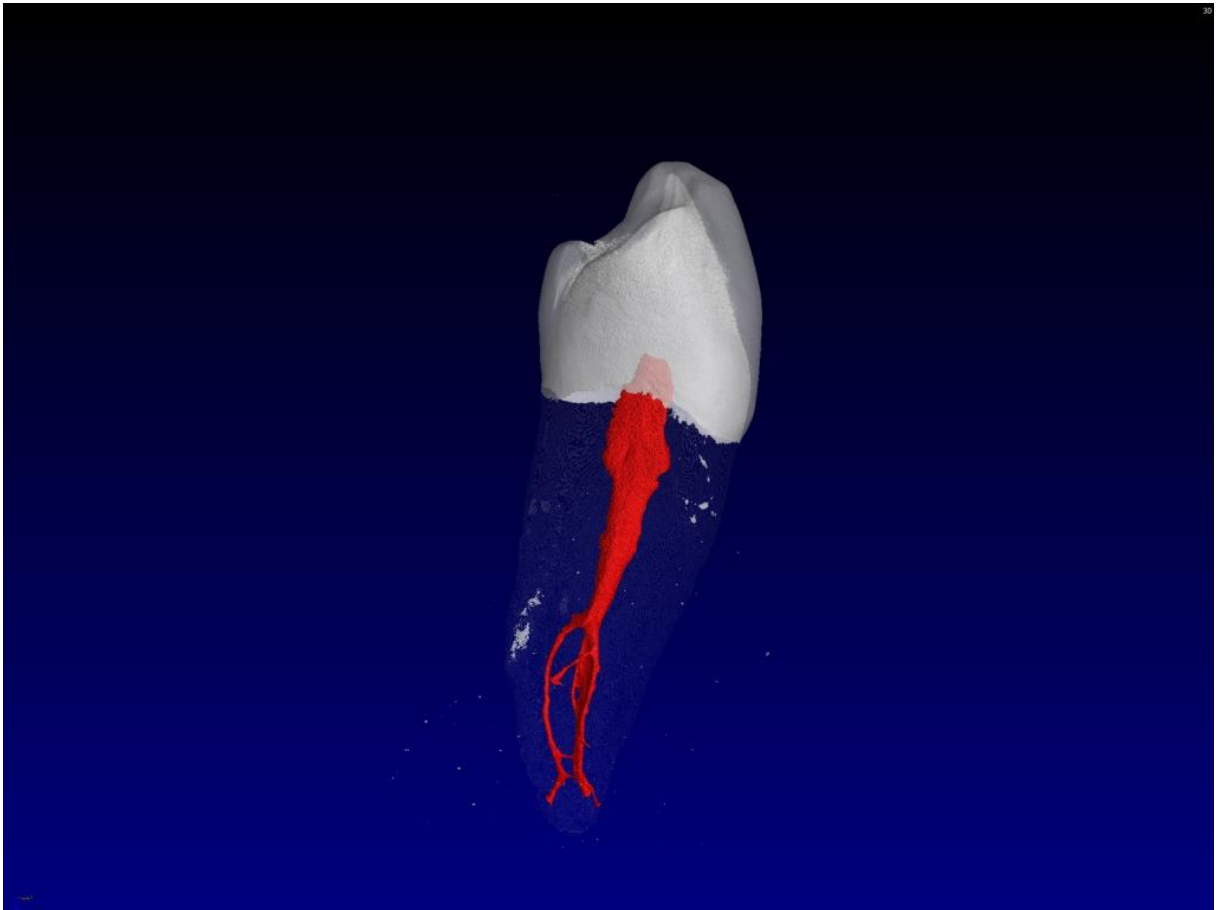


Abbildung 10 Mandibulärer primärer Prämolare

4. Ergebnisse

4.1 Wurzelkanalkonfiguration

Von 109 untersuchten mandibulären primären Prämolaren waren insgesamt 11 unterschiedliche Wurzelkanalkonfigurationen zu beobachten. Die am häufigsten vorzufindende Konfiguration war 1-1-1/1 mit 70.64%, gefolgt von 1-1-2/2 und 1-2-2-2/2 mit jeweils 7.34% und 1-2-1/1 mit 5.50% aller untersuchten Präparate. 3 weitere Konfigurationen hatten einen prozentualen Anteil von <2.00%, 4 weitere einen prozentualen Anteil von <1.00%. Laut der Klassifikation von Vertucci (6) sahen wir die folgende Verteilung. Typ I 70.64%, Typ III 7.33%, Typ V 16.51%. Apikal wurde in 78.89% ein physiologisches Hauptforamen beobachtet. In 17.43% und 3.67% wurden zwei beziehungsweise drei Hauptforamina beobachtet.

Wurzelkanalkonfiguration	Häufigkeit	Prozent
1-1-1/1	77	70,64
1-1-1/2	2	1,83
1-1-1/3	2	1,83
1-1-2/1	2	1,83
1-1-2/2	8	7,34
1-1-3/3	1	0,92
1-2-1/1	6	5,50
1-2-2/2	8	7,34
1-2-3/3	1	0,92
2-1-2/2	1	0,92
2-2-2/1	1	0,92

Tabelle 5: Wurzelkanalkonfigurationen der mandibulären primären Prämolaren (Micro-CT). Häufigste Wurzelkanalkonfiguration 1-1-1/1 (70.64%), gefolgt von 1-1-2/2 & 1-2-2/2 (jeweils 7.34%) und 1-2-1/1 (5.50%).

4.2 Akzessorische Kanäle

In 68.81% der untersuchten Zähne befanden sich keine akzessorischen Kanäle. Insgesamt wurden in 34 Präparaten akzessorische Kanäle gefunden. Der Großteil der akzessorischen Kanäle (25.69%) war im apikalen Drittel der Wurzel lokalisiert, im mittleren Drittel der Wurzel 5.5% und im koronalen Drittel befanden sich keine weiteren akzessorischen Kanäle.

Akzessorische Kanäle	N	%
Inexistent	75	68,81
1/3	0	0,00
2/3	6	5,50
3/3	28	25,69

Tabelle 6: Verteilung der akzessorischen Kanäle innerhalb der Wurzeldritteln. In 31.19% aller Präparate befanden sich akzessorische Kanäle. Ein Großteil (25.69%) ist im apikalen Drittel lokalisiert, danach 5.5% im mittleren Drittel. Im koronalen Drittel befanden sich keine akzessorischen Kanäle.

4.3 Anastomosen

Mit dieser Untersuchung wurde die Inzidenz von Anastomosen in verschiedenen Wurzelkanalkonfigurationen dargestellt. 84.4% der gesamten Präparate wiesen keine Anastomosen auf. Mit insgesamt 9.18% konzentrierte sich der Hauptteil der Anastomosen in den Wurzelkanalkonfigurationen 1-1-2/2 (4.59%) und 1-2-2/2 (4.59%). In den Konfigurationen 1-1-2/1 und 1-2-1/1 waren es jeweils 1.83% der Fälle. Der Rest verteilte sich mit jeweils 0.92% auf die Konfigurationen 2-2-1/1, 2-1-2/2 und 1-2-3/3.

Anastomosen	N	%
Inexistent	92	84,40
1-1-1/1	0	0,00
1-1-1/2	0	0,00
1-1-1/3	0	0,00
1-1-2/1	2	1,83
1-1-2/2	5	4,59
1-2-2/1	0	0,00
1-1-3/3	0	0,00
1-2-1/1	2	1,83
1-2-2/2	5	4,59
1-2-3/3	1	0,92
2-1-2/2	1	0,92
2-2-2/1	1	0,92

Tabelle 7: Inzidenz von Anastomosen in verschiedenen Wurzelkanalkonfigurationen

4.4 Nebenforamina

Foramina mit einem Durchmesser unter 0.2 mm wurden in dieser Studie als Nebenforamina gekennzeichnet. Diese fanden wir in 52.29% aller untersuchten mandibulären primären Prämolaren. 30.28% aller Zähne besaßen ein Nebenforamen, 12.84% zwei, jeweils 2.75% drei, vier und fünf Nebenforamina und 0.92% sechs Nebenforamina.

Nebenforamina	N	%
/0	52	47,71
/1	33	30,28
/2	14	12,84
/3	3	2,75
/4	3	2,75
/5	3	2,75
/6	1	0,92

Tabelle 8: Prozentuale Angabe der Präparate mit jeweils 0-6 Nebenforamina.

4.5 Hauptforamina Durchmesser

Wenn ein Hauptforamen beobachtet wurde, lagen die mittelwertigen breiten Durchmesser bei 0.37 mm (± 0.11) und die schmalen Durchmesser bei 0.28 mm (± 0.09). Wenn zwei Hauptforamina beobachtet wurden, lagen die mittelwertigen breiten Durchmesser bei 0.29 mm (± 0.07) und die schmalen Durchmesser bei 0.23 mm (± 0.07). Wenn drei Hauptforamina beobachtet wurden, lagen die mittelwertige breiten Durchmesser bei 0.22 mm (± 0.04) und die schmalen Durchmesser bei 0.17 mm (± 0.04).

Foramina	1		2		3	
	n	w	n	w	n	w
Mittelwert	0,28	0,37	0,23	0,29	0,17	0,22
σ	0,09	0,11	0,07	0,07	0,04	0,04
Max	0,69	0,72	0,44	0,44	0,22	0,28
Min	0,08	0,18	0,15	0,17	0,12	0,19
N	109	109	19	19	4	4

Tabelle 9: Schmale und breite Durchmesser bei einem, zwei und drei beobachteten Hauptforamina.

5. Diskussion

Eine erfolgreiche endodontische Behandlung setzt die vollständige Aufbereitung, Desinfektion und Obturation des gesamten Wurzelkanalsystems voraus, jedoch ist dies ohne detailliertes Wissen der internen Wurzelkanal-Morphologie nicht möglich, denn der Behandler wird durch die variierende Anzahl der Wurzelkanäle, Unterschiede in ihren Durchmessern, Formen, Divisionen, Fusionen, Verläufen sowie des Entwicklungsstadiums vor besonderen anatomischen Herausforderungen gestellt (45). Zahlreiche in-vivo und in-vitro Studien befassten sich mit der Untersuchung der internen Wurzelkanal-Morphologie der mandibulären primären Prämolaren und die Herausforderung der erfolgreichen endodontischen Behandlung dieser aufgrund ihrer hohen Variabilität (98) nochmals verdeutlicht.

Diese Micro-CT-Studie liefert eine umfangreiche Beschreibung des internen Wurzelkanalsystems einer deutschen und schweizerischen Population, hierfür wurden die Wurzelkanalkonfigurationen, die akzessorischen Kanäle, die Anastomosen, die Anzahl der beobachteten Nebenforamina und die breiten und schmalen Durchmesser der Hauptforamina sowie deren Anzahl untersucht.

Zur Untersuchung der internen Wurzelkanal-Morphologie wurde das Micro-CT verwendet. Dieses wurde 1995 durch Nielsen et al. (52) als neue, innovative, hochpräzise, non-destruktive, zeit- und aufwandsparende, dreidimensionale Untersuchungsmethode vorgestellt, welches den herkömmlichen Untersuchungsmethoden überlegen war und sogar im Vergleich zu zweidimensionalen radiographischen Methoden kleinste Details wie stark kalzifizierte Kanäle lokalisieren und bildlich darstellen konnte. Die von Adloff (75) eingeführte und von Vertucci modifizierte Clearing-Technik (6, 8, 77, 78, 110) wird heute noch von einigen Autoren als Gold-Standard in der endodontischen Untersuchung der internen Wurzelkanalmorphologie betrachtet, jedoch erfordert dies die Destruktion des Präparates, womit eine gesamtheitliche Betrachtung des Zahnes sowie die zukünftige Nutzung dieser nicht mehr möglich ist. Folglich wird nochmals der Vorteil des Micro-CTs ersichtlich und für die präzise Wiedergabe der internen Wurzelkanal-Morphologie für ex-vivo Studien ist dieses bestens geeignet (53, 83). Zu erwähnen ist dennoch, dass der Nachteil in der relativ hohen Strahlenbelastung liegt, aufgrund dessen ist das Micro-CT leider nicht für in-vitro Studien vorgesehen. Im Vergleich zu anderen non-destruktiven radiographischen und digita-

len Untersuchungsmethoden ist auch hier eine Überlegenheit zu sehen. Die Stärke des Micro-CTs in der detaillierten Darstellung komplexer Wurzelkanalkonfigurationen wurde so zum Beispiel in der Vergleichsstudie von Lix X et al. (24) nachgewiesen, in der 100 extrahierte primäre Prämolaren jeweils konventionell geröntgt und zusätzlich durch das Micro-CT untersucht wurden. Dabei wurden komplexere Wurzelkanalkonfigurationen durch die konventionelle Röntgentechnik nicht erkannt. Auch Nattress, Martins und Dowker (82, 83) stellten in ihrer Studie fest, dass die konventionell röntgenologische Untersuchung aufgrund ihrer zweidimensionalen Betrachtung des dreidimensionalen Wurzelkanalsystems lediglich als weiteres diagnostisches Hilfsmittel für den Behandler dienen sollte. Vergleicht man die digitale Volumentomographie mit dem Micro-CT, bestehen die Vorteile des DVTs in der hohen Anzahl der verfügbaren Aufnahmen, die im Rahmen einer endodontischen oder chirurgischen Behandlung in vivo erstellt wurden. Dennoch stellte sich auch hier heraus, dass feinere Strukturen des Wurzelkanalsystems im Vergleich zum Micro-CT durch das DVT nicht detektiert werden konnten (13, 111). Somit bleibt das Micro-CT weiterhin die erste Wahl für detailgetreue Untersuchungen des komplexen internen Wurzelkanalsystems.

Bezogen die interne Wurzelkanal-Morphologie war apikal in 78.89% der untersuchten Präparate die Präsenz von einem physiologischen Hauptforamen zu beobachten. In 17.43% und 3.67% wurden zwei beziehungsweise drei Hauptforamina beobachtet. In Bezug auf die Anzahl eines physiologischen Hauptforamens lag dies über den Ergebnissen von Pineda und Kuttler (74.2%), Vertucci (74%), Awawdeh et al. (63.4%) und Arora und Tewari (70%) (6, 11, 45, 47) und unter dem Wert von Celikten et al. (93.3%) (19). Eine Übereinstimmung sah man hier mit Rahimi et al. (76.2%) (42). Bezogen auf das Vorkommen von zwei Hauptforamina stellte man eine Abweichung gegenüber den Beobachtungen anderer Autoren Pineda und Kuttler (24.9%), Vertucci (25.5%), Rahimi et al. (23.1%), Celikten et al. (6.4%), Arora und Tewari (24%) und Awawdeh et al. (22.8%) fest. Die Inzidenz von drei Hauptforamina stimmte mit der Beobachtung von Arora und Tewari (3%) überein.

Die Untersuchung der Wurzelkanalkonfiguration ergab eine Inzidenz von 1-1-1/1 in 70.64% der untersuchten Präparate. Diese lag somit über denen anderer Autoren, die sich zwischen 50% und 67.39% erstreckten (9-11, 14-16, 24, 25, 31, 32, 34, 104) und unter denen, die sich zwischen 74.13% und 94.2% erstreckten (13, 17-21, 23, 26-28, 30, 33, 35-37, 39-41, 43, 44). Mit 70.6% und 70% waren die Ergebnisse von

Rahimi S et al. (42) und Vertucci FJ. (6) mit diesem vergleichbar. Als zweithäufigste Wurzelkanalkonfiguration sind 1-1-2/2, 1-2-2-/2 und 1-1-1/2 (zusammen 16.51%) zu nennen, die dem Vertucci-Typen V entsprechen würden. Hier sah man eine Übereinstimmung mit der Untersuchung von Alhadainy HA 16.4% (34) und Rahimi S et al. 16.9% (42). Die Ergebnisse anderer Autoren erstreckten sich zwischen 0% und 28.8% (6, 16, 21, 22, 37, 41).

In dieser Studie wurden in 31.19% der Zähne akzessorische Kanäle beobachtet. Diese befanden sich im medialen Drittel (5.5%) und der größte Teil im apikalen Drittel (25.69%) der Wurzel. Zervikal wurden keine akzessorischen Kanäle gefunden. Der prozentuale Anteil der akzessorischen Kanäle war mit dem von Liu X et al. 35.7% (25). vergleichbar. Den höchsten Wert fand man in der Studie von Caliřkan MK et al. 52.83% (14), den niedrigsten Wert bei Alhadainy HA 22.8% (34). In der Studie von Vertucci (6), Liu X et al. (25) und Alhadainy HA (34) befanden sich akzessorische Kanäle überwiegend im apikalen Drittel der Wurzel, dies stimmte mit diesen Beobachtungen überein. Im direkten Vergleich mit Vertuccis Beobachtungen lag die Inzidenz akzessorischer Kanäle mit 44.3% der gesamten untersuchten Präparate jedoch höher als in dieser Studie.

Die höchste Anzahl an Anastomosen waren in den Konfigurationen 1-1-2/2, 1-1-1/2 und 1-2-2/2 (zusammen 9.18%) zu beobachten. Insgesamt lag die Inzidenz bei 15.9% der untersuchten Präparate und war somit mit den Ergebnissen von Caliřkan et al. 16.98% (14) und Abraham SB und Gopinath VK 17% (31) übereinstimmend. Alhadainy HA (34) und Vertucci (8) hingegen beobachteten Anastomosen in 24.8% und 32.1% der untersuchten Fälle. Mit 10.67% zeigten Dou et al. den niedrigsten Wert (32).

In dieser Studie wurden Foramina mit einem Durchmesser von unter 0.2 mm als Nebenforamina kategorisiert. Morfis et al. (112) hingegen empfahl die Einordnung aller Foramina unter 0.1 mm als Nebenforamina. Nebenforamina fand man in 52.29% aller untersuchten mandibulären primären Prämolaren. 30.28% aller Zähne besaßen ein Nebenforamen, 12.84% zwei, jeweils 2.75% drei, vier und fünf Nebenforamina und 0.92% sechs Nebenforamina. In der Untersuchung von Arora und Tewari (47) wurde die Inzidenz von Nebenforamina in 11% aller untersuchten Prämolaren beobachtet und lag somit deutlich unter dem Wert dieser Studie (52.29%). Awawdeh et

al. (48) verzeichnete mit 95% den höchsten Wert und er konnte bis zu 9 Nebenforamina an einem Zahn nachweisen. Greens Beobachtung (45%) (46) war am ehesten mit Ergebnis dieser Studie vergleichbar. In allen Untersuchungen lag die Inzidenz von einem zusätzlichen Nebenforamen am höchsten, gefolgt von zwei und drei weiteren Nebenforamina.

Das physiologische Foramen wird als schmalster Durchmesser des Wurzelkanals definiert (60). Die Definition „apikale Konstriktion“ oder „Zement-Dentin-Grenze“ ist jedoch nicht ganz korrekt, denn die Zement-Dentin-Grenze ist nicht nur am Apex, sondern an der ganzen Wurzel zu beobachten. Weiterhin ist eine apikale Konstriktion nicht in jedem Foramen vorhanden (105). In dieser Untersuchung wurde beobachtet, dass das physiologische Foramen sich in der Regel in einer ovalen Form darstellte, somit wurden die mittelwertigen schmalen sowie breiten Durchmesser ermittelt. Wenn lediglich ein Hauptforamen vorhanden war, lagen die durchschnittlichen breiten und die schmalen Durchmesser bei (0.37 mm, ± 0.11) und (0.28 mm, ± 0.9). Bei zwei beobachteten Hauptforamina an einem Zahn, lagen die mittelwertigen breiten Durchmesser bei 0.29 mm (± 0.07) und die schmalen Durchmesser bei 0.23 mm (± 0.07). Wenn drei Hauptforamina vorhanden waren, lagen die mittelwertige breiten Durchmesser bei 0.22 mm (± 0.04) und die schmalen Durchmesser bei 0.17 mm (± 0.04). Diese Werte lagen über denen von Arora und Tewari (47) sowie von Awawdeh et al. (48). Unabhängig davon ist die Untersuchung des schmalsten Durchmesser und vor allem des breitesten Durchmessers des physiologischen Foramens von großer Bedeutung, denn aufgrund der häufig auftretenden Ovalität des Foramens genügt nicht immer die Aufbereitung des Wurzelkanals um weitere 3 ISO-Größen der IAF (96). Arora und Tewari (47) empfahlen den vollständigen Abtrag aller Kanalwände mit dem finalen Wurzelkanalinstrument. Der vollständige Abtrag mit der geeigneten ISO-Größe ist jedoch bei schmalen Apizes nicht immer möglich. Unterschiedliche Definitionen bezüglich des physiologischen Foramens und der Nebenforamina, verschiedene Untersuchungsmethoden und der ethnische Einfluss könnten Gründe für die Abweichungen in den Ergebnissen sein.

Vergleicht man die Studien der Autoren (8-49), erkennt man eine große Diskrepanz in Bezug auf die beobachtete interne Wurzelkanalmorphologie der mandibulären primären Prämolaren. Und auch trotz, auf dem ersten Blick, großer Übereinstimmungen mit den Ergebnissen anderer Autoren wie zum Beispiel in Bezug auf die Wurzel-

kanalkonfiguration oder die Inzidenz von Anastomosen, können wiederum die Beobachtungen hinsichtlich der akzessorischen Kanäle und Nebenforamina stark abweichen. Dies könnte durch etliche Faktoren für diese unterschiedlichen Ergebnisse begründet sein. Unterschiedliche Gesamtprobengrößen, Differenzen in der Untersuchungsmethode und der ethnische Einfluss der untersuchten Population könnten die Ursache dafür sein. Auch alters- und geschlechterspezifische Unterschiede in der Wurzelkanalanatomie sind zu berücksichtigen.

Um ein repräsentatives Ergebnis in der Untersuchung der Wurzelkanal-Morphologie einer bestimmten Bevölkerungsgruppe zu erzielen, ist unter anderem die Anzahl der untersuchten Proben ausschlaggebend. Wählt man eine zu geringe Gesamtanzahl der Proben, werden Anomalitäten schwerer ins Gewicht fallen und geben möglicherweise ein nicht repräsentatives Ergebnis wieder. So wurde in der Micro-CT-Studie zur Untersuchung der Wurzelkanal-Morphologie mandibulärer primärer Prämolaren einer emiratischen Untersuchungsgruppe durch Alkaabi et al. die relativ geringe Gesamtprobengröße mit 50 extrahierten Prämolaren als definitiv limitierenden Faktor der Studie genannt und weitere Studien mit größeren Probengrößen empfohlen (9). Eine klare Empfehlung zur Gesamtprobengröße konnte man jedoch in der Literatur nicht finden. Von insgesamt 37 Studien, die man zur Untersuchung der Wurzelkanal-Morphologie der mandibulären primären Prämolaren finden konnte, wiesen 19.4% der Studien eine Gesamtprobengröße von unter 100 Präparaten, 47.2% der Studien eine Größe von 100 bis 200 Präparaten und 33.3% der Studien eine Größe von über 200 Präparaten auf. Vergleich man die Ergebnisse zweier Studien, die dieselbe Bevölkerungsgruppe mit derselben Methode, jedoch mit unterschiedlichen Gesamtprobengrößen untersuchten, erkannte man signifikante Abweichungen. Hajihassani N et al. (16) (124 Proben) und Salarpour M et al. (22) (42 Proben) untersuchten jeweils die mandibulären primären Prämolaren einer iranischen Bevölkerungsgruppe mittels digitaler Volumetomographie. Während in der Studie von Hajihassani N et al. die Prämolaren den Wurzelkanalkonfigurationen nach Vertucci Typ I (62.2%), Typ III (10.9%), Typ V (20.2%) und 4 weiteren Typen zugeordnet wurden, wurden in der Studie von Salarpour M et al. die Prämolaren den Wurzelkanalkonfigurationen Typ I (71.4%) und Typ V (28.8%) zugeordnet. Diese zum Teil starken Abweichungen waren ebenfalls in den Studien zur Untersuchung indischer Patienten zu beobachten. In der Studie von Singh S und Pawar M (43) (100 Proben) lag die Inzidenz der Wurzelkanalkonfiguration des Typs I bei 80%, Typ II (6%), Typ IV (10%), Typ V (2%), wäh-

rend Bei Parekh V et al. (15) (40 Proben) die Inzidenz des Typs I bei 50%, Typ II (5%), Typ III (5%), Typ IV (25%), Typ V (12.5%) und Typ VI bei 2.5% lag. Mit 109 untersuchten Prämolaren konnte man in dieser Studie eine relativ hohe Anzahl an Proben sammeln und damit ein Ergebnis erzielen, welches nicht durch kleinere Abweichungen verzerrt wurde. Die Suche nach gut erhaltenen, extrahierten Prämolaren für diese Micro-CT Studie stellte sich bis dato als größte Hürde heraus, denn neue Erkenntnisse in der kieferorthopädischen Behandlung und Fortschritte in der Parodontose-Therapie führten zur Reduktion von Parodontose und kieferorthopädisch bedingten Extraktionen. Somit wird aber auch der klare Vorteil in der Nutzung eines Micro-CTs schnell deutlich gemacht, denn aufgrund der non-destruktiven Methode können die untersuchten Präparate für zukünftige Studien weiterhin genutzt werden.

Zusätzlich zu dem oben genannten Faktor spielt der ethnische Einfluss auf die Variabilität der Wurzelkanalmorphologie weitaus eine größere Rolle als bisher angenommen. Dieser wurde schon 1986 durch Trope et al. in der radiographischen Untersuchung von jeweils 400 mandibulären Prämolaren hellhäutiger und dunkelhäutiger amerikanischer Patienten (101) nachgewiesen. Demnach war die Anzahl mandibulärer primärer Prämolaren mit mehrkanaligen Wurzelkonfigurationen bei dunkelhäutigen Patienten mit 32.8% signifikant höher als bei hellhäutigen Patienten mit 13.7%. Weitere Untersuchungen zeigten, dass eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein mehrkanaliger Wurzelkanalsysteme bei arabischstämmigen Untersuchungsgruppen besteht. Mehrkanalige Konfigurationen waren in 38% der untersuchten Zähne emiratischer (9), jordanischer (41.8%) (11) und ägyptischer Patienten (38.8%) (34) nachzuweisen. Konträr dazu wiesen türkische Untersuchungsgruppen mit 10.5%, 7.2%, und 5.8% (19, 27, 33) einen geringeren Anteil mehrkanaliger Wurzeln auf. In Anbetracht dessen sollte sich der Behandler vor jeder Therapie stets im Klaren sein, dass abhängig vom ethnischen Hintergrund seines Patienten eine andere Wurzelkanalmorphologie als die von ihm erwartete vorzufinden sein kann. Somit ist die präendodontologische Diagnostik zur Detektion aller Wurzelkanäle unerlässlich.

Auch die altersbedingte Veränderung der Wurzelkanalkonfiguration wurde in der Literatur mehrfach diskutiert und es wurden teils unterschiedliche Ergebnisse präsentiert. Schon Hess untersuchte 1917 den Einfluss des Alters auf die Form und Anzahl der Wurzelkanäle (73). Er unterteilte die Zähne in verschiedene Altersgruppen von 12-20,

20-30, 30-40 und 40-55 Jahren. Beim Studium des internen Wurzelkanalsystems stellte er fest, dass jugendliche Zähne bei nicht geschlossenem Foramen apicale einen recht voluminösen und nicht komplizierten inneren Bau der Wurzelkanäle aufwiesen und sonst auch keine apikalen Ramifikationen zu beobachten waren. Es wurde vermutet, dass mit dem Fortschreiten des Alters und dem weiteren Wachstum der Wurzel je nach Zahntyp und in unterschiedlichen Altersperioden vermehrt apikale Ramifikationen und akzessorische Kanäle entstanden, die auch wiederum durch weitere Kalzifikationen teils wieder obliteriert werden konnten. Hinsichtlich der mandibulären primären Prämolaren fand er heraus, dass dies auch hier zutraf, jedoch waren bezüglich der Wurzelkanalkonfigurationen keine großen Veränderungen festzustellen. Auch die Untersuchung von Pineda und Kuttler (45) stellte eine altersbedingte Veränderung der internen Morphologie fest. Die Präparate wurden in den Gruppen I bis 25 Jahre, Gruppe II 35-45 Jahre und Gruppe III >55 Jahre unterteilt. Man stellte eine Reduktion des Wurzelkanaldurchmessers fest, welche sich in der Altersgruppe 35-45 Jahre bemerkbar machte und in der Gruppe über 55 Jahre am stärksten ausgeprägt war. Die höchste Anzahl der Ramifikationen war in der zweiten Gruppe und nicht in der dritten Altersgruppe zu beobachten, somit könnte dies ein Hinweis für eine kalzifikationsbedingte Obturation darstellen. Corbella et al. (17) untersuchten die Morphologie des Wurzelkanals der primären und sekundären mandibulären Prämolaren und konnten keine signifikante Korrelation zwischen der Wurzelkanalkonfiguration und dem Alter des Patienten erkennen. Im Gegensatz dazu stellte man in der Studie von Martins et al. (90) fest, dass mit dem steigenden Alter des Patienten es zu einer Veränderung der Wurzelkanalkonfiguration durch die Bildung von Sekundärdentin und Tertiärdentin und der dadurch bedingten Verengung des Pulparaums kommt. In der Untersuchung bediente man sich einer präexistierenden Datenbank mit DVT-Bildern. Dabei wurden 12325 Zähne von 670 Patienten nach Zahntyp sortiert und diese wiederum in eine der vier jeweiligen Altersgruppen \leq 20 Jahre, 21-40 Jahre, 40-60 Jahre und \geq 60 Jahre zugeordnet. Der jeweilige Zahntyp und die Wurzelkanalkonfiguration nach Vertucci (6) jeder Wurzel waren gegeben. Man fand heraus, dass unter allen maxillären Zähnen die sekundären Prämolaren und unter allen mandibulären Zähnen die sekundären Prämolaren und die distale Wurzel des primären Molaren die größte altersspezifische Variation der Wurzelkanalkonfiguration aufwiesen. Mit steigender Altersgruppe war ein progredienter Rückgang der Wurzelkanalkonfiguration nach Vertucci I und ein Anstieg des Vertucci Typs II zu beobachten. Schon Eskoz und Weine (103) beobachteten bei ihrer Studie zur

Untersuchung der Wurzelkanalkonfiguration der mesiobukkalen Wurzeln sekundärer maxillärer Molaren, dass der Isthmus des ursprünglich Kidneybohnen-förmigen Kanals durch die kontinuierliche Bildung von Sekundärdentin letztendlich verschließen kann und dadurch zwei separate Kanäle entstehen können. In der Studie von Martins et al. konnte man speziell in mandibulären primären Prämolaren jedoch keine Korrelation zwischen den Altersgruppen und den Wurzelkanalkonfigurationen erkennen und verifiziert somit die Beobachtung von Corbella et al. diesbezüglich. Da nur eine überschaubare Anzahl an Studien sich mit der altersbedingten Veränderung der Wurzelkanalmorphologie der mandibulären primären Prämolaren befasste, werden weitere Untersuchungen empfohlen.

Nur wenige Studien befassten sich mit dem geschlechterspezifischen Dimorphismus der mandibulären primären Prämolaren. Auch hier kamen die Autoren zu unterschiedlichen Ergebnissen. Corbella et al., Pan et al. sowie Hajihassani et al. konnten in ihren Untersuchung (16, 17, 21) keine signifikante geschlechterabhängige Abweichung feststellen. Auch die Studie von Llena et al. zur Untersuchung der mandibulären Prämolaren spanischer Population mittels DVT (26) kam zu dem Ergebnis, dass keine deutlichen Abweichungen in der Wurzelkanalkonfiguration und der Wurzelkrümmung zwischen weiblichen und männlichen Patienten zu erkennen waren. Dennoch zeigten weibliche Patienten eine erhöhte Inzidenz zweier apikaler Foramina, denn 89.7% der 126 untersuchten Prämolaren wiesen lediglich ein apikales Foramen auf, während 10.3% zwei apikale Foramina aufwiesen. Davon waren jedoch 69.2% bei weiblichen Patienten zu beobachten. Abweichungen waren zudem in Bezug auf die durchschnittliche Kronen- und Wurzellänge der primären Prämolaren zwischen beiden Geschlechtern vorzufinden, dies könnte jedoch auf die Differenz in der durchschnittlichen Körpergröße zurückzuführen sein und sollte nochmals reevaluiert werden. Sert et al. (104) und Ok et al. (27) untersuchten jeweils die Wurzelkanalmorphologie türkischer Patienten. Die Untersuchung von Ok et al. ergab, dass der Wurzelkanalkonfigurationstyp I bei weiblichen Patienten mit 2.4% - 4.3% höher war als bei männlichen Patienten. Im Gegensatz dazu war dieser in der Studie von Sert et al. bei männlichen Patienten mit 9% öfter zu beobachten. Die teils gegensätzlichen Ergebnisse der Autoren erfordern weitere Studien mit standardisierten Untersuchungsmethoden.

Wie schon erwähnt, führen Patienten abhängige Faktoren und Differenzen in der Untersuchung und Analyse zu einer großen Diskrepanz zwischen den Studienergebnissen verschiedener Autoren. Für eine repräsentative Beschreibung des internen Wurzelkanalsystems mandibulärer primärer Prämolaren sind somit standardisierte Untersuchungsmethoden nötig. Dies erfordert auch die Vorsortierung und die Kategorisierung der Präparate nach Ethnie, Geschlecht und dem Alter. Erst dann kann man eine repräsentative Beschreibung des internen Wurzelkanalsystems eines Zahnes durchführen.

6. Zusammenfassung

Die endodontische Behandlung mandibulärer primärer Prämolaren wird aufgrund der Variabilität der Wurzelkanal-Morphologie allgemein als herausfordernd betrachtet. Für den Behandler ist somit ein sehr genaues Verständnis der komplexen Wurzelkanal-Morphologie entscheidend für die richtige Wahl der Behandlungstechnik und der Instrumentarien, denn nur die vollständige Aufbereitung, Desinfektion und Obturation des gesamten Wurzelkanalsystems kann einen erfolgreichen Abschluss der endodontischen Therapie gewährleisten.

Das Ziel dieser Arbeit ist die systematische Untersuchung des Wurzelkanalsystems mandibulärer primärer Prämolaren, denn in der Literatur findet man eine Vielzahl an Untersuchungen der mandibulären primären Prämolaren, die sich jedoch jeweils in der Art der Untersuchungsmethode, der untersuchten Populationsgruppe sowie in der Anzahl der untersuchten Präparate unterscheiden. Folglich ist eine große Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Studien zu beobachten. Nach jetzigem Stand wurden bisher keine ausführlichen Untersuchungen an deutschen und schweizerischen Populationen mit Hilfe eines Micro-CTs durchgeführt. Das Micro-CT hat sich gegenüber den konventionellen Untersuchungsmethoden, und auch gegenüber dem DVT, aufgrund seiner präzisen, detailgetreuen, reproduzierbaren und dreidimensionalen Eigenschaften als überlegen dargestellt und bildet somit die Grundlage zur detailgetreuen Darstellung des Wurzelkanalsystems. Für diese Arbeit wurden 109 mandibuläre primäre Prämolaren von deutschen und schweizerischen zahnärztlichen, oralchirurgischen Praxen und Kliniken gesammelt. Nach der vollständigen Desinfektion, Vorbereitung und Vorsortierung dieser Präparate wurden sie mit einem Micro-CT eingescannt, der Rohdatensatz zu einem dreidimensionalen Volumensatz rekonstruiert und untersucht. Beschrieben wurden die akzessorischen Kanäle, Anastomosen, die Neben- und Hauptforamina und der Durchmesser der physiologischen Foramina. Die Wurzelkanalkonfiguration wurde nach dem vierziffrigen Codesystem klassifiziert.

Bezogen auf die Wurzelkanal-Morphologie kann man zusammenfassend sagen, dass von 109 untersuchten Präparaten die Wurzelkanalkonfiguration 1-1-1/1 (70.64%), gefolgt von 1-1-2/2 (7.34%), 1-2-2/2 (7.34%) und 1-2-1/1 (5.50%) am häufigsten präsent waren, 7 weitere Konfigurationen wurden beobachtet. Akzessorische

Kanäle befanden sich in 31.19% der gesamten Präparate, mit 25.69% war der Hauptteil im apikalen Drittel der Wurzel lokalisiert, weitere 5.5% befanden sich im mittleren Drittel. 15.6% aller untersuchten Zähne wiesen Anastomosen auf, überwiegend waren diese in den Konfigurationen 1-1-2/2 (4.56%), 1-2-2/2 (4.56%), 1-1-2/1 (1.83%) und 1-2-1/1 (1.83%) vorzufinden. In 3 weiteren Konfigurationen wurden Anastomosen mit einer Inzidenz von 0.92% beobachtet. Nebenforamina waren in 52.29% aller Präparate vorhanden. 30.28% besaßen neben den Hauptforamina ein weiteres Nebenforamen, 12.84% besaßen zwei, jeweils 2.75% aller Präparate besaßen drei, vier und fünf Nebenforamina. Sechs Nebenforamina wurden in 0.92% der untersuchten Zähne beobachtet. Wenn ein Hauptforamen beobachtet wurde, lag der mittelwertige breite Durchmesser bei 0.37 mm (± 0.11) und der mittelwertige schmale Durchmesser bei 0.28 mm (± 0.09). Wenn zwei Hauptforamina beobachtet wurden, lag der mittelwertige breite Durchmesser bei 0.29 mm (± 0.07) und der mittelwertige schmale Durchmesser bei 0.23 mm (± 0.07). Wenn drei Hauptforamina beobachtet wurden, lag der mittelwertige breite Durchmesser bei 0.22 mm (± 0.04) und der mittelwertige schmale Durchmesser bei 0.17 mm (± 0.04).

Eine Übereinstimmung bezogen auf die am häufigsten beobachtete Wurzelkanalkonfiguration 1-1-1-/1 (70.64%) fand man in den Studien von Rahimi S et al. (70.6%) und Vertucci Fj. (70%). Als zweithäufigste Wurzelkanalkonfiguration nach Vertucci Typ V waren 1-1-2/2, 1-2-2/2 und 1-1-1/2 (zusammen 16.51%) zu beobachten. Dies entspricht den Ergebnissen von Alhadainy HA (16.4%) und Rahimi S et al. (16.9%). Der prozentuelle Anteil beobachteter akzessorischer Kanäle (31.19%) ist mit dem von Liu X et al. (35.7%) vergleichbar. Der größte Anteil befand sich im apikalen Drittel der Wurzel und stimmt mit den Beobachtungen von Liu X et al., Vertucci und Alhadainy HA überein. Die Inzidenz von Anastomosen lag bei 15.9% und ist mit den Ergebnissen von Calişkan MK et al. (16.98%) und Abraham SB und Gopinath VK (17%) vergleichbar. In dieser Studie wurde in 52.29% die Präsenz von Nebenforamina beobachtet. Die Beobachtungen von Green (45%) ist am ehesten mit diesem Ergebnis vergleichbar.

Komplexe Wurzelkanalkonfigurationen, die Präsenz von Anastomosen, akzessorischen Kanälen und Nebenforamina verdeutlichen, dass eine vollständige mechanische Aufbereitung und Desinfektion des gesamten Wurzelkanalsystems praktisch unmöglich ist, sodass die chemische Aufbereitung und Desinfektion in den Fokus

gelegt wird. Auch die Ovalität des physiologischen Foramens erfordert die richtige Wahl des Instrumentariums. Dazu gehört neben der adäquaten Technik auch die richtige Wahl der finalen Feilengröße. Basierend auf den ermittelten mittelwertigen schmalen und breiten Durchmesser des physiologischen Foramens wird eine initiale Feilengröße von mindestens ISO 20 und die finale apikale Feile von mindesten ISO 30-40 empfohlen.

Literaturverzeichnis

1. Wolf TG, Kim P, Campus G, Stiebritz M, Siegrist M, Briseno-Marroquin B. 3-Dimensional Analysis and Systematic Review of Root Canal Morphology and Physiological Foramen Geometry of 109 Mandibular First Premolars by Micro-computed Tomography in a Mixed Swiss-German Population. *J Endod.* 2020;46(6):801-9.
2. Grossman LI. A personal history of dental practice: 1920-1980. *J Am Dent Assoc.* 1981;102(3):360-5.
3. Anthony LP, Grossman LI. A brief history of root-canal therapy in the United States. *J Am Dent Assoc.* 1945;32(1):43-50.
4. Azarpazhooh A, Dao T, Figueiredo R, Krahn M, Friedman S. A survey of patients' preferences for the treatment of teeth with apical periodontitis. *J Endod.* 2013;39(12):1534-41.
5. Murtomaa H. Utilization of dental services by Finnish adults in 1971 and 1980. *Acta Odontol Scand.* 1983;41(2):65-70.
6. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1984;58(5):589-99.
7. Ingle JI. A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1961;14:83-91.
8. Vertucci FJ. Root canal morphology of mandibular premolars. *J Am Dent Assoc.* 1978;97(1):47-50.
9. Alkaabi W, AlShwaimi E, Farooq I, Goodis HE, Chogle SM. A Micro-Computed Tomography Study of the Root Canal Morphology of Mandibular First Premolars in an Emirati Population. *Med Princ Pract.* 2017;26(2):118-24.
10. Jain A, Bahuguna R. Root canal morphology of mandibular first premolar in a gujarati population - an in vitro study. *Dent Res J.* 2011;8(3):118-22.
11. Awawdeh LA, Al-Qudah AA. Root form and canal morphology of mandibular premolars in a Jordanian population. *Int Endod J.* 2008;41(3):240-8.

12. Burklein S, Heck R, Schafer E. Evaluation of the Root Canal Anatomy of Maxillary and Mandibular Premolars in a Selected German Population Using Cone-beam Computed Tomographic Data. *J Endod.* 2017;43(9):1448-52.
13. Zhang D, Chen J, Lan G, Li M, An J, Wen X, et al. The root canal morphology in mandibular first premolars: a comparative evaluation of cone-beam computed tomography and micro-computed tomography. *Clin Oral Investig.* 2017;21(4):1007-12.
14. Caliskan MK, Pehlivan Y, Sepetcioglu F, Turkun M, Tuncer SS. Root canal morphology of human permanent teeth in a Turkish population. *J Endod.* 1995;21(4):200-4.
15. Parekh V, Shah N, Joshi H. Root canal morphology and variations of mandibular premolars by clearing technique: an in vitro study. *J Contemp Dent Pract.* 2011;12(4):318-21.
16. Hajihassani N, Roohi N, Madadi K, Bakhshi M, Tofangchiha M. Evaluation of Root Canal Morphology of Mandibular First and Second Premolars Using Cone Beam Computed Tomography in a Defined Group of Dental Patients in Iran. *Scientifica.* 2017;2017:1504341.
17. Corbella S, Baruffaldi M, Perondi I, Taschieri S. Cone-beam computed tomography investigation of the anatomy of permanent mandibular premolars in a cohort of Caucasians. *J Investig Clin Dent.* 2019;10(1):e12373.
18. Shetty A, Hegde MN, Tahiliani D, Shetty H, Bhat GT, Shetty S. A three-dimensional study of variations in root canal morphology using cone-beam computed tomography of mandibular premolars in a South Indian population. *J Clin Diagn Res.* 2014;8(8):Zc22-4.
19. Celikten B, Orhan K, Aksoy U, Tufenkci P, Kalender A, Basmaci F, et al. Cone-beam CT evaluation of root canal morphology of maxillary and mandibular premolars in a Turkish Cypriot population. *BDJ Open.* 2016;2:15006.
20. Liao Q, Han JL, Xu X. [Analysis of canal morphology of mandibular first premolar]. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue.* 2011;20(5):517-21.

21. Pan JYY, Parolia A, Chuah SR, Bhatia S, Mutalik S, Pau A. Root canal morphology of permanent teeth in a Malaysian subpopulation using cone-beam computed tomography. *BMC Oral Health*. 2019;19(1):14.
22. Salarpour M, Farhad Mollashahi N, Mousavi E, Salarpour E. Evaluation of the effect of tooth type and canal configuration on crown size in mandibular premolars by cone-beam computed tomography. *Iran Endod J*. 2013;8(4):153-6.
23. Khedmat S, Assadian H, Saravani AA. Root canal morphology of the mandibular first premolars in an Iranian population using cross-sections and radiography. *J Endod*. 2010;36(2):214-7.
24. Li X, Liu N, Liu R, Dong Z, Liu L, Deng M. [Comparative study of root canal morphology of mandibular first premolar by micro-CT and radio visio graphy]. *Hua xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*. 2012;30(1):57-60.
25. Liu N, Li X, Liu N, Ye L, An J, Nie X, et al. A micro-computed tomography study of the root canal morphology of the mandibular first premolar in a population from southwestern China. *Clin Oral Investig*. 2013;17(3):999-1007.
26. Llana C, Fernandez J, Ortolani PS, Forner L. Cone-beam computed tomography analysis of root and canal morphology of mandibular premolars in a Spanish population. *Imaging Sci Dent*. 2014;44(3):221-7.
27. Ok E, Altunsoy M, Nur BG, Aglarci OS, Colak M, Gungor E. A cone-beam computed tomography study of root canal morphology of maxillary and mandibular premolars in a Turkish population. *Acta Odontol Scand*. 2014;72(8):701-6.
28. Sandhya R, Velmurugan N, Kandaswamy D. Assessment of root canal morphology of mandibular first premolars in the Indian population using spiral computed tomography: an in vitro study. *Indian J Dent Res*. 2010;21(2):169-73.
29. Velmurugan N, Sandhya R. Root canal morphology of mandibular first premolars in an Indian population: a laboratory study. *Int Endod J*. 2009;42(1):54-8.
30. Yu X, Guo B, Li KZ, Zhang R, Tian YY, Wang H, et al. Cone-beam computed tomography study of root and canal morphology of mandibular premolars in a western Chinese population. *BMC Medical Imaging*. 2012;12:18.

31. Abraham SB, Gopinath VK. Root canal anatomy of mandibular first premolars in an Emirati subpopulation: A laboratory study. *Eur J Dent.* 2015;9(4):476-82.
32. Dou L, Li D, Xu T, Tang Y, Yang D. Root anatomy and canal morphology of mandibular first premolars in a Chinese population. *Sci Rep.* 2017;7(1):750.
33. Bulut DG, Kose E, Ozcan G, Sekerci AE, Canger EM, Sisman Y. Evaluation of root morphology and root canal configuration of premolars in the Turkish individuals using cone beam computed tomography. *Eur J Dent.* 2015;9(4):551-7.
34. Alhadainy HA. Canal configuration of mandibular first premolars in an Egyptian population. *J Adv Res.* 2013;4(2):123-8.
35. Martins JNR, Marques D, Mata A, Carames J. Root and root canal morphology of the permanent dentition in a Caucasian population: a cone-beam computed tomography study. *Int Endod J.* 2017;50(11):1013-26.
36. Pedemonte E, Cabrera C, Torres A, Jacobs R, Harnisch A, Ramirez V, et al. Root and canal morphology of mandibular premolars using cone-beam computed tomography in a Chilean and Belgian subpopulation: a cross-sectional study. *Oral Radiol.* 2018;34(2):143-50.
37. Baisden MK, Kulild JC, Weller RN. Root canal configuration of the mandibular first premolar. *J Endod.* 1992;18(10):505-8.
38. Sert S, Aslanalp V, Tanalp J. Investigation of the root canal configurations of mandibular permanent teeth in the Turkish population. *Int Endod J.* 2004;37(7):494-9.
39. Iyer VH, Indira R, Ramachandran S, Srinivasan MR. Anatomical variations of mandibular premolars in Chennai population. *Indian J Dent Res.* 2006;17(1):7-10.
40. Sikri VK, Sikri P. Mandibular premolars: aberrations in pulp space morphology. *Indian J Dent Res.* 1994;5(1):9-14.
41. Walker RT. Root canal anatomy of mandibular first premolars in a southern Chinese population. *Endod Dent Traumatol.* 1988;4(5):226-8.

42. Rahimi S, Shahi S, Yavari HR, Manafi H, Eskandarzadeh N. Root canal configuration of mandibular first and second premolars in an Iranian population. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*. 2007;1(2):59-64.
43. Singh S, Pawar M. Root canal morphology of South asian Indian mandibular premolar teeth. *J Endod*. 2014;40(9):1338-41.
44. Yang H, Tian C, Li G, Yang L, Han X, Wang Y. A cone-beam computed tomography study of the root canal morphology of mandibular first premolars and the location of root canal orifices and apical foramina in a Chinese subpopulation. *J Endod*. 2013;39(4):435-8.
45. Pineda F, Kuttler Y. Mesiodistal and buccolingual roentgenographic investigation of 7,275 root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1972;33(1):101-10.
46. Green D. Stereomicroscopic study of 700 root apices of maxillary and mandibular posterior teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1960;13:728-33.
47. Arora S, Tewari S. The morphology of the apical foramen in posterior teeth in a North Indian population. *Int Endod J*. 2009;42(10):930-9.
48. Awawdeh L, Abu Fadaleh M, Al-Qudah A. Mandibular first premolar apical morphology: A stereomicroscopic study. *Aus Endod J*. 2018.
49. Zillich R, Dowson J. Root canal morphology of mandibular first and second premolars. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1973;36(5):738-44.
50. Domark JD, Hatton JF, Benison RP, Hildebolt CF. An ex vivo comparison of digital radiography and cone-beam and micro computed tomography in the detection of the number of canals in the mesiobuccal roots of maxillary molars. *J Endod*. 2013;39(7):901-5.
51. Lee KW, Kim Y, Perinpanayagam H, Lee JK, Yoo YJ, Lim SM, et al. Comparison of alternative image reformatting techniques in micro-computed tomography and tooth clearing for detailed canal morphology. *J Endod*. 2014;40(3):417-22.

52. Nielsen RB, Alyassin AM, Peters DD, Carnes DL, Lancaster J. Microcomputed tomography: an advanced system for detailed endodontic research. *J Endod.* 1995;21(11):561-8.
53. Rhodes JS, Ford TR, Lynch JA, Liepins PJ, Curtis RV. Micro-computed tomography: a new tool for experimental endodontology. *Int Endod J.* 1999;32(3):165-70.
54. Bjorndal L, Carlsen O, Thuesen G, Darvann T, Kreiborg S. External and internal macromorphology in 3D-reconstructed maxillary molars using computerized X-ray microtomography. *Int Endod J.* 1999;32(1):3-9.
55. Lee JK, Ha BH, Choi JH, Heo SM, Perinpanayagam H. Quantitative three-dimensional analysis of root canal curvature in maxillary first molars using micro-computed tomography. *J Endod.* 2006;32(10):941-5.
56. Weine FS, Healey HJ, Gerstein H, Evanson L. Canal configuration in the mesiobuccal root of the maxillary first molar and its endodontic significance. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1969;28(3):419-25.
57. Briseno-Marroquin B, Paque F, Maier K, Willershausen B, Wolf TG. Root Canal Morphology and Configuration of 179 Maxillary First Molars by Means of Micro-computed Tomography: An Ex Vivo Study. *J Endod.* 2015;41(12):2008-13.
58. C. K. Curriculum Endodontie. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2003.
59. Hellwig E. SE, Klimek J. und Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2018.
60. Kuttler Y. Microscopic investigation of root apices. *J Am Dent Assoc* (1939). 1955;50(5):544-52.
61. De Deus QD. Frequency, location, and direction of the lateral, secondary, and accessory canals. *J Endod.* 1975;1(11):361-6.
62. Manning SA. Root canal anatomy of mandibular second molars. Part I. *Int Endod J.* 1990;23(1):34-9.
63. Thomas RP, Moule AJ, Bryant R. Root canal morphology of maxillary permanent first molar teeth at various ages. *Int Endod J.* 1993;26(5):257-67.

64. Gani OA, Boiero CF, Correa C, Masin I, Machado R, Silva EJ, et al. Morphological changes related to age in mesial root canals of permanent mandibular first molars. *Acta Odontol Latinoam.* 2014;27(3):105-9.
65. Schroeder HE. *Orale Strukturbiologie.* Stuttgart: Thieme; 1992.
66. Kuttler Y. Classification of dentine into primary, secondary, and tertiary. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1959;12(8):996-9.
67. Baumann M. A. und Beer R. *Endodontologie.* Stuttgart: Georg Thieme Verlage KG; 2008.
68. Carabelli G. *Systemisches Handbuch der Zahnheilkunde. Anatomie des Mundes.* Wien: Braumüller und Seiden; 1844.
69. Mühlreiter E. *Anatomie des menschlichen Gebisses.* Leipzig: Verlag von Arthur Felix; 1870.
70. Gysi AR, C. *Sammlung von Mikrophotographien zur Veranschaulichung der mikroskopischen Struktur der Zähne des Menschen.* Zürich: Selbstverlag von Dr. dent. surg. Alfred Gysi; 1894.
71. Preiswerk G. *Lehrbuch und Atlas der Zahnheilkunde mit Einschluss der Mundkrankheiten.* München: J. F. Lehmann's Verlag; 1903.
72. Fischer G. Über die feinere Anatomie der Wurzelkanäle Menschlicher Zähne. *Deutsche Monatschr. f. Zahnheilk.* 1907 September.
73. Hess W. Zur Anatomie der Wurzelkanäle des menschlichen Gebisses mit Berücksichtigung der feineren Verzweigungen am Foramen apicale. Zürich: Buchdruckerei Berichthaus (vorm. Ulrich & Co.); 1917.
74. Spalteholz W. Über das Durchsichtigmachen von menschlichen und tierischen Präparaten. Leipzig: Verlag von S. Hirzel; 1911.
75. Adloff P. Über das Durchsichtigmachen von Zähnen und unsere Wurzelfüllungsmethoden. *D. M. f. Z.* 1913;6.
76. Arlotta F. Sull'anatomia dei canali radicolari dei denti umani. *Stomatologia.* 1913;Giugno.

77. Vertucci F, Seelig A, Gillis R. Root canal morphology of the human maxillary second premolar. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1974;38(3):456-64.
78. Vertucci FA, Francois KJ. Endodontic therapy of a mandibular second premolar: a case report with clinical correlations. *Fla Dent J.* 1986;57(1):25-7.
79. Dinakar C, Shetty UA, Salian VV, Shetty P. Root Canal Morphology of Maxillary First Premolars Using the Clearing Technique in a South Indian Population: An In vitro Study. *Int J Appl Basic Med Res.* 2018;8(3):143-7.
80. Robertson D, Leeb IJ, McKee M, Brewer E. A clearing technique for the study of root canal systems. *J Endod.* 1980;6(1):421-4.
81. Mueller AH Anatomy of the root canals of the incisors, cuspids and bicuspid of the permanent teeth. *J Am Dent Assoc.* 1933;20(8):1361-86.
82. Nattress BR, Martin DM. Predictability of radiographic diagnosis of variations in root canal anatomy in mandibular incisor and premolar teeth. *Int Endod J.* 1991;24(2):58-62.
83. Dowker SE, Davis GR, Elliott JC. X-ray microtomography: nondestructive three-dimensional imaging for in vitro endodontic studies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1997;83(4):510-6.
84. Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. *Br J Radiol.* 1973;46(552):1016-22.
85. Tachibana H, Matsumoto K. Applicability of X-ray computerized tomography in endodontics. *Endod Dent Traumatol.* 1990;6(1):16-20.
86. Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW. Practical cone-beam algorithm. *J. Opt. Soc. Am.* 1984;1(6):612-9.
87. Arai Y, Tammisalo E, Iwai K, Hashimoto K, Shinoda K. Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofac Radiol.* 1999;28(4):245-8.
88. Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA. A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *Eur Radiol.* 1998;8(9):1558-64.

89. Tian YY, Guo B, Zhang R, Yu X, Wang H, Hu T, et al. Root and canal morphology of maxillary first premolars in a Chinese subpopulation evaluated using cone-beam computed tomography. *Int Endod J*. 2012;45(11):996-1003.
90. Martins JNR, Ordinola-Zapata R, Marques D, Francisco H, Carames J. Differences in root canal system configuration in human permanent teeth within different age groups. *Int Endod J*. 2018;51(8):931-41.
91. Elliott JC, Dover SD. X-ray microtomography. *J Microsc*. 1982;126(Pt 2):211-3.
92. Elliott JC, Dover SD. Three-dimensional distribution of mineral in bone at a resolution of 15 micron determined by x-ray microtomography. *Metab Bone Dis Relat Res*. 1984;5(5):219-21.
93. Okumura T. Anatomy of the root canals. *J Am Dent Assoc*. 1927;14(4):632-6.
94. Weine FJB, MA: Mosby. *Endodontic Therapy*. 3 [sup] rd ed. 1982.
95. Filpo-Perez C, Bramante CM, Villas-Boas MH, Duarte MAH, Versiani MA, Ordinola-Zapata RJ. Micro-computed tomographic analysis of the root canal morphology of the distal root of mandibular first molar. *J Endod*. 2015;41(2):231-6.
96. Weine FS. *Endodontic therapy*: CV Mosby; 2003.
97. For the dental patient. Tooth eruption: the permanent teeth. *J Am Dent Assoc*. 2006;137(1):127.
98. Cleghorn BM, Christie WH, Dong CC. The root and root canal morphology of the human mandibular first premolar: a literature review. *J Endod*. 2007;33(5):509-16.
99. Slowey RR. Root canal anatomy. Road map to successful endodontics. *Dent Clin North Am*. 1979;23(4):555-73.
100. Amos ER. Incidence of bifurcated root canals in mandibular bicuspid. *J Am Dent Assoc*. 1955;50(1):70-1.
101. Trope M, Eifenbein L, Tronstad L. Mandibular premolars with more than one root canal in different race groups. *J Endod*. 1986;12(8):343-5.

102. Martins JNR, Gu Y, Marques D, Francisco H, Carames J. Differences on the Root and Root Canal Morphologies between Asian and White Ethnic Groups Analyzed by Cone-beam Computed Tomography. *J Endod.* 2018;44(7):1096-104.
103. Eskoz N, Weine FS. Canal configuration of the mesiobuccal root of the maxillary second molar. *J Endod.* 1995;21(1):38-42.
104. Sert S, Bayirli GS. Evaluation of the root canal configurations of the mandibular and maxillary permanent teeth by gender in the Turkish population. *J Endod.* 2004;30(6):391-8.
105. Marroquin BB, El-Sayed MA, Willershausen-Zonnchen B. Morphology of the physiological foramen: I. Maxillary and mandibular molars. *J Endod.* 2004;30(5):321-8.
106. Paque F, Peters OA. Micro-computed tomography evaluation of the preparation of long oval root canals in mandibular molars with the self-adjusting file. *J Endod.* 2011;37(4):517-21.
107. Paque F, Ganahl D, Peters OA. Effects of root canal preparation on apical geometry assessed by micro-computed tomography. *J Endod.* 2009;35(7):1056-9.
108. Peters OA, Boessler C, Paque F. Root canal preparation with a novel nickel-titanium instrument evaluated with micro-computed tomography: canal surface preparation over time. *J Endod.* 2010;36(6):1068-72.
109. AG SM. Specifications μ CT 40 2019 [updated 2019, December 18; cited 2019 December 18]. Available from:
<http://www.scanco.ch/en/systems-solutions/specimen/microct40.html>.
110. Vertucci FJ. Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. *Endodontic Topics.* 2005;10(1):3-29.
111. Acar B, Kamburoglu K, Tatar I, Arikan V, Celik HH, Yuksel S, et al. Comparison of micro-computerized tomography and cone-beam computerized tomography in the detection of accessory canals in primary molars. *Imaging Sci Dent.* 2015;45(4):205-11.

112. Morfis A, Sylaras SN, Georgopoulou M, Kernani M, Prountzos F. Study of the apices of human permanent teeth with the use of a scanning electron microscope. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1994;77(2):172-6.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater für die Bereitstellung des Promotionsthemas sowie der fachlichen und freundlichen Betreuung während der Entstehung dieser Dissertation. Er war immer erreichbar und seine wertvollen Anregungen haben zur Fertigstellung dieser Arbeit maßgeblich beigetragen.

Tiefe Dankbarkeit möchte ich außerdem für meine Frau und für meine Familie äußern, die mir stets zur Seite standen. Vielen Dank für die Geduld und für die motivierenden Worte während der Entstehung dieser Arbeit.