

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

Klassifizierung mandibulärer Prämolaren einer ausgewählten deutschen Gesellschaft
in DVT-Aufnahmen

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

Vorgelegt von

Diana Chehreh
aus Siegburg

Mainz, 2021

[Dokumenttitel]

Wissenschaftlicher Vorstand:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion:

Meinen liebevollen und mutigen Eltern.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	
Abkürzungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
1 Einleitung	6
1.1 Definitionen	6
1.2 Einführung	7
2 Literaturdiskussion	9
2.1 Anatomie	9
2.2 Endodontologie	11
2.2.1 Klassifikation nach Vertucci	15
2.2.2 Klassifikation nach Weine et al.	17
2.2.3 Klassifikation nach Ahmed et al.	18
2.2.4 Anatomie der 1. UK-Prämolaren 34 und 44	21
2.2.5 Anatomie der 2. UK-Prämolaren 35 und 45	22
2.3 Bildgebende Verfahren in der Zahnmedizin	22
2.3.1 Zweidimensionales Röntgen	23
2.3.2 Dreidimensionales Röntgen: Computertomographie und Dentale digitale Volumentomographie	26
2.3.3 Endodontologie im zwei- und dreidimensionalen Röntgen	27
2.3.4 Strahlenschutz	34
3 Material und Methoden	38
3.1 Erhebung und Ausarbeitung der Datensätze	38
3.2 Materialien	38
4 Ergebnisse	44
4.1 Wurzelanzahl und c-shaped Kanäle	44
4.2 Kanalanzahl und Vertucci-Klassifizierung	45
5 Diskussion	48
5.1 Allgemein	48
5.2 Ergebnisvergleich mit Vertucci und weiteren Publikationen	49
5.3 Einfluss anderer Ethnien und Untersuchungsmethoden	52
6 Zusammenfassung	54
Literaturverzeichnis	57
Danksagungen	62
Tabellarischer Lebenslauf	63

Abkürzungsverzeichnis

ALADA	as low as diagnostically acceptable
ALARA	as low as reasonably achievable
AP	apikale Parodontitis
CBCT	Cone beam computed tomography
CT	Computertomographie
DVT	Dentale digitale Volumetomographie
ICRP	International Commission of Radiological Protection, Internationale Strahlenschutzkommission
IOA	intraorale Zahnaufnahme, intraorale Tubusaufnahme
mb.	mesiobukkal/ mesiobukkalen
ml.	mesiolingual/ mesiolingualen
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
OK	Oberkiefer
PSA	Panoramaschichtaufnahme
ROI	region of interest
SI	Système international d'unités, internationales Einheitssystem
UK	Unterkiefer
WSR	Wurzelspitzenresektion

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1, Seite 19

Codierung für ein- bis mehrwurzelige Zähne der Klassifikation nach Ahmed et al., 2017
[1]

Tabelle 2, Seite 28

Literaturangaben bezüglich der Mittelwerte effektiver Dosis von IOA, DVT, PSA und CT [2-17]

Tabelle 3, Seite 44

Häufigkeitsverteilung der UK-Prämolaren

Tabelle 4, Seite 45

Wurzelanzahl der untersuchten 1. und 2. UK-Prämolaren

Tabelle 5a-b, Seiten 46-47

Einteilung der untersuchten 1.-(5a) und 2.UK-Prämolaren (5b) in die Vertucci-Klassifikation

Tabelle 6, Seite 50

Kanalausgänge der UK-Prämolaren

Tabelle 7, Seite 51

Vergleich der Studienergebnisse mit Vertuccis Ergebnissen [18]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Seite 9

Unterkiefer und Oberkiefer Übersicht der Zähne mit Unterteilung in Frontzähne, Prämolaren und Molaren (ohne Weisheitszähne), eigene Darstellung in Anlehnung an eine Abbildung der Arbeitsgemeinschaft Zahngesundheit [19]

Abbildung 2, Seite 10

Übersichtsdarstellung der Zahnhartsubstanz mit den unterschiedlichen Pulpaabschnitten, eigene Darstellung

Abbildung 3a, Seite 14

Fotografie 1. UK-Prämolaren, Vertucci, 1984 [20]

Abbildung 3b, Seite 14

Fotografie 2. UK-Prämolaren, Vertucci, 1984 [20]

Abbildung 4, Seite 16

Darstellung einer Übersicht der Vertucci-Klassifikationen: Typ I–VIII, eigene Darstellung in Anlehnung am Hargreaves, K. und Berman, L., 2016 [21]

Abbildung 5, Seite 17

Radiografie eines 2. OK-Molars mit einer Weine-Typ II-Kanalkonfiguration. Weine et al., 1995 [22]

Abbildung 6, Seite 18

Übersicht der Klassifikationen nach Weine et al. Typ I–IV, eigene Darstellung in Anlehnung am Hargreaves, K. und Berman, L., 2016 [21]

Abbildung 7, Seite 20

Micro-CT-Aufnahmen unterschiedlicher Zahngruppen zur Darstellung der Wurzelkanalsysteme, klassifiziert nach Ahmed et al., 2017 [1]

Abbildung 8, Seite 21

Ansicht eines 1. UK-Prämolars von **a)** vestibulär und **b)** approximal. Micro-CT-Aufnahme, Paqué et al., 2018 [23]

Abbildung 9, Seite 22

Ansicht eines 2. UK-Prämolars von **a)** vestibulär und **b)** approximal. Micro-CT-Aufnahme, Paqué et al., 2018 [23]

Abbildung 10, Seite 25

Darstellung der unterschiedlichen Einstelltechniken: a) Paralleltechnik, b) Rechtwinkeltechnik und c) Halbwinkeltechnik, grafische Darstellung nach Vorlage der Skizzierungen von Schulze R., 2019 [2]

Abbildung 11, Seite 27

Skizzierung der Geometrie eines digitalen Volumentomographen: Flatpanel-Detektor und Röhre sind mittels eines C-Armes miteinander verbunden, sodass eine 360° Rotation um das FOV (Abbildungsvolumen) ermöglicht ist. Das Strahlenbündel ist hierbei pyramidenförmig, eigene Darstellung

Abbildung 12A-C, Seiten 29–30

Exemplarischer Zahn 35 in der PSA (12A), in der IOA (12B) und in der dreidimensionalen Aufnahme (12C), exemplarischer Patient aus einer Praxis in Wiesbaden, 2020

Abbildung 13, Seite 36

Beiträge zur Gesamthäufigkeit und zur kollektiven effektiven Dosis für verschiedene medizinische Untersuchungen in der Röntgendiagnostik 2016 in Deutschland, Bundesamt für Strahlenschutz [24]

Abbildung 14, Seite 39

Darstellung einer Multiplanaren Rekonstruktion mit klassischer Ansicht der coronalen, axialen und sagittalen Schicht, Quelle Screenshot aus einer Praxis in Wiesbaden, Software: I-Dixel, 2020

Abbildungen 15 A-G, Seite 40

Transversale DVT-Schichten von okklusal nach apikal, der UK-Prämolaren im 3. Und 4.Quadranten, exemplarischer Patient aus einer Praxis in Wiesbaden

Abbildung 16 A-F, Seite 41

Coronale DVT-Schichten von mesial nach distal eines Zahnes 34, mit Typ III-Klassifikation, exemplarischer Patient aus einer Praxis in Wiesbaden, 2020

Abbildung 17 A-F, Seite 42

Transversale DVT-Schichten von mesial nach distal der Zähne 34 und 35, mit Typ I-Klassifikation, exemplarischer Patient aus einer Praxis in Wiesbaden, 2020

Abbildung 18 A-F, Seite 43

Sagittale DVT-Schichten von bukkal nach lingual des Zahnes 34 und des Zahnes 35, exemplarischer Patient aus einer Praxis in Wiesbaden, 2020

Abbildung 19, Seite 46

Säulendiagramm der unterteilten 1. und 2. UK-Prämolaren bezüglich ihrer Kanalanzahl

Abbildung 20, Seite 47

Vergleich der untersuchten 1. und 2. UK-Prämolaren in den Typen I-V der Vertucci-Klassifikation

1 Einleitung

1.1 Definitionen

Wie in allen Bereichen der Medizin hat sich auch in der Zahnmedizin eine international einheitliche Bezeichnung für Lagebeziehungen bewährt. Davon sind für die vorliegende Arbeit folgende Begriffe besonders relevant:

mesial	Abk.: m. – im Zahnbogen der Kiefermitte (Mittellinie) zugewandt
distal	Abk.: d. – im Zahnbogen der Mittellinie abgewandt
okklusal	Abk.: o. – auf der Kaufläche gelegen
apikal	an der Wurzelspitze gelegen, zur Wurzelspitze hin
bukkal	zur Wange gerichtet, lat. <i>bucca</i> : die Wange
cervical	in der Gegend des Zahnhalses gelegen, lat. <i>cervix</i> : der Hals
periapical	um die Wurzelspitze herum, lat. <i>apex</i> : die Spitze
koronal	zur Krone gerichtet, kronenwärts, lat. <i>corona</i> : die Krone
vestibulär	zum Mundvorhof gerichtet
oral	zur Mundhöhle (<i>cavum oris proprium</i>) gerichtet
lingual	zur Zunge hingerrichtet (nur bei UK-Zähnen)
approximal	zwischen zwei Zahnkronen gelegen
inzisal	in Gegend der Schneidekante gelegen
palatinal	zum Gaumen gerichtet (nur bei OK-Zähnen)
transversal	quer verlaufend, senkrecht zur Hauptachse hin
sagittal	von vorne nach hinten verlaufend, lat. <i>sagitta</i> : der Pfeil

1.2 Einführung

Wurzelkanalbehandlungen machen in Deutschland einen wesentlichen Teil der konservierenden Zahnheilkunde aus. Im Zeitraum von 2009 bis 2018 wurden allein über die gesetzlichen Krankenkassen über 71,19 Millionen Wurzelfüllungen infolge einer Wurzelkanalbehandlung verzeichnet [25].

Der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung setzt eine adäquat durchgeführte Therapie voraus. Diese wiederum erfordert eine präzise und gründliche klinische Anfangsdiagnostik, darunter die obligatorische Röntgendiagnoseaufnahme.

Nach der Diagnosestellung folgen Aufbereitung, Spülung und Desinfektion der Kanäle, ebenso wie eine finale, suffiziente Obturation des gesamten Wurzelkanalsystems [26, 27]. Für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung sind Vorerfahrungen des behandelnden Zahnarztes und dessen Kenntnisse über die Anatomie und Morphologie des zu behandelnden Zahnes und Wurzelkanalsystems elementar [20, 28]. Aus diesem Grund beschäftigen sich zahlreiche wissenschaftliche Studien seit Jahrzehnten mit der Klassifizierung der Anatomie und Morphologie der Zähne, wobei sich die Untersuchungsarten im Laufe der Jahre stark erweitert haben [18, 20]. Neben *in vitro*-Studien an extrahierten Zähnen und komplexen Färbemethoden der Pulpa nehmen Micro-CT und bildgebende Verfahren eine zunehmend bedeutendere Rolle ein [18, 20, 29].

Die Bildgebung ist ein sich stetig weiterentwickelnder Teilbereich der Medizin. Ausgehend von filmbasierten, noch analogen Techniken durchlief sie in jüngerer Zeit im Zuge der Digitalisierung einige große Entwicklungsschritte [30]. So ermöglicht die Bildgebung heutzutage nahezu maßstabsgetreu die dreidimensionale Darstellung anatomischer Strukturen des Kopf-Hals-Bereiches [31]. Dies geht jedoch mit einer vergleichsweise höheren Strahlenbelastung für den Patienten einher, weshalb im Sinne des Strahlenschutzes ein Abwägen von Nutzen und Risiko für jeden Einzelfall stets unabdingbar ist [2].

Welchen Mehrwert das dreidimensionale Bild – trotz der damit verbundenen erhöhten Strahlenbelastung für den Patienten – für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung hat, wird in der vorliegenden Arbeit für die Prämolaren des Unterkiefers erörtert.

Dazu erfolgen die Untersuchung der 1. und 2. UK-Prämolaren bezüglich ihrer Anatomie und Einteilung in die Vertucci-Klassifikation sowie ein Vergleich mit Studienergebnissen aus den letzten Jahren unter der Fragestellung, ob das heutige dreidimensionale Bildgebungsverfahren Vorteile in der Vorhersagbarkeit des Behandlungserfolges von Wurzelkanalbehandlungen mit sich bringt und ob die anhand der dreidimensionalen Röntgenbilder vorgenommene Klassifizierung die hohen Variationszahlen bezüglich Anatomie und Morphologie der UK-Prämolaren bestätigen kann. Die hierzu genutzten Datensätze stammen aus der Universitätsmedizin Mainz, speziell aus der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten.

Des Weiteren lassen viele Studienergebnissen die Vermutung zu, dass die individuelle Zahnentwicklung u.a. von ethnischen Einflüssen abhängt, auch dieser Zusammenhang wird in der vorliegenden Arbeit genauer untersucht.

2 Literaturdiskussion

2.1 Anatomie

Vorangestellt sei ein für diese Arbeit grundlegender Überblick auf die Zahnanatomie. Das menschliche Gebiss ist in einen Ober- und einen Unterkiefer aufgeteilt. Ein natürliches Erwachsenengebiss enthält je Kiefer sechs Molaren (große Backenzähne), vier Prämolaren (kleine Backenzähne) und sechs Frontzähne (darunter zwei Eckzähne, zwei mittlere und zwei seitliche Frontzähne). Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung dieser Einteilung (ohne die jeweils 3. Molaren).

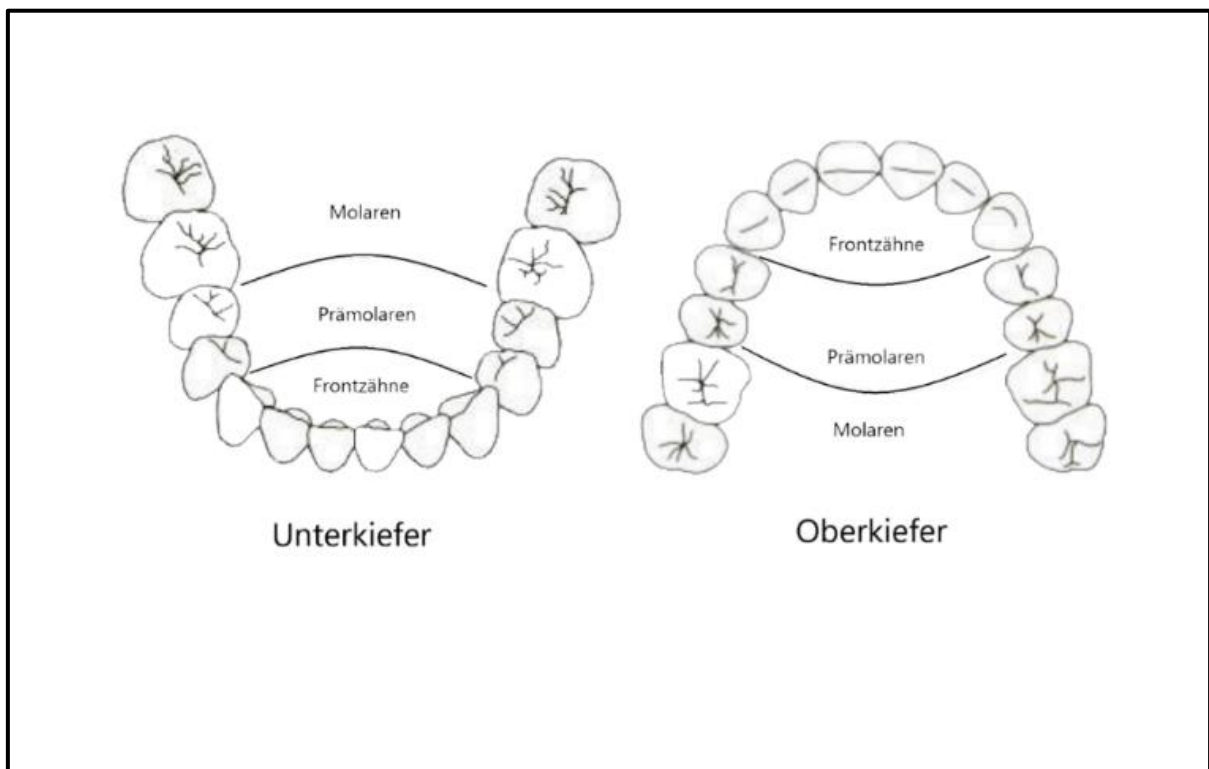


Abbildung 1: Unterkiefer und Oberkiefer Übersicht der Zähne mit Unterteilung in Frontzähne, Prämolaren und Molaren (ohne Weisheitszähne)

Aufgebaut ist ein humaner Zahn neben der Pulpa und dem Desmodont aus drei Zahnhartsubstanzen: Zahnschmelz, Dentin und Zement. Die Hauptmasse stellt das Dentin da. Es umgibt die Zahnpulpa und wird im Bereich der Zahnkrone, die aus dem Zahnfleisch herauschaut, von einer dicken Schicht aus Zahnschmelz ummantelt. Im Wurzelbereich überzieht Wurzelzement das Dentin.

Man unterscheidet das Parodont vom Endodont. Das Parodont stellt den Zahnhalteapparat dar, eine funktionelle Einheit aus Gewebsanteilen, die den Zahn in der Alveole des Kieferknochens befestigen. Zu diesen Gewebsanteilen zählen das Wurzelzement, die Wurzelhaut (Desmodont), der Alveolarknochen und das Zahnfleisch (Gingiva). Die Pulpa und ihr ummantelndes Dentin bilden anatomisch-funktionell eine Einheit, die sogenannte *Pulpa-Dentin-Einheit*. Die vom Dentin umgebene Zahnpulpa wird abhängig von ihrer Lokalisation in Kronenpulpa und Wurzelpulpa unterteilt. Das Pulpagewebe besteht zum größten Teil aus Wasser (etwa zu 75%) und stellt eine Ansammlung von gallertartigem Bindegewebe dar, das mit anastomosierenden Zellen gefüllt ist. Des Weiteren befinden sich darin Fibrozyten, Fibroblasten, kleine Venen und Arterien, Kapillare und sensible Nervenfasern. Der Hauptteil aller dieser Elemente verlässt über das sogenannte *Foramen apicale* den Zahn ins umliegende Gewebe. Kleinere Ausläufer verlassen diesen über das *apikale Delta*, über Seitenkanäle zwischen den Wurzeln (Furkationskanäle) oder am Rande dieser [32, 33]. Abbildung 2 veranschaulicht das Beschriebene.

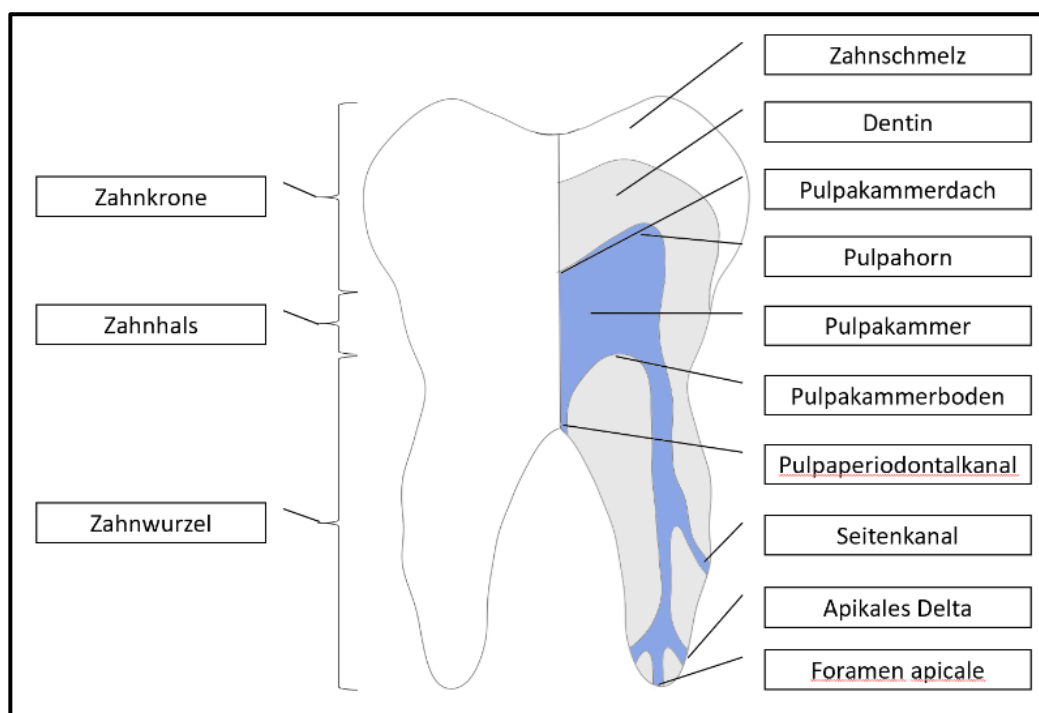


Abbildung 2: Übersichtsdarstellung der Zahnhartsubstanz mit den unterschiedlichen Pulpaabschnitten

2.2 Endodontologie

Die Endodontologie stellt einen wichtigen Teilbereich in der Zahnheilkunde dar. Sie befasst sich mit Funktion, Form und Gesundheit der Pulpa und des umliegenden Gewebes [34]. Die Pulpa kann durch Infektionen, Traumata und thermische Reize reversibel oder irreversibel geschädigt werden. Die therapeutisch relevantesten Erkrankungen der Pulpa sind die apikale Parodontitis (AP) und Pulpitis [33]. Therapieziel der Endodontologie ist es, Maßnahmen zu ergreifen, die auf einen Erhalt oder eine Wiederherstellung der Gesundheit der Pulpa und des periradikulären Gewebes abzielen [34]. Wie zu Beginn jeder Therapie steht eine eingehende Diagnostik. Wichtig sind hier neben der Anamnese die Reaktionen der Pulpa auf thermische Reize wie Kälte oder Wärme und ihre Perkussionsempfindlichkeit. Je nach Schmerzanamnese entscheidet der Behandler, ob und in welcher Form eine Wurzelkanalbehandlung stattfinden soll. Unumgänglich ist dabei die Anfertigung von einem oder mehreren Röntgenbildern, um das periapikale Gewebe ausreichend zu beurteilen [35, 36]. Die *American Association of Endodontists* empfiehlt dabei eine angemessene Anwendung von Röntgenaufnahmen, in ausgewählten Fällen auch die Anfertigung einer dreidimensionalen Aufnahme [37].

Die klassische Wurzelkanalbehandlung erfordert folgende Schritte [32-34]:

1. präoperatives Röntgenbild von der bzw. den kompletten Wurzel(n) und von mindestens zwei bis drei Millimetern periapikalem Gewebe
2. Lokalanästhesie zur Schmerzstillung
3. Kariesfreie Restauration in Form eines präendodontischen Aufbaus
4. Isolation des Zahnes durch einen Kofferdam (zur Verhinderung der Rekontamination durch Speichel, Blut etc. und zum Schutz des Patienten vor Spüllösungen u.Ä.)
5. Präparation der Zugangskavität, Lokalisation der Kanaleingänge und Sondierung der Wurzelkanäle
6. Bestimmung der Arbeitslänge (Elektrometrische Längenbestimmung & Bestätigung durch eine Röntgenmessaufnahme)
7. Präparation des Wurzelkanalsystems & zeitgleiche Spülung und Desinfektion
8. Wurzelkanalfüllung
9. Prüfung der Wurzelfüllung mithilfe eines Abschluss-Röntgenbildes

Diverse Studien identifizieren eine Abhängigkeit zwischen Behandlungserfolg und Erfahrung des Zahnarztes, darunter auch eine Publikation von Corcoran et al., veröffentlicht 2007 [38]. In dieser wurde die Anzahl an korrekt lokalisierten und endodontisch behandelten akzessorischen Kanälen in 1. und 2. OK-Molaren nach Behandlung durch drei verschiedene Zahnärzte, die eine zweijährige Weiterbildung zum Endodontologen absolvierten, verglichen. Gegenübergestellt wurde die Anzahl der aufgefundenen behandelten akzessorischen Kanäle in den ersten sechs Monaten ihrer Ausbildung sowie in ihren letzten sechs Fortbildungsmonaten. Hierbei wurde ein signifikanter Anstieg der aufgefundenen Kanäle festgestellt [38].

Die Anwendung von Vergrößerungshilfen wie dentalen Operationsmikroskopen (DOM) und Lupenbrillen unterstützt die Therapie außerdem. Buhrley et al. verglichen und analysierten 2002 verschiedene Arten von Vergrößerungshilfen und deren Nutzen. Neben der vergrößerten und verbesserten Darstellung des Behandlungsfeldes beschreiben sie einen signifikanten Anstieg bezüglich des Auffindens von akzessorischen Wurzelkanälen, Isthmen und Mikrofrakturen [39]. Optische Hilfsmittel zur Diagnostik und Therapie werden bereits in der Ausbildung empfohlen, um beispielsweise Wurzelkanalsysteme vollständig und reproduzierbar aufzufinden [40]. Unter anderem empfiehlt die *European Society of Endodontology* in ihrem Qualitäts-Leitfaden die Nutzung von Vergrößerungshilfen und zusätzlichen Lichtquellen zur Sichtung und Präparation von Wurzelkanaleingängen und Nervenkanälen [34].

Aufgrund der Komplexität des Wurzelkanalsystems existiert eine Vielzahl von potenziellen Gründen für einen Misserfolg der Behandlung [28, 41]. Oftmals besteht ein multikausaler Zusammenhang, beispielsweise iatrogene Perforationen des Zahnes, Fehler in der Durchführung der Wurzelkanalbehandlung, persistierende apikale Infektionen oder das unbewusste oder fehlerhafte Auslassen von Bereichen der Pulpakavität (akzessorische Kanäle o.Ä.) und somit unzureichendes Instrumentieren und Desinfizieren [21]. Hoen und Pink veröffentlichten 2002 ihre Ergebnisse bezüglich Revisionsbehandlungen. Sie stellten fest, dass etwa 42% der untersuchten Zähne uninstrumentierte und unbehandelte Pulpabereiche aufwiesen [42]. Dieser Punkt hat einen wesentlichen Effekt auf das Therapieresultat einer Wurzelkanalbehandlung [28]. Die Komplexität der Wurzelkanalsysteme verschiedener Zähne stellt für den Behandler oft eine große Herausforderung dar. Neben bereits erwähnten Vergrößerungshilfen setzt die Therapie ein hohes Wissen bezüglich gängiger Wurzelkanalanatomien voraus [43].

Die anatomischen Variationen sind ein traditioneller wie aktueller Forschungsgegenstand. Erste Untersuchungen gehen auf das Jahr 1844 zurück und wurden von Carabelli et al. beschrieben [44]. 1912 veröffentlichten Preiswerk et al. ihre Ergebnisse [45]. Hess und Zurcher et al. untersuchten 1925 eine Vielzahl extrahierter Zähne und beschrieben deren jeweilige Kanalkonfigurationen [46]. Es existieren verschiedene Klassifizierungen der Wurzelkanalanatomien [1]. Die erste Kategorisierung in zuerst drei unterschiedliche Typen erfolgte durch Weine et al. 1969 [47]. Vertucci definierte seine Klassifikation 1984 in acht unterschiedliche Typen [20].

Jener untersuchte 1984 anhand 2.400 extrahierter Zähne verschiedene Wurzelkanalkonfigurationen. Er beschrieb dabei ein aufwendiges chemisches Färbeverfahren, mittels dessen extrahierte Zähne *in vitro* untersucht werden konnten. Durch diese sogenannte *Transparenzmethode* gelang es ihm, eine Klassifizierung vorzunehmen, die die Anzahl der Wurzelkanäle, die Ramifikationen der Hauptkanäle sowie die Lokalisation des *Foramen apicale* und der querlaufenden Anastomosen in die Beschreibung miteinbezieht [20].

Die Abbildungen 3a und 3b zeigen Fotografien, die Vertucci 1984 im Rahmen dieser Klassifizierung publizierte. Auf der ersten Fotografie (Abb. 3a) sind diverse mögliche Variationen der 1. UK-Prämolaren, auf der zweiten (Abb. 3b) diverse mögliche Variationen der 2. UK-Prämolaren zu sehen – mit je einem, zwei oder drei Kanalausgängen am Apex.

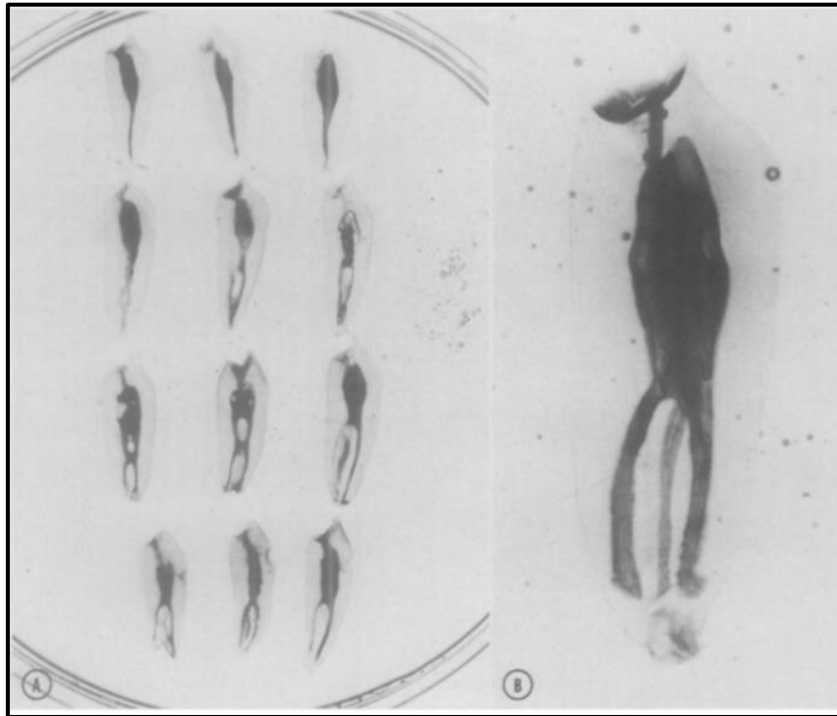


Abbildung 3a: Fotografie 1. UK-Prämolaren; *linke Seite (A)*: obere Reihe: Vertucci Klassifikation Typ I, zweite Reihe: Typ III, dritte Reihe: Typ IV, vierte Reihe: Typ V; *rechte Seite (B)*: drei Kanäle am Apex: Typ VIII , Vertucci, 1984

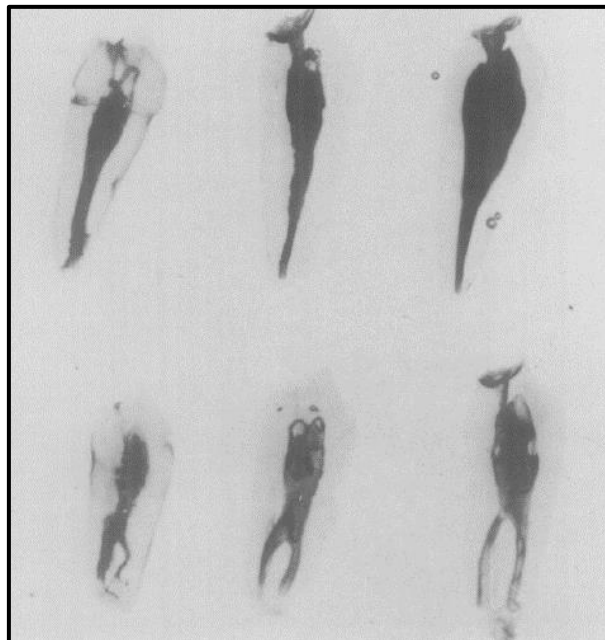


Abbildung 3b: Fotografie 2. UK-Prämolaren; obere Reihe: Typ I Klassifikation, untere Reihe: Typ V , Vertucci, 1984 [20]

Neben Wurzel-, und Kanalanzahl, sowie Verzweigungen am apikalen Delta spielt der Kanalquerschnitt eine gesonderte Rolle. Dabei nehmen sogenannte *c-shaped* Kanäle

einen besonderen Stellenwert ein. Diese beschreiben Zähne mit c-förmigen Wurzelkanalquerschnitten. In der Literatur finden sich diesbezüglich diverse Einteilungen und Studien [48].

2.2.1 Klassifikation nach Vertucci

Die vorgenommene Unterteilung nach Vertucci lässt sich wie folgt beschreiben (vgl. dazu auch die Übersichtsdarstellung in Abbildung 4) [18, 20]:

1. Typ I (1-1): ein einzelner Wurzelkanal verlässt den Zahn durch den Apex
2. Typ II (2-1): zwei separate Wurzelkanäle konfluieren im unteren Wurzel-drittel und verlassen gemeinsam das *Foramen apicale*
3. Typ III (1-2-1): ein Wurzelkanal verlässt die Kronenpulpa, teilt sich daraufhin in zwei Kanäle und konfluiert kurz vor dem Apex, den er als isolierter Kanal verlässt
4. Typ IV (2-2): zwei separate Wurzelkanäle erstrecken sich als solche bis zum Apex
5. Typ V (1-2): ein Wurzelkanal verlässt isoliert die Kronenpulpa und teilt sich kurz vor dem Apex in zwei einzelne *Foramen apicale*
6. Typ VI (2-1-2): zwei einzelne Wurzelkanäle, die sich im Wurzelverlauf vereinigen und sich dann vor oder am Apex wieder zweiteilen
7. Typ VII (1-2-1-2): ein Wurzelkanal verlässt einzeln die Kronenpulpa, zweigt sich auf, vereinigt sich wieder im Verlauf, um sich schließlich am *Foramen apicale* erneut zu teilen
8. Typ VIII (3-3): drei separate Kanäle verlassen die Pulpakammer und erstrecken sich als solche bis zum Apex [20, 21]

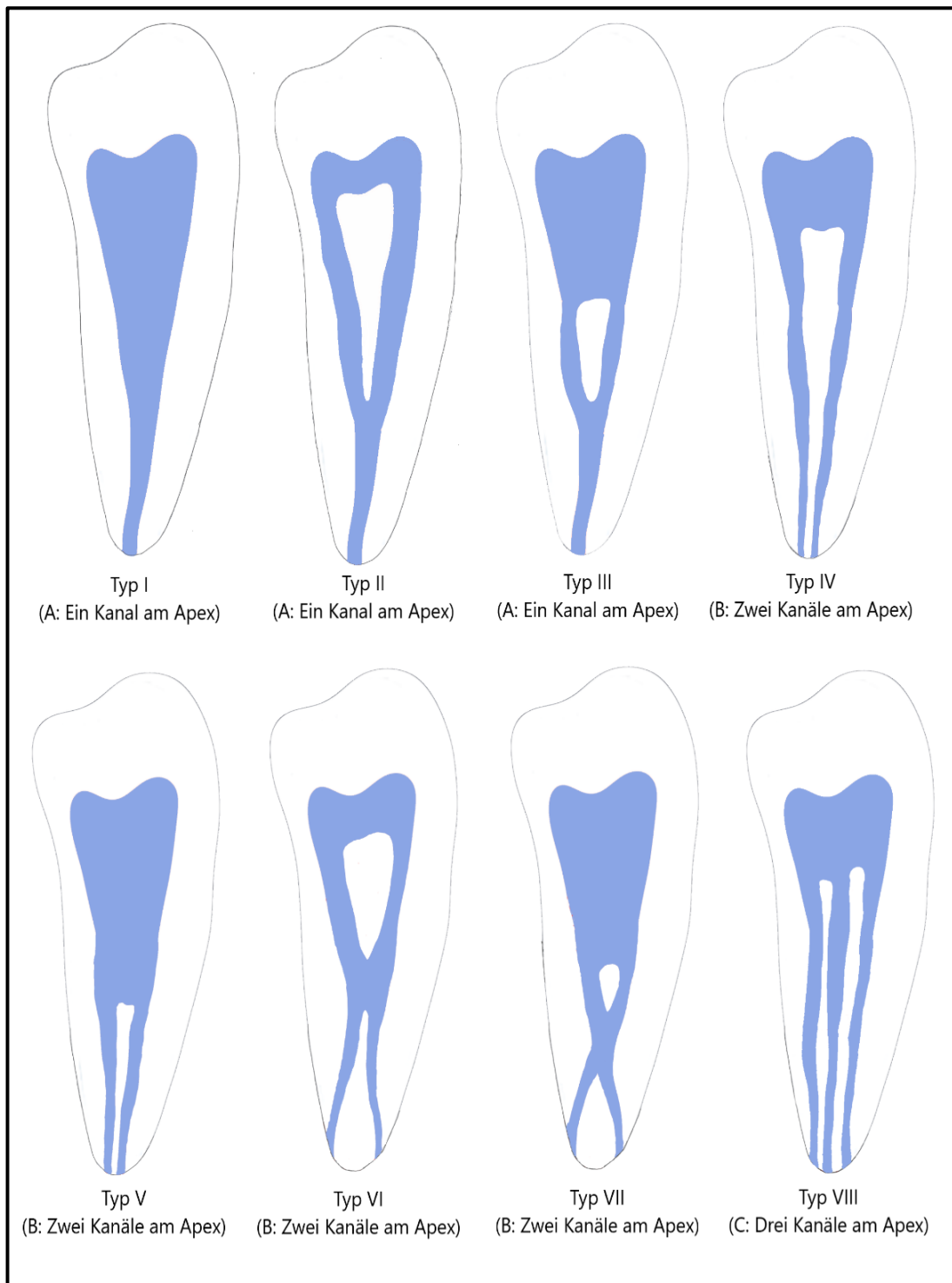


Abbildung 4: Darstellung einer Übersicht der Vertucci-Klassifikationen: Typ I–VIII

Zusätzlich zur zuvor beschriebenen Transparenzmethode lassen sich Informationen zu Wurzelkanalsystem und Anatomie aus Röntgenbildern auswerten. Mithilfe graziler

Wurzelkanalinstrumenten in einzelnen Kanälen kann Aufschluss über ihre Verläufe und Verzweigungen gewonnen werden. So beschrieben Weine et al. 1995 anhand eines Färbeverfahrens der Pulpa und Röntgenaufnahmen mit Handfeilen im Kanal die verschiedenen Kanalkonfigurationen von mesiobukkalen Wurzeln an 2. OK-Molaren [49].

Abbildung 5 zeigt eine Impression ihrer Vorgehensweise. Abgebildet ist ein 2. OK-Molar mit zwei isolierten Wurzelkanälen, die sich kurz vor dem Apex verbinden und gemeinsam die Wurzelspitze verlassen. Demonstriert wird dies mithilfe einer ISO 10 und einer ISO 8 Handfeile in den Kanälen.

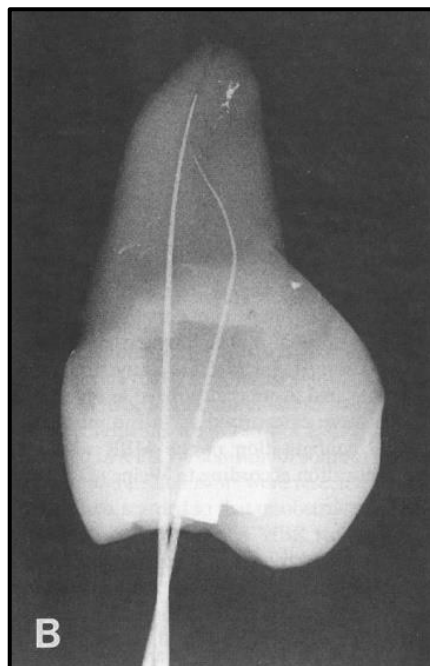


Abbildung 5: Radiografie eines 2. OK-Molars mit einer Weine-Typ II-Kanalkonfiguration. Mit je einer Handfeile im mb. und ml. Kanal, Weine et al. 1995

2.2.2 Klassifikation nach Weine et al.

Weine et al. definierten ihre Klassifizierung für Wurzelkanalanatomien und veröffentlichten diese 1969 [47]. Ausgehend von vorerst drei Grundtypen wurde die Klassifizierung 1982 durch eine vierte Kanal-Konfigurationen ergänzt [50].

Die vier Typen lassen sich wie folgt zusammenfassen und bildlich (siehe Abbildung 6) veranschaulichen:

1. Typ I (1-1): ein einzelner Kanal erstreckt sich von der Pulpakammer bis zum Apex
2. Typ II (2-1): zwei Kanäle, die sich vor dem Apex vereinen und diesen gemeinsam verlassen
3. Typ III (2-2): zwei getrennte Kanäle aus der Pulpakammer, die den Apex ebenso verlassen
4. Typ IV (1-2): ein Kanal, der sich im mittleren oder apikalen Wurzelabschnitt in zwei Kanäle verzweigt

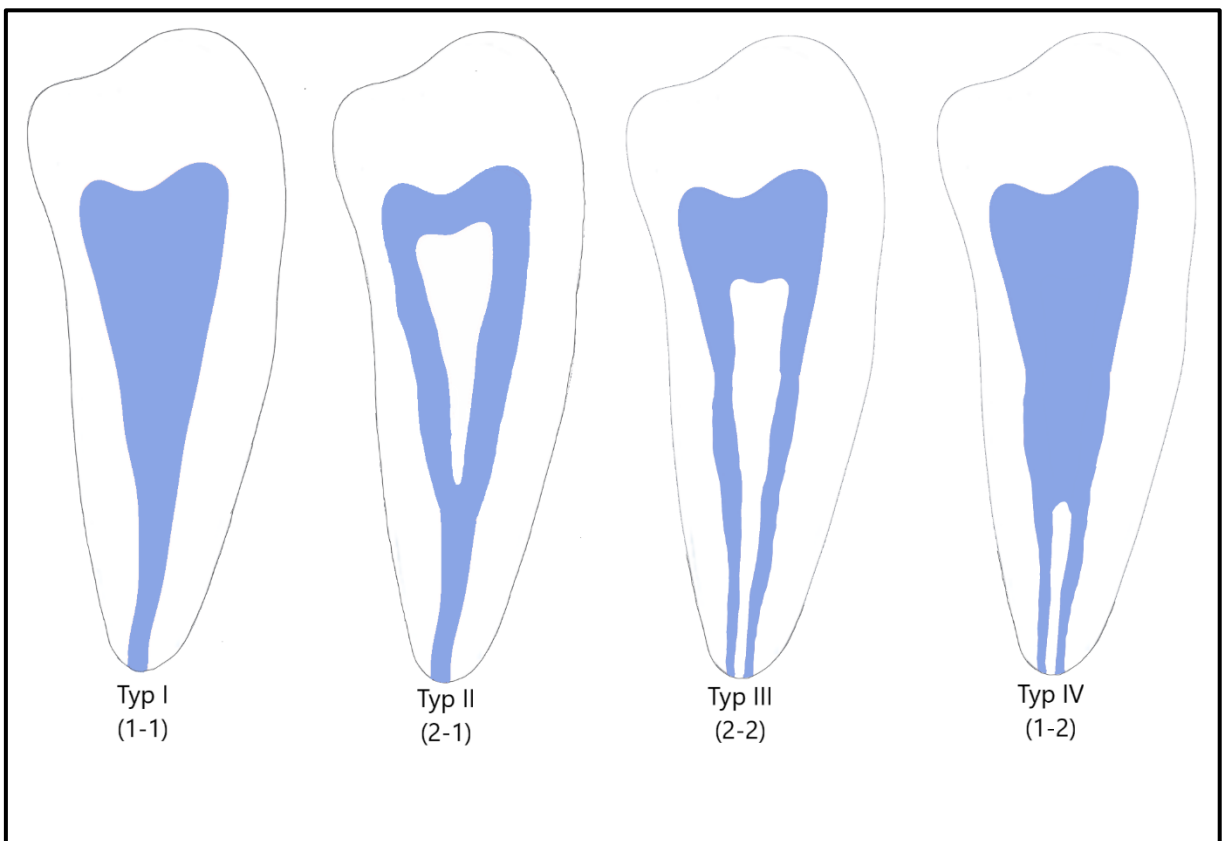


Abbildung 6: Übersicht der Klassifikationen nach Weine et al.: Typ I–IV

2.2.3 Klassifikation nach Ahmed et al.

Ebenso wie Weine et al. und Vertucci weisen Ahmed et al. auf die Dringlichkeit hin, sich als Behandler mit der Anatomie der zu behandelnden Zähne präoperativ detailliert auseinanderzusetzen [1]. 2017 entwickelten sie eine neue Klassifizierung, mit dem Gedanken, auf die hohe Komplexität der Wurzelkanalsysteme hinzuweisen.

Das Klassifikationssystem sieht eine Codierung vor, die drei separate Komponenten beinhaltet: eine Abfolge von Zahnnummer, Furkationsgrad und Wurzelkanalkonfiguration einzelner Wurzeln.

Definiert werden:

1. Zahnnummer, im Englischen: *tooth number*: **TN**
2. Anzahl der Wurzeln (**R**, Wurzel im Englischen: *root*) und ihres Furkationsgrades (Bifurkation, Trifurkation) als Hochzahl vor der Zahnnummer notiert: **^RTN**, z.B. bei zwei Wurzeln: **²TN**
3. Kanalkonfiguration jeder einzelnen Wurzel, die den kontinuierlichen Verlauf ab der Mündung (**O**, aus dem Englischen: *orifice*) der Pulpakammer in die einzelnen Kanäle, durch den Kanal (**C**) selbst, bis zum Foramen (**F**) am Apex beschreibt; sie werden ebenfalls als hochgestellte Zahl vor jeder einzelnen Wurzel dargestellt

In diesem Klassifikationssystem wird demnach exemplarisch ein 1. OK-Molar mit einer Vertucci Typ III-Verzweigung in der mb-Wurzel wie folgt beschrieben:

³16 MB¹⁻²⁻¹ DB¹ P¹

Tabelle 1 und Abbildung 7 fassen die unterschiedlichen Codierungen für ein-, zwei- und mehrwurzelige Zähne nochmals zusammen:

Zahn-Typ	Codierung
Zahn mit einer Wurzel	¹ TN ^{O-C-F}
Zahn mit zwei Wurzeln	² TN R ¹ ^{O-C-F} R ² ^{O-C-F}
Zahn mit mehreren Wurzeln n	ⁿ TN R ¹ ^{O-C-F} R ² ^{O-C-F} R ⁿ ^{O-C-F}

TN: Tooth Number; R: Root; O: Orifice; C: Canal; F: Foramen

Tabelle 1: Codierung für ein- bis mehrwurzelige Zähne der Klassifikation nach Ahmed et al., 2017

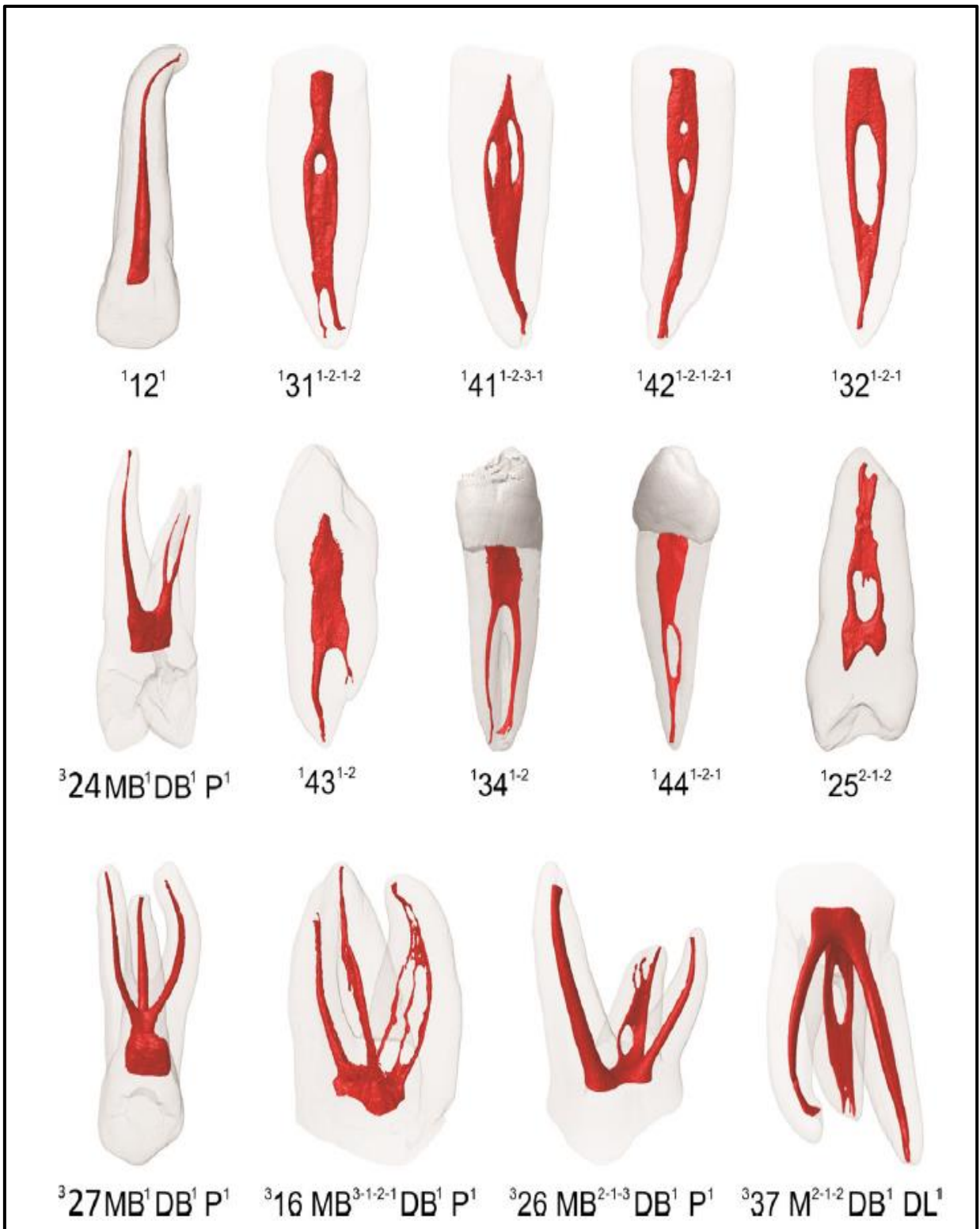


Abbildung 7: Micro-CT-Aufnahmen unterschiedlicher Zähne zur Darstellung der Wurzelkanalsysteme, klassifiziert nach Ahmed et al., 2017

2.2.4 Anatomie der 1. UK-Prämolaren 34 und 44

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit UK-Prämolaren, da diese eine besonders hohe Variation bezüglich ihrer Wurzelkanalanatomie vorweisen [18, 27, 51].

In etwa 98% der Fälle weist der 1. UK-Prämolar eine Wurzel auf, in etwa 1,8% der Fälle zwei, in 0,2% der Fälle drei Wurzeln [27]. Für die Zugangskavität empfiehlt sich eine oro-vestibuläre Trepanation, da sich der Kanaleingang oft zentral und schlitzförmig zeigt [52]. Die durchschnittliche Zahnlänge beträgt 21,5 mm. Die Kronenpulpa erstreckt sich über zwei Pulpahörner, ein kleines Horn lingual und ein größeres in bukkaler Ausrichtung. Die Kronenform zeigt ebenfalls einen kleinen lingualen Höcker und einen etwas größeren bukkal (siehe Abbildung 8) [20, 32].

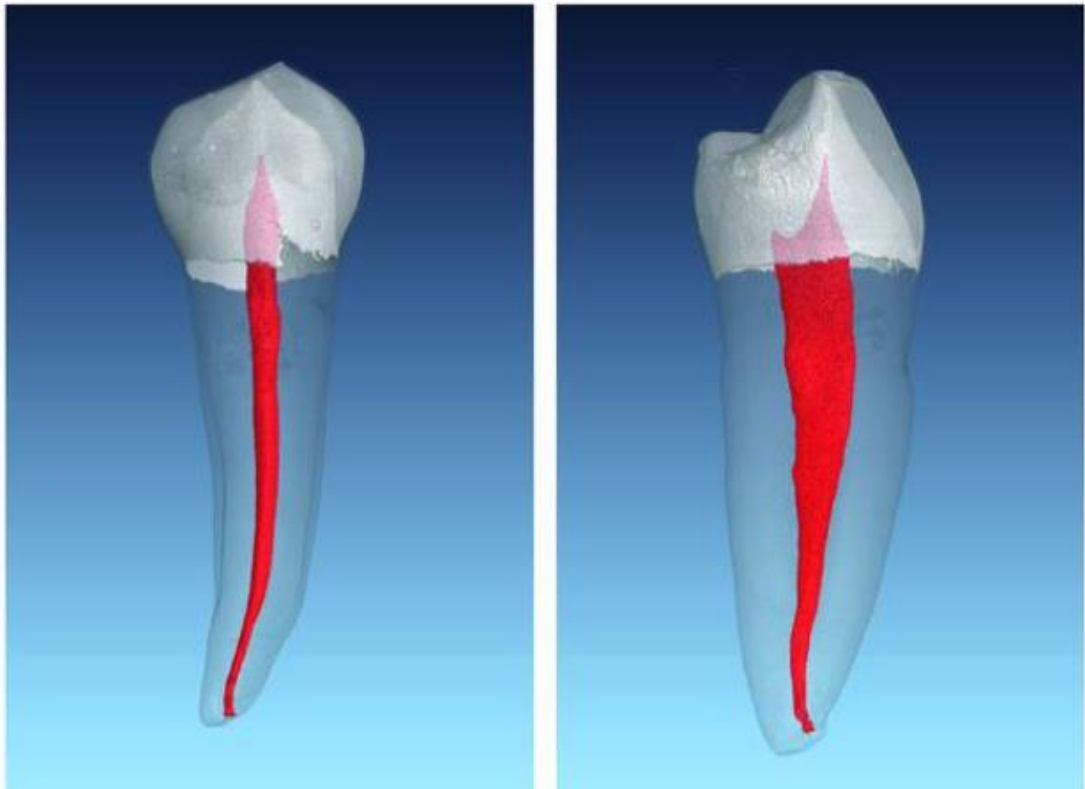


Abbildung 8: Ansicht eines 1. UK-Prämolars von **a)** vestibulär und **b)** approximal. Micro-CT-Aufnahme, Paqué et al., 2018

2.2.5 Anatomie der 2. UK-Prämolaren 35 und 45

Der 2. UK-Prämolar ähnelt dem 1. UK-Prämolaren stark in seiner Variation. Er weist noch häufiger einwurzelige Anatomien auf (etwa zu 99,6%). Sehr selten sind zwei oder drei Wurzeln vorzufinden (0,3% und 0,1%). Die durchschnittliche Länge der 2. UK-Prämolaren beträgt ebenfalls 21,5 mm. Die folgende Abbildung 9 verdeutlicht das mögliche Auftreten von einem mehrkanaligem System mit multiplen Seitenkanälen [20, 32].

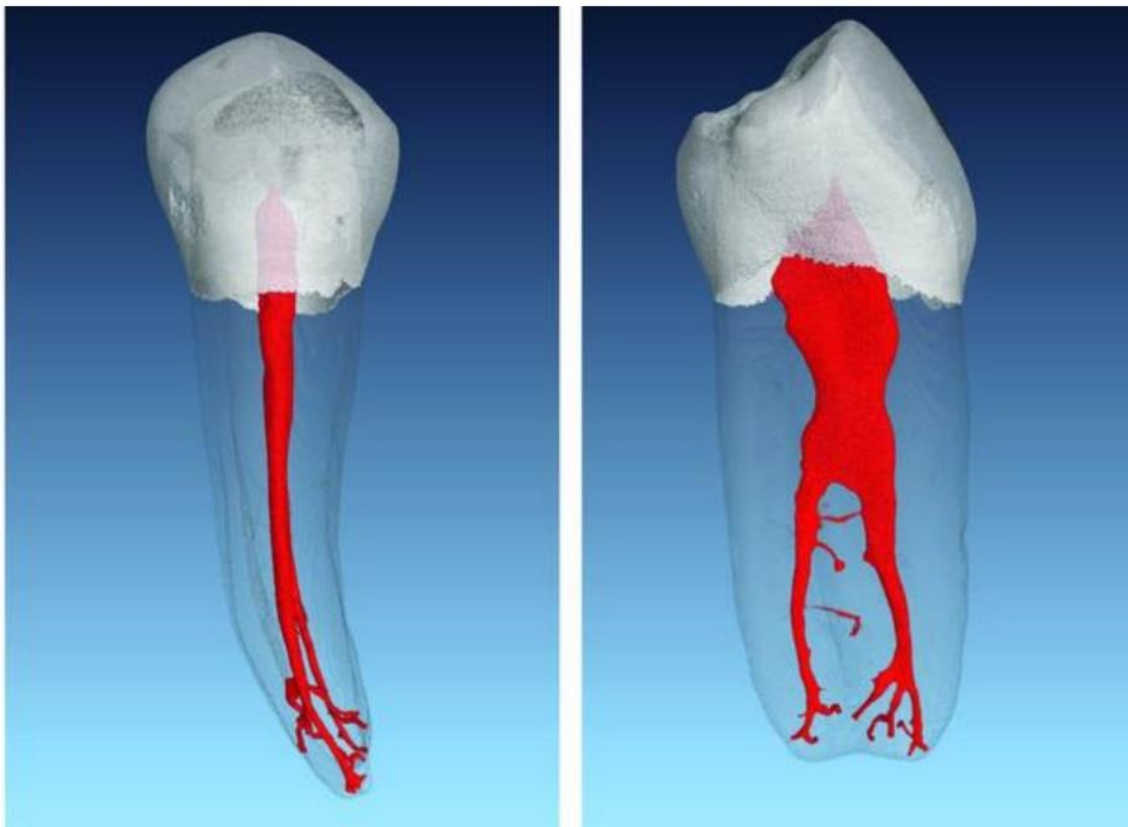


Abbildung 9: Ansicht eines 2. UK-Prämolars von **a)** vestibulär und **b)** approximal Micro-CT- Aufnahme, Paqué et al., 2018

2.3 Bildgebende Verfahren in der Zahnheilkunde

Neben der obligatorischen klinischen Untersuchung nutzt der behandelnde Zahnarzt bildgebende Verfahren, speziell Röntgenaufnahmen, zur Diagnostik und Therapieentscheidung. Hierbei stellt das zweidimensionale Bildgebungsverfahren bislang den Goldstandard in der Endodontie dar [53-56]. Auch die *American Association of Endodontists* sprach sich in ihrer Qualitätsleitlinie für endodontische Maßnahmen von 2016

für zweidimensionale Röntgenaufnahmen aus. Ggf. sollten diese aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen werden, um hinreichende Informationen zu liefern [34]. Neben zweidimensionalen intraoralen Aufnahmen sind auch dreidimensionale Kleinfeld-Aufnahmen mit einem digitalen Volumentomographen möglich. Diese wurden 2019 in selektierten Fällen sowie komplexeren Gegebenheiten ebenfalls von der *American Association of Endodontists* empfohlen [57].

1895 entdeckte der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen in Würzburg die sogenannten »X-Strahlen«, heute im deutschen Sprachraum besser bekannt als »Röntgenstrahlen« [2, 58]. Noch im selben Jahr fertigte er die erste Röntgenaufnahme seiner eigenen Hand an. Ein Jahr danach nutzte der Braunschweiger Zahnarzt Friedrich Otto Walkhoff diese Strahlenart, um erste Aufnahmen von extrahierten Zähnen auf Glasplatten zu erstellen. Dabei handelte es sich um zweidimensionale Projektionsverfahren [2, 59].

Nachdem der Wiener Mathematiker Johann Radon 1917 das mathematische Fundament für die Computertomographie (kurz CT) legte, ermöglichten der britische Elektrotechniker Godfrey Newbold Hounsfield und der amerikanische Physiker Allan McLeod Cormack erstmals die dreidimensionale Darstellung in der medizinischen Diagnostik mittels eines Computertomographen. 1979 erhielten beide den Nobelpreis für Medizin für ihre Erfindung [2].

2.3.1 Zweidimensionales Röntgen

Die Entstehung eines zweidimensionalen Röntgenbildes wird durch ein Projektionsröntgen bzw. eine sogenannte Projektionsradiografie beschrieben. Diese definiert die Abbildung eines Objektes auf einem photonensensitiven Detektor nach dessen Durchstrahlung. Die Messungsart bezeichnet man als *Transmissionsmessung*, die wiedergibt, wie viele Röntgenphotonen durch das Objekt hindurchtreten und auf dem Detektor auftreffen. Der Detektor stellt vereinfacht gesagt die Fläche dar, mit deren Hilfe gemessen wird, wie viel Photonenenergie nach der Absorption durch das geröntgte Objekt noch ortsbezogen detektiert wird. Je dichter ein Objekt ist, desto stärker ist die Absorption (und Streuung) der Röntgenstrahlen und folglich desto weniger Photonen werden am Detektor gemessen [2, 31].

Intraorale Tubusaufnahmen

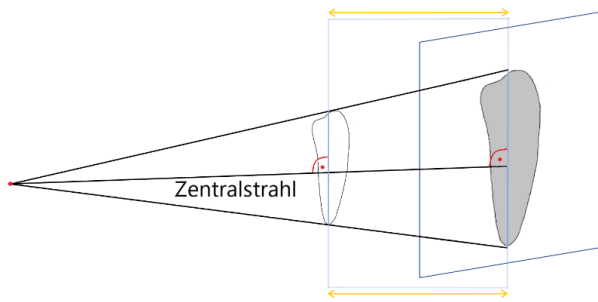
Intraorale Tubusaufnahmen (IOA) stellen heutzutage den Goldstandard für Röntgenbilder in der Zahnmedizin dar. Die korrekte Bezeichnung ist »intraorale Aufnahmen mit dentalen Tubusgeräten« [2, 60].

Sie werden von extraoralen Tubusaufnahmen unterschieden. Ihr Unterschied wird durch die Position des Bildrezeptors (Detektors) definiert. Bei der IOA wird dieser innerhalb der Mundhöhle (»intraoral«) platziert, während sich die Röntgenröhre (Röntgenquelle) außerhalb der Mundhöhle befindet. Extraorale Röntgenaufnahmen haben beide Komponenten außerhalb des Mundes. Die Panoramaschichtaufnahme (PSA) ist ein klassisches Beispiel für eine extraorale Aufnahme, ein Beispiel für dreidimensionale Aufnahmen ist die Dentale digitale Volumentomographie.

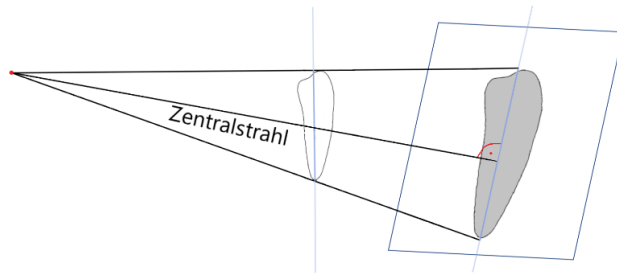
Um die intraorale Zahnaufnahme nachvollziehen zu können, ist die Kenntnis einiger Begriffe der *Projektionsgeometrie* notwendig. Diese bezeichnet die räumliche Positionierung des Objektes, der Strahlenquelle (Röntgenröhre) und des Detektors (Bildrezeptors) während der Aufnahme relativ zueinander. Keine Einstelltechnik erreicht zu einhundert Prozent die »ideale Projektionsgeometrie« für ein ideales Röntgenbild, allerdings sollte das Optimum bei jeder Aufnahme angestrebt werden, um möglichst wenige Verzerrungen, Vergrößerungen und/oder Verkleinerungen entstehen zu lassen.

Bei der Projektionsgeometrie werden drei Einstelltechniken unterschieden: Die *Parallel-, Rechtwinkel- und Halbwinkeltechnik*. Erstere beschreibt eine Parallelität zwischen Objekt- und Rezeptorachse. Der Zentralstrahl, ausgehend von der Röntgenröhre, trifft idealerweise senkrecht auf das Objekt (vgl. Abbildung 10a). Die Anatomie im Mund des Patienten lässt eine solche Einstelltechnik lediglich im Unterkieferseitenzahnbereich zu, daher wird die *Rechtwinkeltechnik* (vgl. Abbildung 10b) genutzt. Hierbei wird kein Winkel zwischen Objekt- und Rezeptorachse definiert, der Zentralstrahl soll jedoch weiterhin rechtwinklig auf den Bildrezeptor auftreffen, um Verzerrungen in der Darstellung zu vermeiden. In der Regel wird ein Haltesystem zur Hilfe genommen, um die Einstellung zu erleichtern. Die dritte Technik, die sogenannte *Halbwinkeltechnik* (vgl. Abbildung 10c), beschreibt einen Zentralstrahl, der senkrecht auf die Winkelhalbierende trifft, die durch die Objekt- und Bildrezeptorachse definiert wird [2, 31].

a) Paralleltechnik



b) Rechtwinkeltechnik



c) Halbwinkeltechnik

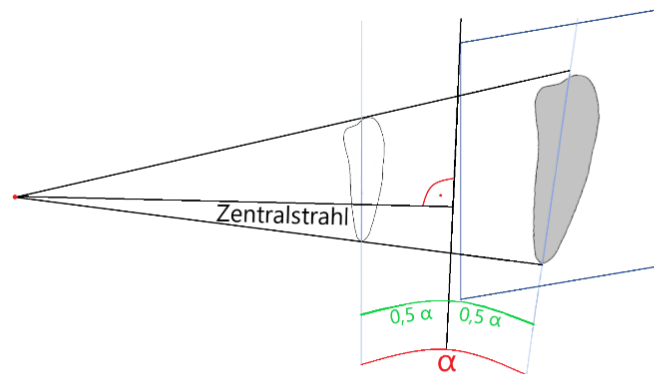


Abbildung 10: Darstellung der unterschiedlichen Einstelltechniken: a) Paralleltechnik, b) Rechtwinkeltechnik und c) Halbwinkeltechnik; grafische Darstellung nach Vorlage der Skizzierungen von Schulze R., 2019 [2]

2.3.2 Dreidimensionales Röntgen: Computertomographie und Dentale digitale Volumentomographie

Die Computertomographie (CT) und die Dentale digitale Volumentomographie (DVT) basieren auf dem Prinzip eines berechneten Bildes mithilfe eines Computers [2]. Multiple einzelne Röntgenbilder werden aus unterschiedlichen Richtungen und Winkeln aufgenommen und digital zu einem Bild berechnet. Die Indikationen für das klassische CT sind in der Zahnheilkunde limitiert und beschränken sich unter anderem auf OP-Planungen mit Umstellungsosteotomien, Tumorchirurgie und Tumordiagnostik sowie auf den Implantologiebereich, da die Anwendung mit einer relativ hohen Strahlenexposition für den Patienten zusammenhängt [2, 61].

Das erste praktisch verwendbare CT-Gerät wurde von dem britischen Ingenieur Godfrey Newbold Hounsfield im Jahre 1972 entwickelt und veröffentlicht (vgl. Kapitel 2.3) [62].

Seit seiner Erstvorstellung wurden viele Optimierungen im Bereich der Optik und Technik des CTs unternommen. Über sogenannte »Spiral-CTs« mit fächerförmigen Strahlenbündeln und einzeiligen Detektoren sowie über CT-Modelle mit kegelförmigen Strahlenbündeln gelangte man final zu solchen mit pyramidenförmigen Strahlenbündeln. Spiral-CTs (Helix-CTs) fahren in einer spiralförmigen Umlaufbahn um den Patienten herum, der währenddessen auf einem Tisch liegt. Eine bedeutende Verbesserung des Vorgangs gelang durch ein kontinuierliches Vorschieben des Patienten durch die ringförmigen Röhren-Detektorsysteme (sog. Gantry), was eine verkürzte Scanzeit und eine reduzierte Strahlenexposition bedeutete. Ein fächerförmiges Strahlenbündel durchfährt den Patienten und trifft dabei auf einen einzeiligen Detektor auf [2].

1998 machten sich Mozzo et al. das Prinzip der CT im Kopf-Hals-Bereich zunutze. Sie zeigten Innovationen auf, die es mithilfe eines konusförmigen Strahlenbündels, das auf einen sogenannten Flatpanel-Detektor (Flächendetektoren) auftrifft, ermöglichten, dreidimensionale Bilder zu erzeugen (Abb.12) [63]. International als Cone beam computed tomography (CBCT) bezeichnet, sind diese Geräte im deutschsprachigen Raum als Dentale digitale Volumentomographen bekannt. Der grundlegende Unterschied zwischen CT und DVT besteht in der Geometrie des Strahlenbündels (fächer- oder kegelförmig) und in den jeweiligen digitalen Detektoren (Einzeilen- oder Flächendetektoren). Die Strahlenform eines modernen digitalen Volumentomographen zeigt heute vermehrt eine Pyramidenform. Während des Umlaufs um den Patienten werden

mehrere Hundert Röntgenaufnahmen aufgenommen, um einen DVT-Datensatz zu kreieren. Auf diese Art wird aus zweidimensionalen Projektionen ein dreidimensionales Bild erzeugt, in dem mit geeigneter Software jede einzeln aufgenommene anatomische Struktur Schicht für Schicht virtuell durchlaufen werden kann [2].

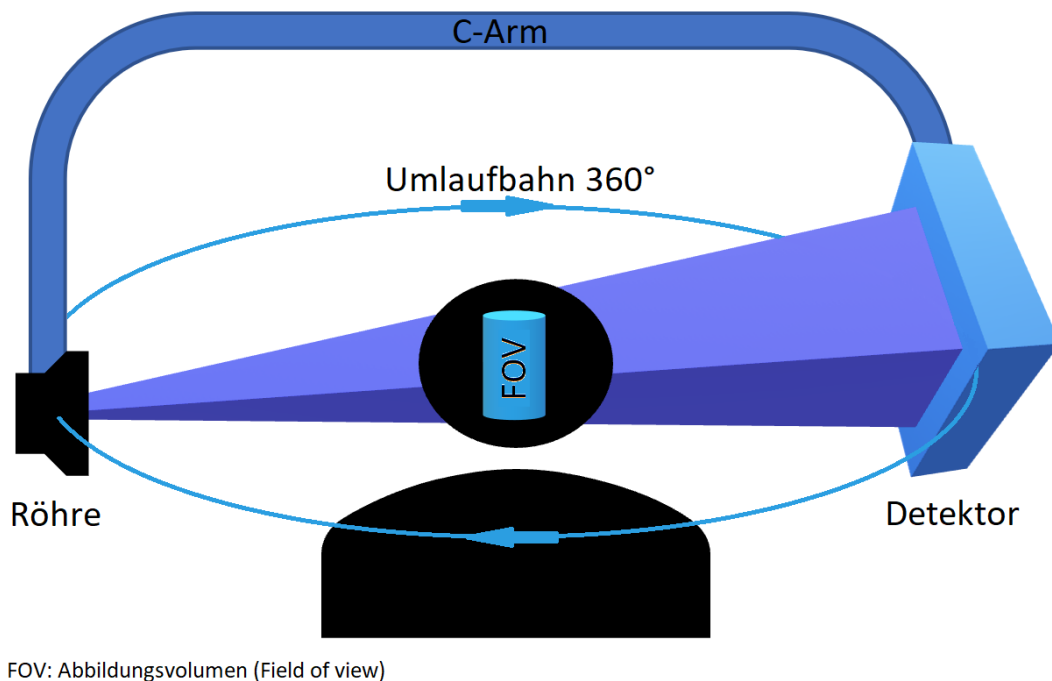


Abbildung 11: Skizzierung der Geometrie eines digitalen Volumentomographen: Flatpanel-Detektor und Röhre sind mittels eines C-Armes miteinander verbunden, sodass eine 360°-Rotation um das FOV (Abbildungsvolumen) ermöglicht ist. Das Strahlenbündel ist hierbei pyramidenförmig.

2.3.3 Endodontologie im zwei- und dreidimensionalen Röntgen

Nach dem ersten Einsatz der DVT 1998 im europäischen Raum stiegen ihre Anwendungen in der zahnärztlichen Therapie zunehmend [2, 64]. Die *European Society of Endodontists* beschreibt in einem Review 2015 unterschiedliche Indikationen zur Diagnostik mit 3D-Aufnahmen. Nach klinischer Befundung soll die DVT als zusätzliches Hilfsmittel immer dann zur Anwendung kommen, wenn die konventionelle IOA keine

hinreichenden Informationen zur Therapiebestimmung liefert. Folgende Indikationsbeispiele können eine dentale 3D-Aufnahme rechtfertigen[65] :

- uneindeutige periapikale Transluzenzen bei zusätzlich unspezifischen Symptomen
- Einschätzung dentoalveolärer Traumata bei unzureichender Einschätzung mittels vorhandener IOA
- präendodontische Beurteilung und Fallplanung von komplexen anatomischen Wurzelkanalsystemen (bspw. *Dens invaginatus*) und/oder Obliterationsvorgängen
- endodontische Revisionsbehandlungen mit Verdacht auf unbehandelte/n Wurzelkanal/kanäle
- externe Resorptionsvorgänge und Fallmanagement
- Verdacht auf Wurzelfrakturen bei mangelnder Aussagekraft des klinischen Befundes

Aufgrund der unterschiedlichen Röntgentechniken der zwei- und dreidimensionalen Aufnahmen kommt es zu verschiedenartigen Strahlenexpositionen. Um diese zu vergleichen bezieht man sich auf die sogenannte »effektive Dosis«. Sie beschreibt die Gesamtheit der gewichteten Organdosen im Körper unter Einbeziehung der Strahlenexposition [3]. Ihre SI-Einheit lautet Sievert (Sv), als Basis für die Angaben bezieht man sich auf die aktuellen Gewebewichtungsfaktoren der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) [2, 3]. Schulze et al. verglichen 2019 anhand aktueller Studien die effektiven Dosen von IOA, PSA, CT und DVT. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse zusammen [2-17, 23].

Effektive Dosis in μSv	IOA	PSA	DVT	CT
Mittelwerte	4,5	9,9	106,2	795,7

Tabelle 2: Literaturangaben bezüglich der Mittelwerte effektiver Dosen von IOA, PSA, DVT und CT

In der Endodontologie wird eine Zunahme der dreidimensionalen Röntgendiagnostik festgestellt. Einige Studien befassten sich intensiv mit dem Mehrwert einer

dreidimensionalen Aufnahme im Vergleich zu einer zweidimensionalen. Diverse Autoren empfehlen die konventionellen Röntgenaufnahmen aus verschiedenen Winkeln aufzunehmen. Zu diesen gehörten beispielsweise Rödiger und Hülsmann, die 2003 in Bezug auf 2. UK-Prämolaren konventionelle Röntgenaufnahmen untersuchten und zu dem Entschluss kamen, dass eine Therapie mithilfe von IOA aus unterschiedlichen Winkeln sehr gut auch nicht-chirurgisch möglich sei [66]. Walton et al. empfahlen zwei Aufnahmen, eine ortho-radiale und die zweite aus einem um 30 Grad veränderten Winkel mesial- oder distalexzentrisch zur Darstellung des Kanalverlaufes [67]. Rapsch und Paqué stellten 2017 fest, dass die korrekte Identifizierung eines zweikanaligen Wurzelkanalsystems bei 1.UK-Prämolaren durch die Kombination eines orthograden Röntgenbildes und einer 40 Grad mesial-exzentrischen Aufnahme zu einem signifikanten Anstieg der Erfolgsquote führt [68]. Präendodontische Röntgenbilder können wichtige Hinweise für ein mehrkanaliges Wurzelkanalsystem geben. Werden Wurzelkanäle in ihrem Verlauf von coronal nach apikal verengt oder weniger deutlich dargestellt, deutet dies oft auf eine Verzweigung des Kanalsystems in diesem Bereich hin [23, 69]. Die Abbildungen 12 A-C zeigen denselben Zahn 35 eines Patienten einer Wiesbadener Praxis in unterschiedlichen Aufnahmetypen. 12 A zeigt einen Ausschnitt aus einer PSA, 12 B den jeweiligen aus der IOA und 12 C zeigt die transversalen Schichten des Zahnes von okklusal nach apikal. Dabei wird eine Aufteilung des Kanalsystems in drei Wurzeln deutlich.

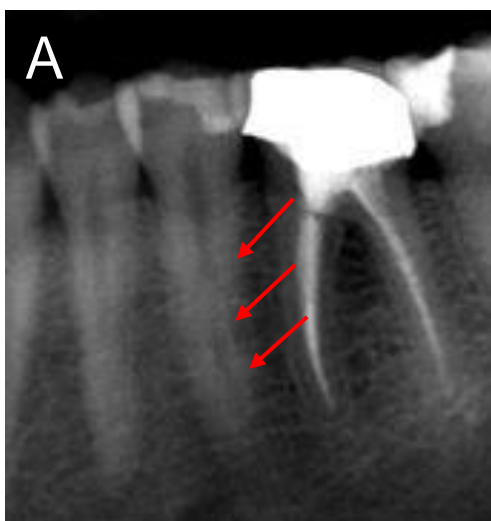


Abbildung 12A: Zahn 35 mit einer Aufzweigung im mittleren Wurzeltrakt (PSA)

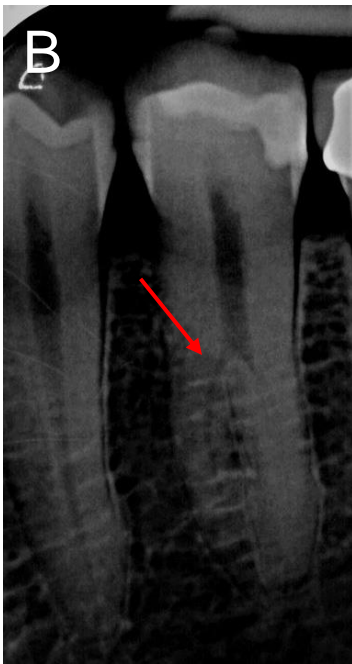


Abbildung 12B: Derselbe Zahn 35 in der IOA

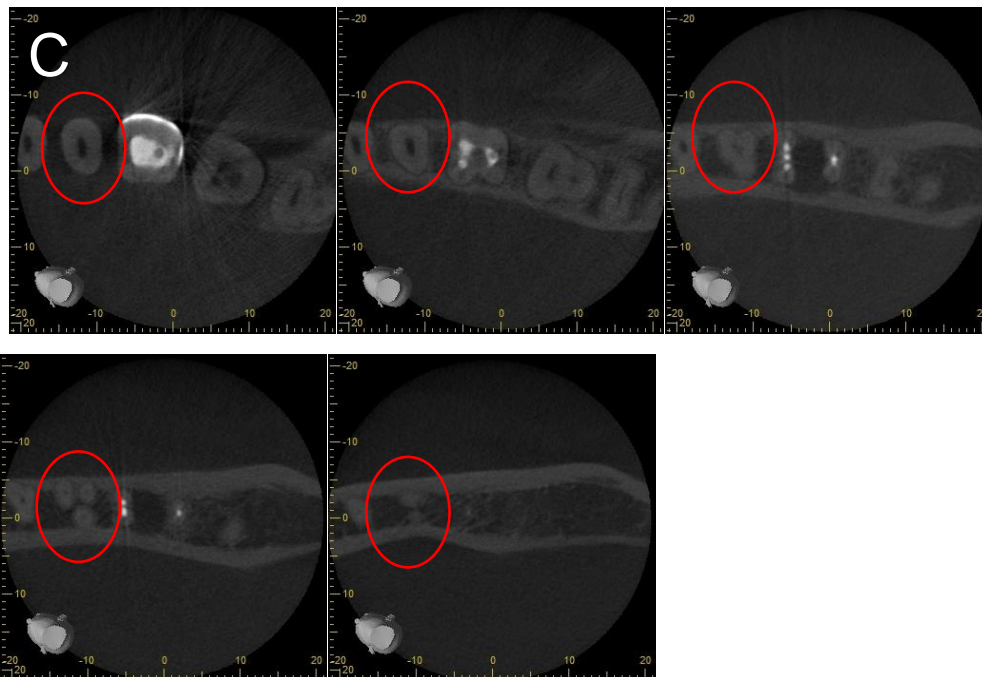


Abbildung 12C: Derselbe Zahn 35 in der dreidimensionalen Aufnahme

Die S2k-Leitlinie »Dentale digitale Volumentomographie« stellt die aktuelle Fachkunderichtlinie im Bereich der Dentalen Volumentomographie dar. Sie wurde 2013 veröffentlicht und befindet sich zum Zeitpunkt der vorliegenden Arbeit in Überarbeitung

[70]. Die Autoren empfehlen in ausgewählten Fällen die Anwendung eines digitalen Volumentomographen zur Unterstützung in der endodontischen Therapie [70]. Im Jahr 2015 veröffentlichten die *American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology* gemeinsam mit der *American Association of Endodontists* eine Stellungnahme zur Anwendung der DVT. Die IOA stellt die klassische Aufnahme zur endodontischen Diagnosestellung dar, in komplexen Fragestellungen wird zur dreidimensionalen Aufnahme geraten [37]. Eine vorausgehende ausgedehnte Anfangsdiagnostik für Wurzelkanalbehandlungen ist dabei ein unumgänglicher Schritt und sollte mit höchster Sorgfalt abgeschlossen sein, bevor auf dosisintensive Röntgenaufnahmen zurückgegriffen wird [3]. Eine strikte Nutzen-Risiko-Abwägung zugunsten des Patienten muss zwingend vorgenommen werden und eine 3D-Aufnahme hinreichend rechtfertigen. Selbstverständlich wird von einer routinemäßigen Nutzung der DVT in der Endodontie ausdrücklich abgeraten. Da die Nutzung eines DVT-Gerätes mit einer großen Verantwortung einhergeht, ist ein Zahnarzt in Deutschland bei Anwendungswunsch verpflichtet, eine erweiterte Fach- und Sachkunde zu erwerben [2].

Die DVT ist sehr vielfältig und in fast allen Bereichen der Zahnmedizin einsetzbar. Indikationen gelten unter anderem in der Parodontologie, Prothetik, Kieferorthopädie, Implantologie, Tumordiagnostik und Endodontie [70]. In letzterem nimmt sie immer mehr Bedeutung ein [71-74]. In vielen Fragestellungen wird sich ihrer bedient, unter anderem zur Planung komplexer Revisionsfälle, in Perforationsdiagnostiken, bei Resorptionsfällen und bei der Beurteilung apikaler Verhältnisse.

Die ersten DVT-Untersuchungen im endodontischen Bereich wurden 1989 von Trope et al. [75] und um 1990 von Tachibana et al. angefertigt [76]. 1997 wurde von Dowker et al. beschrieben, welchen Mehrwert das dreidimensionale Röntgen in Kombination mit der taktilen Informationsgewinnung während der Instrumentierung der Kanäle mit sich bringt [77].

Shemesh et al. widmeten sich der Untersuchung von DVT-Aufnahmen bezüglich der Detektion von Wurzelf perforationen im Vergleich zu IOA, die aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen wurden. Mittels der DVT konnten mit einer signifikant höheren Wahrscheinlichkeit Perforationen entdeckt werden [78]. Dabei muss beachtet werden, dass Artefakte durch metallische Stifte entstehen können, die zu Missinterpretationen führen [79].

Präoperative Faktoren, wie der Präsenz und das tatsächliche Ausmaß einer apikalen Läsion, spielen eine beachtenswerte Rolle in der Endodontie. Bezieht man sich bei der Interpretation des Therapieerfolges auf das röntgenologische Kriterium, so liegt die Wahrscheinlichkeit für eine Ausheilung der Pathologie bei Zähnen ohne röntgenologisch-sichtbare AP höher als bei solchen mit diagnostizierter AP [21, 80]. Die DVT ist in der Lage, früher als 2D-Röntgenaufnahmen eine apikale Parodontitis zu detektieren und erkenntlich zu machen [21].

Matherne et al. verglichen Röntgenaufnahmen, die mittels Speicherfolien, mittels Festkörpersensoren und mittels DVT angefertigt wurden. Die Erfolgsquote, mithilfe der zweidimensionalen Aufnahmen das gesamte Wurzelkanalsystem zu erschließen, lag bei 76–84%. Die DVT wurde dabei als Goldstandard angesehen. Die Autoren schlussfolgerten, dass die Erschließung des gesamten Kanalsystems im 3D-Röntgen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit stattfindet [81].

Robinson et al. werteten 1. UK-Prämolaren in 120 DVT-Aufnahmen aus, um ihre Wurzelkanalsysteme zu evaluieren. Die Ergebnisse verglichen sie mit den PSA derselben Zähne und kamen zu dem Schluss, dass die DVT mehr Informationen bezüglich der Anatomievariationen bereitstellt [82].

Periapikale Läsionen können im konventionellen Röntgen nur unter bestimmten Voraussetzungen erkannt werden, beispielsweise bei einer extensiven Perforation der Läsion in die Kortikalis [21, 83, 84].

Apikale Veränderungen an wurzelkanalbehandelten Zähnen wurden 2011 anhand von DVT-Aufnahmen durch Yoshioka et al. untersucht. Sie schlussfolgerten ebenfalls, dass die Detektion von periapikalen Erkrankungen in der dreidimensionalen Aufnahme genauer sei als in IOA und zusätzlich, dass etwa 10% der AP bei einer Interpretation des konventionellen Röntgens unentdeckt blieben [71, 85]. Dieses Erkenntnis konnte durch die Studien von Paula-Silva et al. 2009 [86] und Lofthag et al. 2007 [85] bestätigt werden. Woraus geschlossen werden kann, dass die DVT eine höhere Sensitivität für Knochenveränderungen hat und Pathologien frühzeitig(er) erkannt werden können. Die Qualität der röntgenologischen Auswertung ist dabei von hoher Bedeutung, da sie die Diagnose, die Behandlung und die Ausheilung der endodontischen Pathologie maßgeblich beeinflusst [87].

Neben dem diagnostischen Mehrwert in der Endodontie bringt die DVT auch einen großen therapeutischen mit sich. Eine interessante Schnittstelle von dreidimensionalen Röntgenaufnahmen und Wurzelkanalbehandlungen stellt die Therapieform der sogenannten »Guided Endodontics« dar, womit ein navigiertes Aufsuchen und Präparieren der primären Zugangskavität bis ins apikale Drittel obliterierter Wurzelkanäle beschrieben wird. Obliterationen werden neben des physiologischen, altersbedingten Vorgangs häufig auch durch ein erfahrenes Trauma, durch Karies, Kieferorthopädie und invasive Restaurationen hervorgerufen. Diese reizen die Pulpa chronisch und begünstigen den Vorgang der (Reiz-)Dentinbildung [88-90]. Das Prinzip der Guided Endodontics basiert auf einer präoperativen DVT-Aufnahme, mit deren Hilfe eine computergeplante Bohrschablone in einer Planungssoftware konstruiert und mittels 3D-Drucker hergestellt wird. In optimal ausgerechneter Achse kann intraoral die primäre Zugangskavität erschlossen werden [91]. Diese Therapieart ermöglicht Wurzelbehandlungen an sehr komplexen Fällen mittels einer dreidimensionalen Bildunterstützung.

Patel et al. beschrieben 2009 die Limitationen des konventionellen Röntgens bezüglich endodontischer Maßnahmen [54]: Ein grundlegendes Problem stellt der Verlust der dritten Ebene dar. Das zweidimensionale Röntgen komprimiert Informationen aus dreidimensionalen anatomischen Strukturen auf ein zweidimensionales Bild. Deren Auswertung kann vor allem in mesio-distaler Richtung erfolgen, nicht jedoch in bukkolingualer (mangelnde Tiefendarstellung). Daher geht eine 2D-Aufnahme immer mit einem räumlichen Informationsverlust einher und kann zu Missinterpretationen führen [54, 92, 93]. Ein Versuch, anhand zweidimensionaler Röntgenbilder Informationen zu gewinnen, kann mittels weiterer Aufnahmen und entsprechender Aufnahmewinkelveränderungen in Betracht gezogen werden [55, 94]. Dabei muss beachtet werden, dass multiple Aufnahmen keine Garantie dafür sind, alle relevanten anatomischen Strukturen oder Pathologien zu erkennen [81, 95].

Des Weiteren verursachen Überlagerungen anatomischer Strukturen je nach Aufnahmewinkel und Röntgengebiet (Zahn) Probleme bei der Interpretation und erschweren somit die Auswertung [96, 97]. Ingrid Brynolf, schwedische Zahnärztin, war eine der Ersten, die das Problem bezüglich der OK-Inzisiven und dem Canalis incisivus beschrieb [98]. Diese Problematik besteht bei einem dreidimensionalen Bild weniger aufgrund seiner Bildentstehungstechnik [2].

2.3.4 Strahlenschutz

Ein Vergleich der klassischen CT mit der DVT offenbart, dass ein Hauptvorteil der DVT die verminderte effektive Dosis ist. Sie ist unter anderem auf eine kürzere Expositionszeit/-dauer zurückzuführen [63]. Die DVT ermöglicht dem Behandler ein dynamisches Durchqueren der Strukturen und eine »Echtzeit«-Interpretation der Situation in der Multiplanaren Rekonstruktion (MPR).

Dentale digitale Volumetomographen weisen eine Ortsauflösung (Detailgenauigkeit) zwischen 1–2,5 Linienpaaren pro Millimeter (LP/mm) auf [99]. Die Genauigkeit ist dementsprechend geringer als bei IOA. Hier beträgt das Ortsauflösungsvermögen etwas mehr als 10 LP/mm. Je niedriger dieser Wert ist, desto größer wird die Unschärfe in der Aufnahme. Um Strukturen in der DVT noch darstellen zu können, müssen diese somit mindestens 0,25–0,5 Millimeter groß sein [2]. Zum Vergleich: Die Spitze eines ISO 15 Handinstrumentes (K-Feile), das in der Endodontie häufig eingesetzt wird, weist einen Durchmesser von 0,15 Millimeter auf.

Ein Faktor, der bei der dreidimensionalen Bildgebung nicht vernachlässigt werden darf, ist die relativ lange Aufnahmezeit, die über zehn Sekunden in Anspruch nimmt [99]. Währenddessen kommt es unweigerlich zu kleineren Bewegungen des Patienten, die zu einer verminderten Ortsauflösung führen [100]. Je größer diese Bewegungen ausfallen, desto wahrscheinlicher ist die Entstehung von Doppel- und Mehrfachkonturen sowie von Streifenartefakten [101].

Strukturen, die nicht auf die Anatomie des Patienten zurückzuführen, aber dennoch im Bild vorzufinden sind, bezeichnet man als *Artefakte*. Sie gehen auf fehlerbehaftete technische Messungen zurück und sind vom *Rauschen*, einem Zufallseffekt, abzugrenzen. In der Regel können sie bei identischen Aufnahmebedingungen wiederholt dargestellt werden. Hochdichte Strukturen im Aufnahmegebiet können beispielsweise zu sogenannten *Auslöschungs- oder Aufhärtungsartefakten* führen. Durch diese können anatomisch wichtige Strukturen oder Pathologien missinterpretiert werden [2, 70, 102]. Sie schränken damit die Qualität und Aussagekraft der Röntgenaufnahme ein.

Der Anwender des digitalen Volumetomographen kann mit der Veränderung der Akquisitionsparameter Einfluss auf die Bildqualität und die damit verbundene Strahlenbelastung des Patienten nehmen. Beeinflussbare Faktoren sind unter

anderem die Expositionszeit, die Stromstärke (Röhrenstrom) und die Röhrenspannung [99].

Weiteren Spielraum in der Dosisreduktion hat der Anwender zudem im Bereich des Abbildungsvolumens, das sogenannte *Field of View* (FOV), das abhängig vom Gerätetyp stark variiert. Gängige Formate sind 8x8 bis 10x12 Zentimeter [30]. Je größer das FOV ist, desto mehr Projektionen müssen gefertigt werden, was wiederum zu einer erhöhten Strahlendosis für den Patienten führt. Man unterscheidet im Abbildungsvolumen drei Größen: large, medium und small, wobei letztere ein ausreichend großes FOV für endodontische Fragestellungen darstellt. Gerätehersteller werben mit *Niedrigdosisprotokollen*, die zu einer Verringerung der Strahlenbelastung führen, doch mit einer erheblichen Verschlechterung der Bildqualität einhergehen, womit die Ortsauflösung verringert wird und das Bildrauschen zunimmt [30].

Die effektiven Dosiswerte für die derzeit auf dem Markt verfügbaren DVT-Geräte wurden 2015 von Ludlow et al. veröffentlicht. Dabei dotierten sie die mittlere effektive Dosis für ein großes FOV mit 212 μSv , für ein mittleres mit 177 μSv und für ein kleines mit 84 μSv [103]. Zum Vergleich: Eine Panoramaschichtaufnahme verursacht eine Dosis von etwa 9,9 μSv und eine Intraorale Tubusaufnahme hat einen Mittelwert von etwa 4,5 μSv . Die Dosiswerte variieren in erheblichem Maße, weshalb keine generalisierte Aussage getroffen werden konnte [2, 103]

Für das Jahr 2015 wurden in Deutschland etwa 58 Millionen Röntgenuntersuchungen im zahnmedizinischen Gesundheitssektor aufgenommen [104]. Ihre mittlere Anzahl lag im Zeitraum von 2007 bis 2015 bei nahezu konstanten 0,7 Anwendungen pro Einwohner und Jahr [104].

Die medizinisch bedingte Exposition durch Röntgenstrahlung nimmt seit den 1990er Jahren zu. Zweifellos ist dies auf die zunehmende Anwendung von dosisintensiven CT-Geräten zurückzuführen [2, 105, 106]. Der Anteil der zahnmedizinischen Indikationen für angefertigte Röntgenbilder liegt bei etwa 42% [107]. Dem gegenüberzustellen ist die Tatsache, dass ihr Anteil bezüglich der gesamten kollektiven effektiven Dosis bei etwa 0,4% liegt (Stand 2020). Es ist noch nicht geklärt, welchen Einfluss DVT-Aufnahmen auf diese Angaben haben, da sie in die Berechnungen des Bundesamtes für Strahlenbelastung nicht miteinbezogen wurden. Die Abbildung 13 zeigt zwei Kreisdiagramme, nach einer Abbildung des Bundesamt für

Strahlenschutz, die die Beiträge zur Gesamthäufigkeit und zur kollektiven effektiven Dosis für verschiedene medizinische Untersuchungen in der Röntgendiagnostik 2016 in Deutschland beschreibt [24].

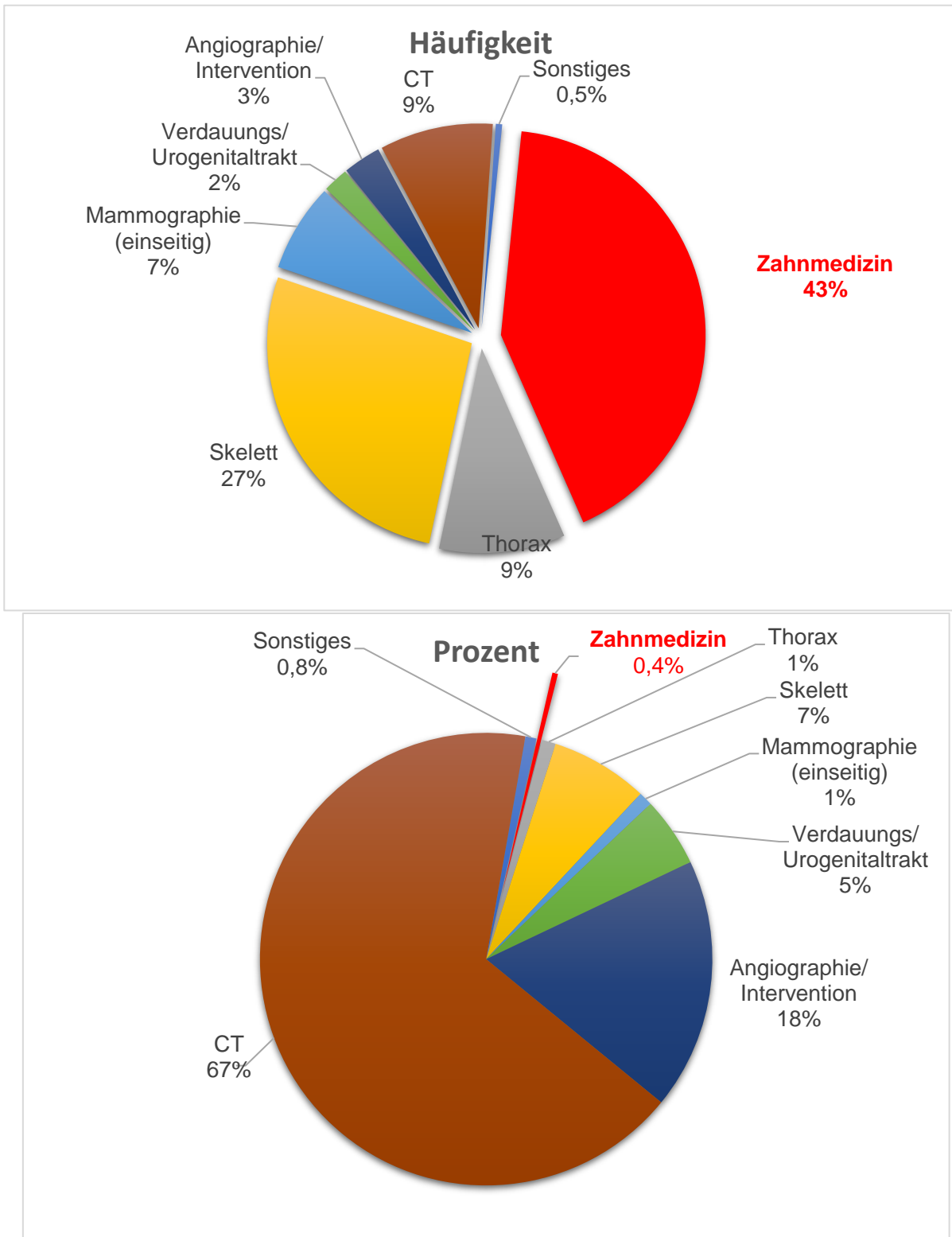


Abbildung 13: Beiträge zur Gesamthäufigkeit und zur kollektiven effektiven Dosis für verschiedene medizinische Untersuchungen in der Röntgendiagnostik 2016 in Deutschland , Bundesamt für Strahlenschutz

Insgesamt wird in Deutschland von einer mittleren effektiven Dosis von etwa 3,8 μSv pro Jahr pro Einwohner für das Jahr 2017 ausgegangen. Diese ist unter anderem abhängig von Wohnort (u.a. Atemluft), Ernährung und Lebensgewohnheiten. Die Bevölkerung wird immer stärker einer ionisierenden Strahlung ausgesetzt, dabei trägt der medizinische Sektor jedes Jahr pro Einwohner einen Anteil von etwa 1,6 μSv . Damit macht die ionisierende Strahlung den größten Beitrag zivilisatorischer Strahlenexposition aus.

Das durch die Zahnmedizin indizierte Röntgen steht aufgrund der stetigen Zunahme der Strahlenexposition seit langer Zeit in der Kritik.

Umso wichtiger ist es daher, den aufmerksamen Umgang mit Strahlenschutz zu betonen. Jede Aufnahme beruht seit dessen Einführung 2013 auf dem Prinzip der Rechtfertigung. Definiert wurde hier die »Rechtfertigende Indikation« gemäß des §83 des Strahlenschutzgesetzes, die vom Zahnarzt/Arzt mit nötiger Fachkunde zu stellen ist. Diese »erfordert die Feststellung, dass der gesundheitliche Nutzen der Anwendung am Menschen gegenüber dem Strahlenrisiko überwiegt.« Andere Verfahren mit vergleichbarem, gesundheitlichem Nutzen, die mit keiner oder einer geringeren Strahlenexposition verbunden sind, sind bei der Abwägung zu berücksichtigen [30].

Dabei ist im Umgang mit Röntgenstrahlung das *ALARA-Prinzip* als maßgebend zu betrachten. Das Akronym steht für »as low as reasonably achievable« und strebt eine auf das Nötigste beschränkte Dosis ionisierender Strahlung (bei einer geeigneten Untersuchungstechnik) an, die dennoch »vernünftigerweise« ausreichend genug für eine informationsreiche Darstellung ist. 2014 war es die *National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP)*, die vorschlug, den röntgenologischen Grundsatz *ALARA* in *ALADA* (»as low as diagnostically acceptable«) umzubenennen. Damit solle verhindert werden, dass aufgrund unzureichender Strahlung nicht aussagekräftige diagnostische Informationen entstünden, die zu inadäquaten therapeutischen Entscheidungen führen. *ALADA* unterstreicht dabei, dass eine Strahlenreduktion immer das Risiko ungenügender Informationsdarstellung birgt, die Akquisitionsparameter und die Indikation für eine dreidimensionale Aufnahme müssen auf die Fragestellung abgezielt sein.

3 Material und Methoden

3.1 Erhebung und Ausarbeitung der Datensätze

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden DVT-Datensätze, die im Zeitraum von 2010 bis 2018 in der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Universitätsmedizin Mainz aufgenommen wurden, untersucht. Daraus wurden 1.098 UK-Prämolaren von 579 Patienten in die Klassifizierung miteinbezogen. Die Gruppe teilt sich in $n = 264$ Männer (45,6%) und 315 Frauen (54,5%). Ausschlusskriterien waren unter anderem ein nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Resorptionen im apikalen Bereich, wurzelkanalbehandelte Zähne/Kanäle, Artefakte in der mandibulären Prämolar-Region und Zähne, die nicht anatomisch eindeutig als 1. oder 2. UK-Prämolaren zuzuordnen waren. Die medizinisch notwendigen Indikationen zur Bildanfertigung waren unter anderem aus chirurgischen Fragestellungen und Implantatplanungen, kieferorthopädischen Planungen und konservierenden Fragestellungen (Parodontitis, Wurzelkanalbehandlung etc.) hervorgegangen. Die Auswertung der Datensätze erfolgte zusammen mit einem spezialisierten Endodontologen.

Statistische Analysen, Datenerfassung und tabellarische Darstellungen wurden mithilfe der Programme SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago IL, 2008) und Microsoft Excel Version 2019 (Microsoft, Redmond, USA) vorgenommen. Mithilfe des Chi-Quadrat-Tests (Signifikanzniveau $p > 0,05$) wurde der Zusammenhang zwischen Geschlecht, Wurzelanzahl und Vertucci-Klassifikation der Zähne untersucht.

3.2 Materialien

Die Röntgenbilder der Patienten wurden mithilfe des Digitalen Volumentomographen 3D Accuitomo 170 der Firma Morita (J Morita Corp., Kyoto/Japan) aufgenommen. Die eingesetzte Röhrenspannung betrug einen Wert zwischen 68 und 90 KV. Für den Röhrenstrom wurde ein Wert zwischen 2 und 5,5 mA festgestellt.

Mittels der Software für Dokumentenmanagement Visident (BDV GmbH, Holzwickede/Deutschland) und der One Data Viewer Plus Software (J Morita Corp., Kyoto/Japan) zur Bildbearbeitung wurde die Auswertung vorgenommen. Die Befundung fand klassischerweise anhand sogenannter »Multiplanarer Rekonstruktionen« (MPR) statt. Hierbei wurde jeder einzelne Zahn in den drei dargestellten anatomischen Hauptebenen sagittal, coronal und axial geschnitten untersucht. Dies ermöglichte ein

dynamisches Durchscrollen, Rotieren und Vergrößern jedes einzelnen Zahnes in den drei Ebenen. Auch die Darstellung in unterschiedlichen Grauwerten und eine Veränderung der Kontraste der Rohdaten ermöglichten eine präzisere Differenzierung unterschiedlicher Zahngewebe wie Pulpa und Dentin. Exemplarisch veranschaulicht Abbildung 14, wie die Oberfläche der Befundungssoftware I-Dixel sich darstellt.

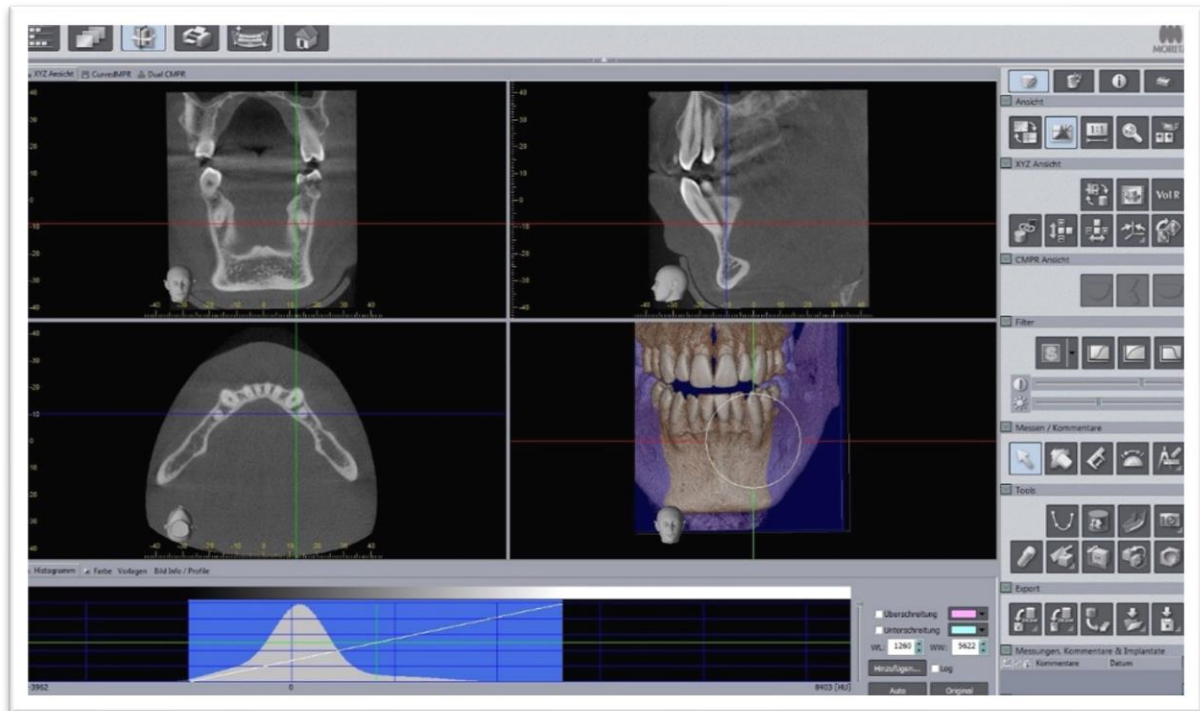


Abbildung 14: Darstellung einer exemplarischen Multiplanaren Rekonstruktion mit klassischer Ansicht der coronalen, axialen und sagittalen Schicht; Quelle: Screenshot aus einer Praxis in Wiesbaden, Software: I-Dixel

Aus der dreidimensionalen Anatomie wird eine zweidimensionale Rekonstruktion geschaffen. Abbildung 14 zeigt dies oben links in coronaler, oben rechts in sagittaler und unten links in axialer Ebene. Aus den aufgenommenen Daten wird zusätzlich ein dreidimensionales, farbiges Bild kreiert, das zur Befundung zwar eher ungeeignet, doch zur Patientenaufklärung und Veranschaulichung in bestimmten Situationen von Nutzen sein kann (vgl. Abbildung 14, unten rechts).

Abbildungen 15–18 zeigen ein exemplarisches Durchlaufen von verschiedenen Prämolaren in den drei unterschiedlichen Schichten (transversal, coronal und sagittal) des Dentalen digitalen Volumentomographen.

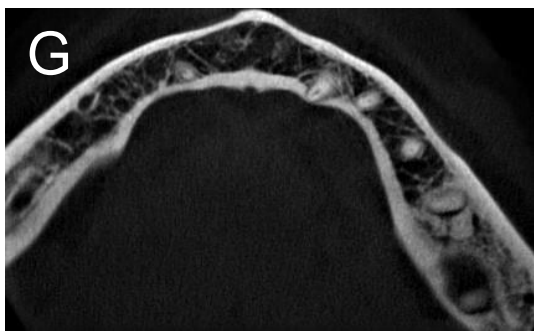
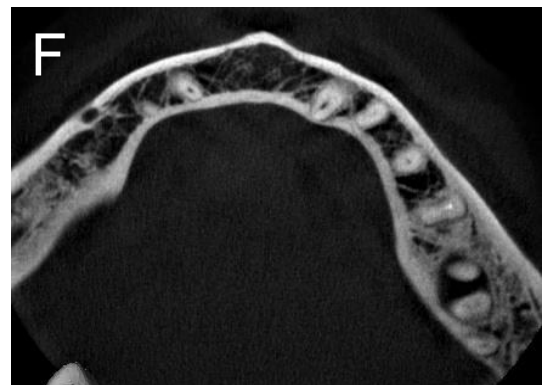
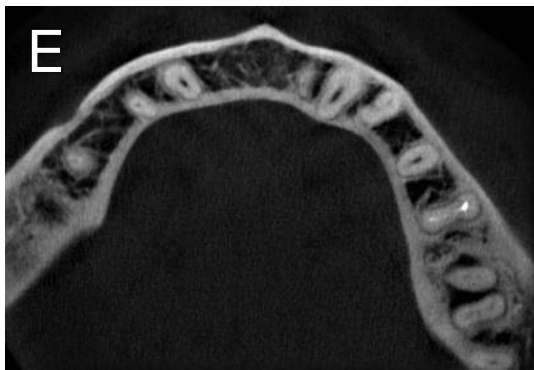
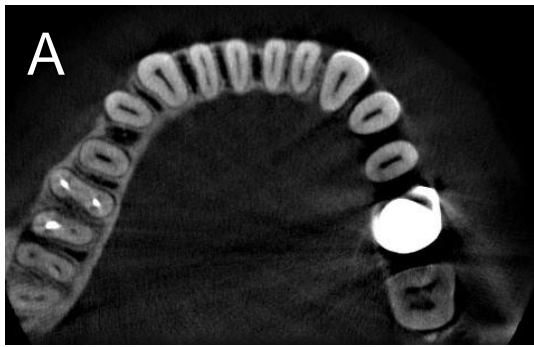


Abbildung 15A-G: Transversale DVT-Schichten von okklusal nach apikal, der UK- Prämolaren im 3. und 4. Quadranten.

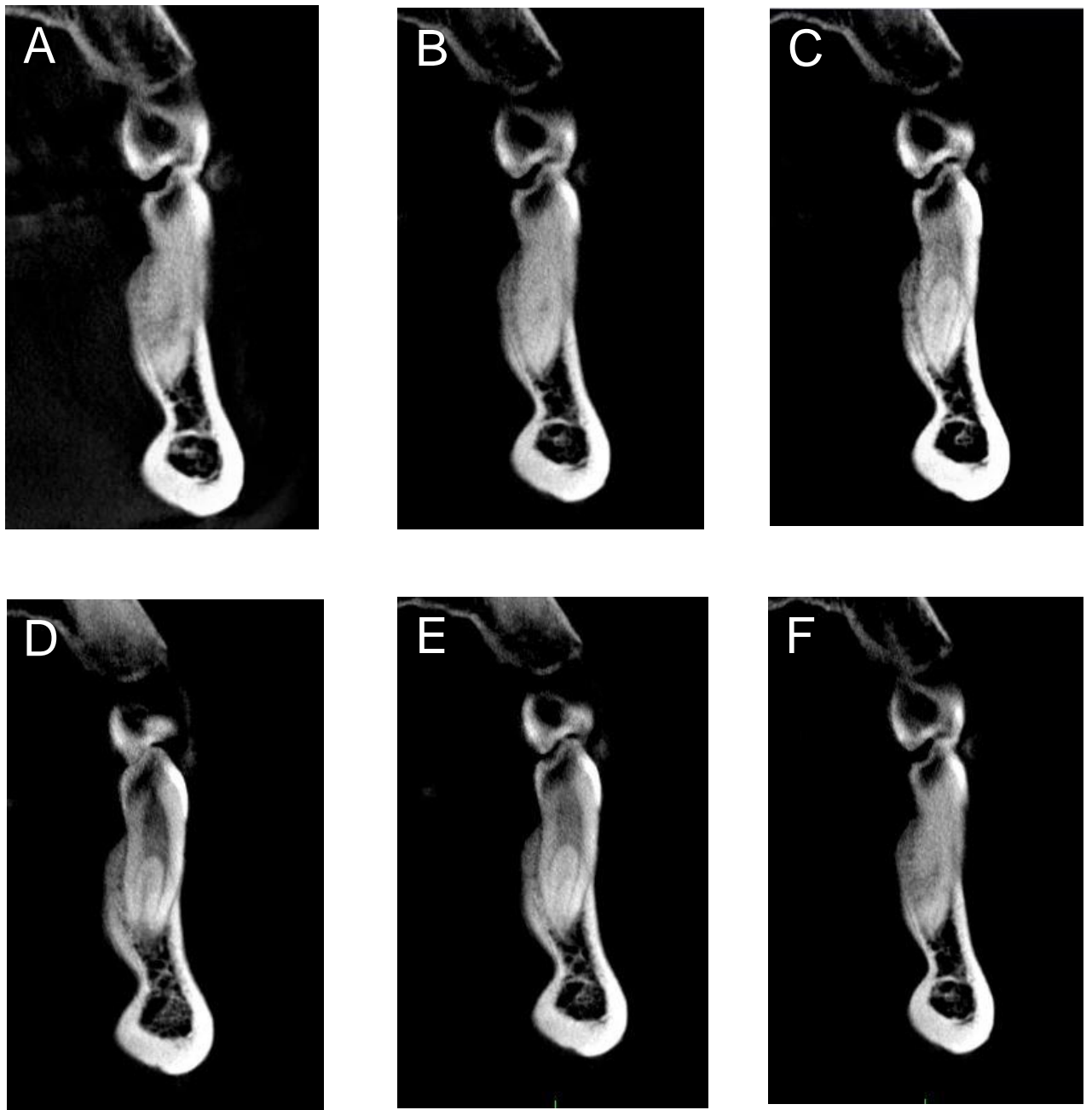


Abbildung 16 A-F: Coronale DVT-Schichten von mesial nach distal, eines Zahnes 34, mit Typ III (1-2-1) -Klassifikation

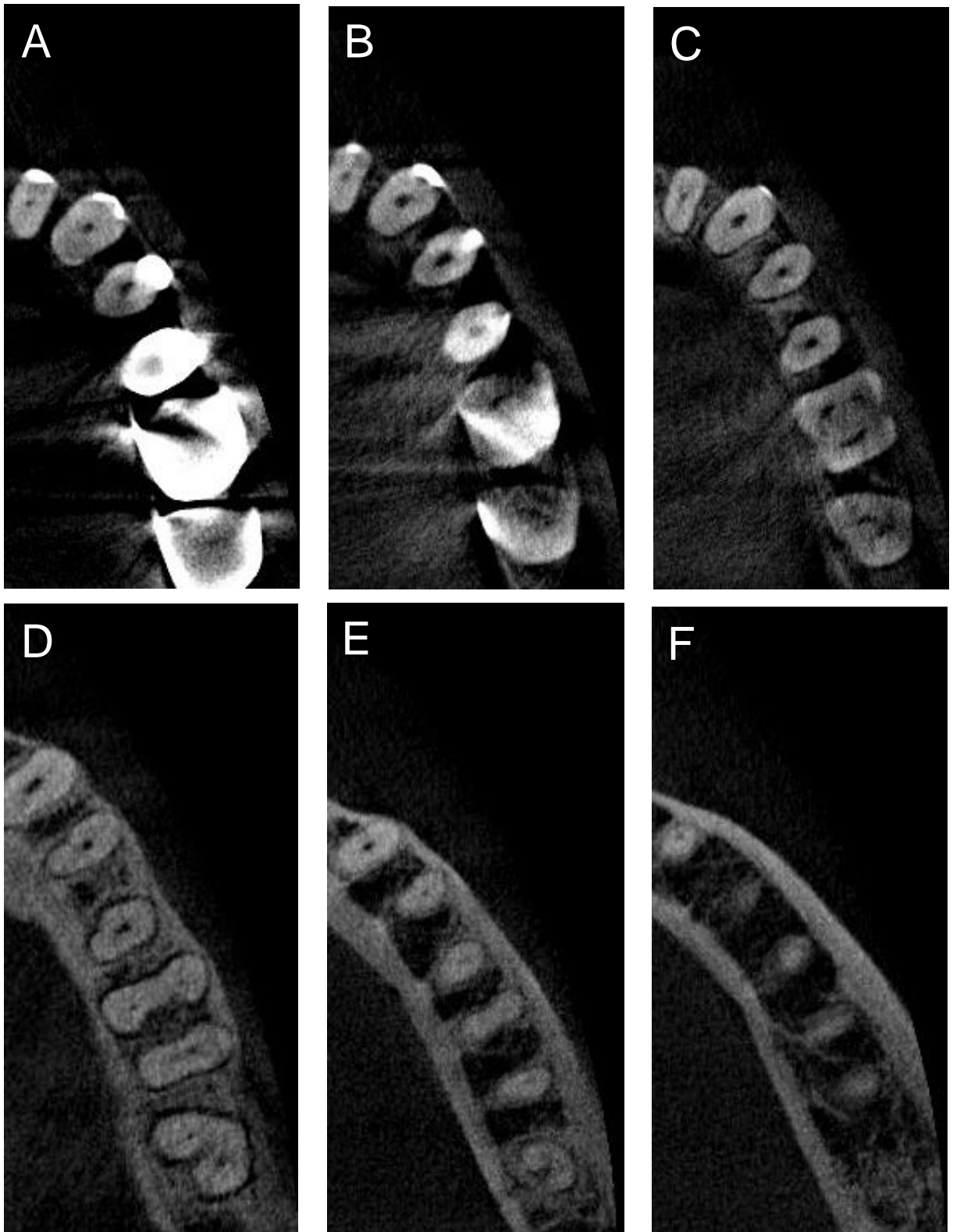


Abbildung 17 A-F: Transversale DVT-Schichten von mesial nach distal der Zähne 34 und 35, mit Typ I (1-1) -Klassifikation

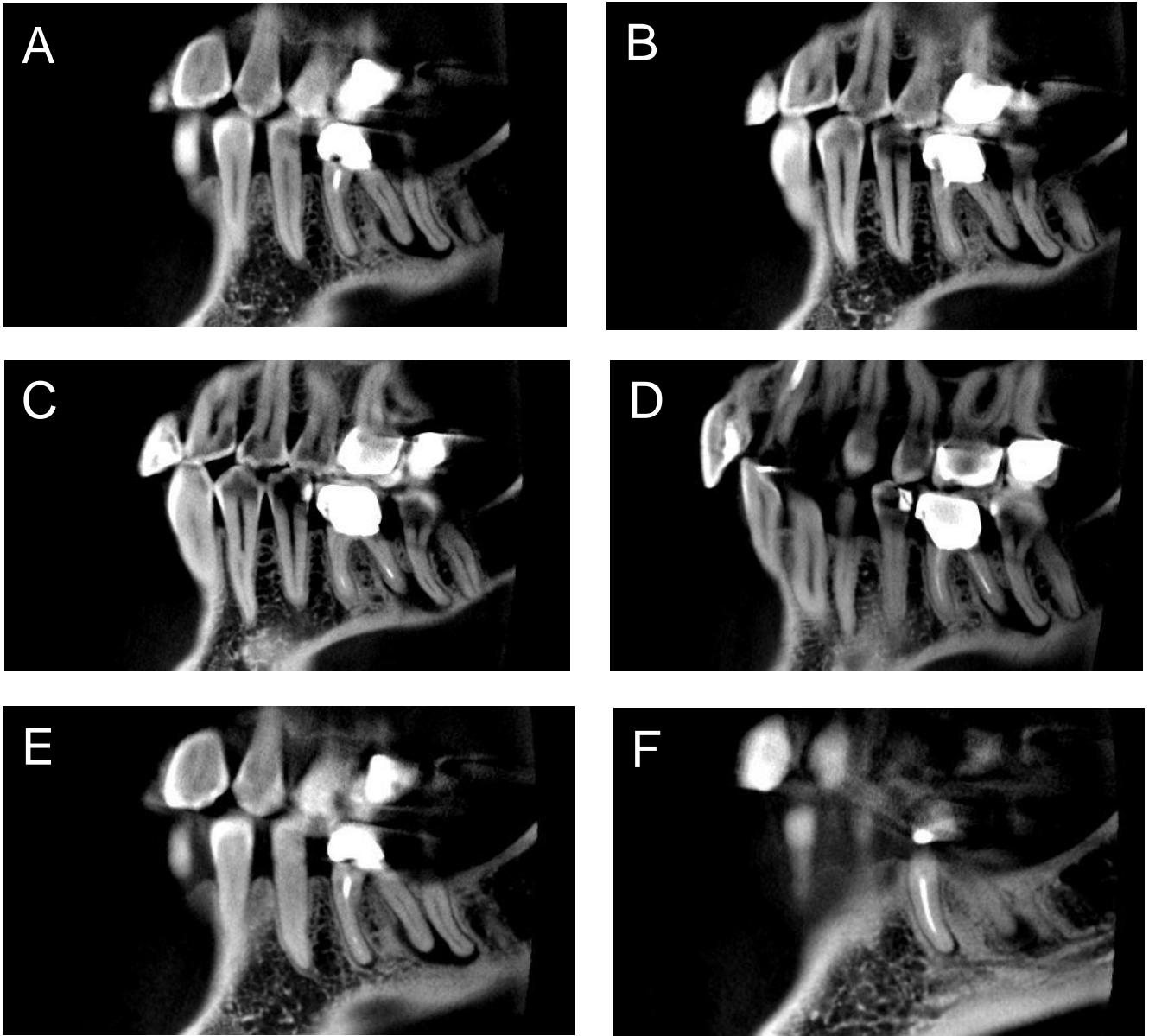


Abbildung 18 A-F: Sagittale DVT-Schichten von bukkal nach lingual des Zahnes 34 (Typ III-Klassifikation) und des Zahnes 35 (Typ I-Klassifikation)

4 Ergebnisse

In der Summe konnten 1.098 UK- Prämolaren in die Bewertung miteinbezogen werden. Darunter befanden sich 556 erste und 542 zweite UK-Prämolaren. Bei den insgesamt 579 Probanden handelte es sich um 264 Männer (45,6%) und 315 Frauen (54,4%).

Die Tabelle 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der 1.098 untersuchten Prämolaren. Sie teilen sich in 274 Zähne 34 (25,0%), 271 Zähne 35 (24,7%), 282 Zähne 44 (25,7%) und 271 Zähne 45 (24,7%). Unterteilt wurden diese in 556 1. UK-Prämolaren 34 und 44 (50,6%) und 542 Zähne 35 und 45 (49,4%).

Zahn	Anzahl	Prozent
1. UK- Prämolar links (Zahn 34)	274	25,0
2. UK- Prämolar links (Zahn 35)	271	24,7
1. UK- Prämolar rechts (Zahn 44)	282	25,7
2. UK- Prämolar rechts (Zahn 45)	271	24,7
Gesamtergebnis	1098	100,0

Tabelle 3: Häufigkeitsverteilung der UK- Prämolaren.

4.1 Wurzelanzahl und c-shaped Kanäle

Unter den 1. UK-Prämolaren zeigten sich zu 96,9% Zähne mit einer Wurzel und zu 3,1% mit zwei Wurzeln. Die 2. UK- Prämolaren waren zu 98,9% einwurzelig und wiesen in 1,1% der Fälle zwei Wurzeln auf (Tab 4). Drei Wurzeln wurden an keinem der untersuchten Zähne festgestellt.

Zahn	Wurzelanzahl	Anzahl	Prozent
1. UK-Prämolaren (Zähne 34 & 44)	1 Wurzel	539	96,9
	2 Wurzeln	17	3,1
Summe 1. UK- Prämolaren		556	
2. UK-Prämolaren (Zähne 35 & 45)	1 Wurzel	536	98,9
	2 Wurzeln	6	1,1
Summe 2. UK-Prämolaren		542	
Gesamtergebnis		1098	100,0

Tabelle 4: Wurzelanzahl der untersuchten 1. und 2. UK-Prämolaren

Bezüglich der Kanalquerschnitte wiesen etwa 0,5% der untersuchten Zähne einen c-shaped Kanal vor. Dabei konnte keine Signifikanz bezüglich des Vorkommens bei der Differenzierung von 1. und 2. Prämolaren festgestellt werden.

4.2 Kanalanzahl und Vertucci-Klassifizierung

Neben der Einteilung in ein- und mehrwurzelige Zähne fand zusätzlich eine Unterscheidung von ein- und mehrkanäligen Zähnen statt. Wobei dem Diagramm in Abbildung 15 zu entnehmen ist, dass 449 der 1. UK- Prämolaren (80,8%) einen Kanal aufwiesen und 107 jener zwei (19,2%). 518 der 2. UK- Prämolaren wurden als einkanalig eingestuft (95,6%) und 24 der 542 Zähne als zweikanalig (4,4%).

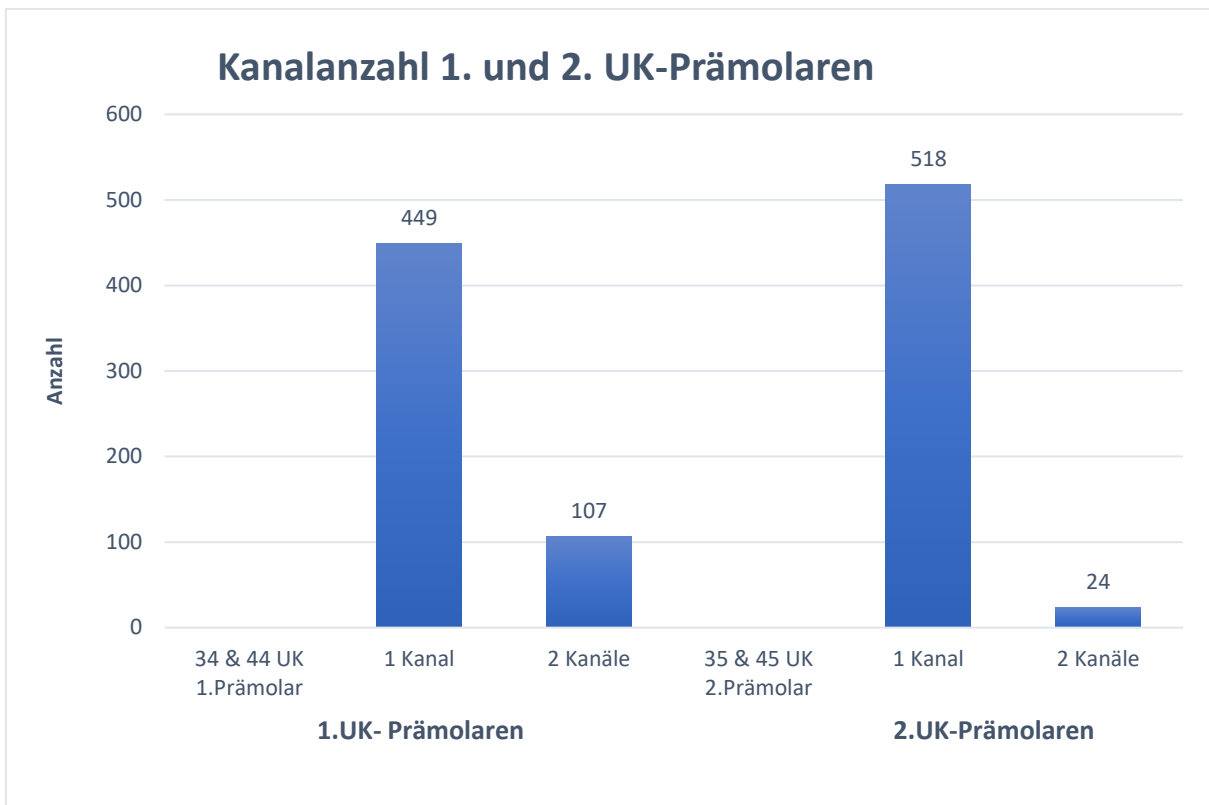


Abbildung 15: Säulendiagramm der unterteilten 1. und 2. UK-Prämolaren bezüglich ihrer Kanalanzahl

Je nach Verzweigung und Kanalkonfiguration fand eine Einteilung in die jeweilige Vertucci-Klassifikation statt. Die 1. UK-Prämolaren wurden in die Typen I bis V aufgeteilt. Die Typen VI, VII und VIII waren bei keinen der 1. Prämolaren vertreten. Typ I (1-1) war mit 80,8% signifikant am häufigsten vorzufinden, gefolgt von Typ V (1-2) mit 8,5%, Typ III (1-2-1) mit 5,4%, Typ IV (2-2) mit 4,5% und Typ II (2-1) mit 0,9% (Tab. 5a).

1. UK-Prämolaren (Zähne 34 & 44)		
Vertucci-Klassifikation	Anzahl	Prozent
Typ I	449	80,8
Typ II	5	0,9
Typ III	30	5,4
Typ IV	25	4,5
Typ V	47	8,5
Summe 1. UK-Prämolaren	556	

Tabelle 5a: Einteilung der untersuchten 1.UK-Prämolaren in die Vertucci-Klassifikation

Die 2. UK-Prämolaren 35 und 45 zeigten eine weniger hohe Variation in ihrer Vertucci-Verteilung. Hier war ebenfalls die Typ I-Klassifikation mit etwa 95,6% am häufigsten

vertreten, gefolgt von Typ V mit 2,6%, Typ IV mit 1,1% und Typ III mit 0,7%. Die Zähne 35 und 45 wiesen keine Klassifikation in den Typen II, VI, VII und VIII auf (Tab. 5b)

2. UK- Prämolaren (Zähne 35 & 45)		
Vertucci-Klassifikation	Anzahl	Prozent
Typ I	518	95,6
Typ II	0	0,0
Typ III	4	0,7
Typ IV	6	1,1
Typ V	14	2,6
Summe 2. UK- Prämolaren	542	

Tabelle 5b: Einteilung der untersuchten 2.UK-Prämolaren in die Vertucci-Klassifikation

Das vorliegende Diagramm (Abb.20) zeigt einen Vergleich der ersten und zweiten Prämolaren, in Bezug auf ihre Einteilung in die Vertucci-Klassifikation.

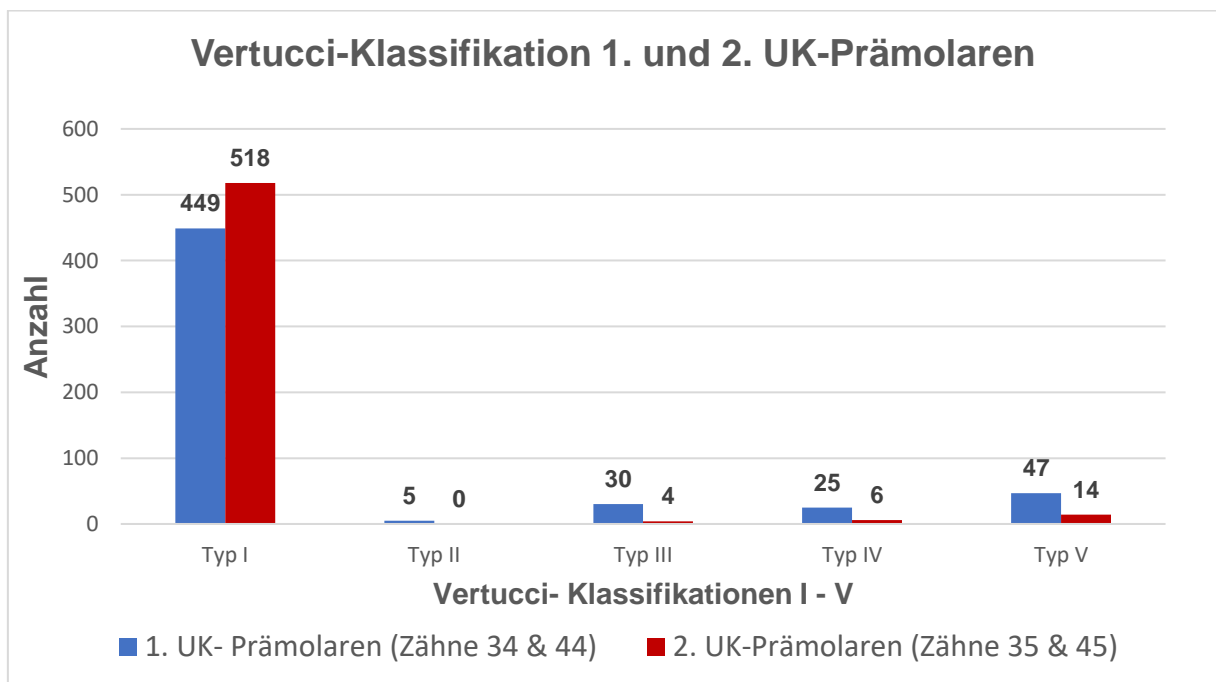


Abbildung 20: Vergleich der untersuchten 1. und 2. UK-Prämolaren in den Typen I-V der Vertucci-Klassifikation

Die 1. UK-Prämolaren wiesen mit 19,2% häufiger zwei Kanäle auf als die 2. UK-Prämolaren mit 4,4%. Bezüglich der Beziehung zwischen Kanalanzahl und Geschlecht konnte nach ermitteltem Chi-Quadrat-Test kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p < 0,05$). Ebenso wenig konnte ein solcher bei einem Vergleich der Daten bezüglich der Wurzelanzahl abgeleitet werden.

5 Diskussion

5.1 Allgemein

In zahlreichen Studien wurde der Hinweis geäußert, dass die Erschließung des gesamten Wurzelkanalsystems von elementarer Bedeutung für den erfolgreichen Ausgang einer Wurzelkanalbehandlung ist [28, 108, 109]. Die Kenntnis des behandelnden Zahnarztes bezüglich der Wurzelkanalanatomie ist ein zentraler Faktor für den Behandlungserfolg. Doch multiple Kanäle, Isthmen, Verzweigungen und kurvige oder abgknickte Wurzelkanalverläufe stellen für den Behandler Herausforderungen dar [21]. Die gezielte und richtige Einschätzung des Arztes hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Wurzelkanalbehandlung und den daraus resultierenden Therapieerfolg.

In der vorliegenden Arbeit wurde sich bezüglich der Klassifizierung der Wurzelkanalanatomie für die Einteilung nach Vertucci entschieden. Diese Wahl begründet sich unter anderem in der guten Nachvollziehbarkeit der Klassifikation. Die acht verschiedenen Typen (I–VIII) beschreiben eine Vielzahl vorkommender Kanalverzweigungen in den unterschiedlichen Zahnarten und ermöglichen somit eine differenzierte Betrachtung. Die lediglich vier Gruppierungen in der Weine-Klassifikation wurden dahingehend als nicht ausreichend eingestuft. Zudem ermöglicht diese Wahl einen Vergleich der gewonnenen und hier beschriebenen Ergebnisse mit Resultaten vieler anderer wichtiger Publikationen, die ebenfalls der Klassifikation nach Vertucci folgen. Die Vergleichbarkeit zu diesen ist ein wichtiger Bestandteil dieser Studie.

Versiani et al. beschrieben 2015 bis zu 37 verschiedene Kanalkonfigurationen, die in einem Wurzelkanalsystem auftreten können. Eine solch hohe Variationszahl

untermauert die Vielfältigkeit von Wurzelkanalsystemen und zeigt Limitierungen der Vertucci- und Weine-Klassifikation auf, die auf acht bzw. vier begrenzt sind [1, 110].

Um die Kommunikation zwischen Fachkräften zu präzisieren und detailliertere Aussagen bezüglich der Wurzelkanalsysteme treffen zu können wurde durch Ahmed et al. 2017 eine neue Klassifizierung definiert [1]. Ein adäquates System soll hierbei die Anatomie des Kanalsystems und die Morphologie korrekt wiedergeben, ohne dabei zu komplex zu erscheinen. Die Klassifizierung sollte ubiquitär anwendbar sein und eine realistische Einschätzung seitens des Behandlers bezüglich der Therapie ermöglichen [1, 111, 112].

Seit der Veröffentlichung 2017 wurden einige klinische Studien publiziert, die sich in der Klassifizierung der Zähne auf das System nach Ahmed et al. bezogen. Unter anderem sind es Saber et al., die das System als exakter als jenes nach Vertucci beschreiben [113]. Ob die neue Klassifizierung sich gegenüber Vertuccis durchzusetzen vermag ist bislang noch unklar, da eine Einteilung in jene zeitintensiver und komplizierter erscheint.

Eine große Rolle spielen c-shaped Kanäle, sie sind jedoch in keiner der oben genannten Klassifizierungen explizit definiert [47, 114]. Sie bilden eine eigene isolierte Kategorie, die vielmehr die Kanalquerschnittsform definiert und gesondert aufgeführt werden muss (Vgl. Kapitel 4.1).

5.2 Ergebnisvergleich mit Vertucci und weiteren Publikationen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit bisherigen Veröffentlichungen verglichen. Als Ausgangspublikation wird auf die Studie von 1978 mit dem Titel »Root canal morphology of mandibular premolars« von Vertucci Bezug genommen [18]. Ihre Klassifizierungstypen I–III sind jene, die den Zahn über einen isolierten Ausgang am Apex verlassen. Vertucci bezifferte 1978 etwa 74% der 1. UK-Prämolaren von insgesamt 400 untersuchten als solche. In der vorliegenden Arbeit machten sie einen Anteil von etwa 87,1% aus. Die Ergebnisse nach Vertucci stammen von einer amerikanischen Bevölkerungsgruppe [18]. Welchen Einfluss die Ethnie der Studienteilnehmer auf die Anatomie des Wurzelkanalsystems hat, wird in den folgenden Kapiteln noch detaillierter beschrieben.

Nach Vertucci verlassen etwa 25,5% der 1. UK- Prämolaren den Apex über zwei Ausgänge und etwa 0,5% über drei. In der vorliegenden Arbeit wiesen 12,9% der untersuchten Zähne zwei Ausgänge am Apex auf, allerdings konnte kein Zahn mit drei Kanälen ausfindig gemacht werden.

Die 2. UK-Prämolaren zeigten in der Studie nach Vertucci ein höheres Aufkommen von Typ I–III Klassifizierungen mit einem Kanalausgang am Apex. Diese betragen etwa 97,5% – im Vergleich zu 96,3%, die in dieser Studie beziffert wurden. Zwei Ausgänge ermittelte Vertucci an 2,5% der 2. UK-Prämolaren, in der vorliegenden Arbeit waren es 3,7%. Die Ergebnisse bezüglich der Kanalausgänge am Apex aus der vorliegenden Studie sind in der Tabelle 6 zusammengefasst dargestellt.

Zahn	Kanalausgänge am Apex	Anzahl	Prozent
1. UK-Prämolaren (Zähne 34 & 44)	1 Kanalausgang	484	87,1
	2 Kanalausgänge	72	12,9
Summe 1. UK- Prämolaren		556	
2. UK-Prämolaren (Zähne 35 & 45)	1 Kanalausgang	522	96,3
	2 Kanalausgänge	20	3,7
Summe 2. UK-Prämolaren		542	
Gesamtergebnis		1098	100

Tabelle 6: Kanalausgänge der UK- Prämolaren

Nach einer Einteilung der Prämolaren in die jeweilige Vertucci-Klassifikation konnte ein direkter Vergleich der Prävalenzen vorgenommen werden. Dargestellt sind diese in Tabelle 7. Bei Betrachtung der 1.UK-Prämolaren dominiert in der Vertucci-Studie die Typ I-Klassifikation mit 70,0%, wobei sie in der vorliegenden Studie bei 80,8% liegt. Die Typ V-Klassifikation zeigte in der Vertucci- Studie mit 24% einen deutlichen Unterschied zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie (8,5%). Die Ergebnisse der 2. UK-Prämolaren sind bis auf das Vorkommen der Typ IV-Klassifikation in der vorliegenden Studie vergleichbar.

Tabellarische Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dieser Studie und der Veröffentlichungen von Vertucci in Prozent.

	Vertucci-Klassifikation							
	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV	Typ V	Typ VI	Typ VII	Typ VIII
	(1-1)	(2-1)	(1-2-1)	(2-2)	(1-2)	(2-1-2)	(1-2-1-2)	(1-3)
1. UK-Prämolaren								
(Zähne 34 & 44)								
Ergebnisse	80,8	0,9	5,4	4,5	8,5	0,0	0,0	0,0
Vertucci	70,0	0,0	4,0	1,5	24,0	0,0	0,0	0,5
2. UK-Prämolaren								
(Zähne 35 & 45)								
Ergebnisse	95,6	0,0	0,7	1,1	2,6	0,0	0,0	0,0
Vertucci	97,5	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0

Tabelle 7: Vergleich der Studienergebnisse mit Vertuccis Ergebnissen (Angaben in Prozent)

Cleghorn et al. beschrieben 2007 unter 4.462 1. UK-Prämolaren einwurzelige Zähne mit einer Prävalenz von 97,9%, zwei Wurzeln fand man in 1,8% der Fälle, drei Wurzeln in etwa 0,2% und vier Wurzeln in etwas unter 0,1% der Zähne [27].

Dieselbe Arbeitsgruppe veröffentlichte ebenfalls ein Review bezüglich der Anatomie der 2. UK-Prämolaren. Hier fand man unter insgesamt 4.019 Zähnen etwa 99,6% einwurzelige, 0,3% zweiwurzelige und 0,1% dreiwurzelige Zähne [51]. In der vorliegenden Arbeit wurden zu 96,9% einwurzelige und zu 3,1% zweiwurzelige 1. UK-Prämolaren festgestellt, die entsprechenden Häufigkeiten bezüglich der 2. UK-Prämolaren betragen 98,9% und 1,1%. Dreiwurzelige Zähne wurden nicht identifiziert.

Bürklein et al. publizierten 2017 die Ergebnisse einer DVT-basierten Untersuchung bezüglich UK-Prämolaren und ihrer Kanalanzahl in einer deutschen Population. Sie hielten folgende Häufigkeitsverteilung fest: Unter 1044 untersuchten 1. UK-Prämolaren wiesen 77,9% einen einzelnen, 21,9% zwei und 0,2% drei Kanäle auf. Die 871 untersuchten 2. UK-Prämolaren zeigten eine weniger starke Variation und mit einer Prävalenz von 98,16% einen Kanal. 3,6% hatten zwei und 0,4% drei Kanäle [115].

5.3 Einfluss anderer Ethnien und Untersuchungsmethoden

Eine Ursache für die voneinander abweichenden Ergebnisse ist auf unterschiedliche Ethnien zurückzuführen, denen die Teilnehmer an den verschiedenen Studien angehörten. Ähnlich wie in anderen Teilbereichen der Medizin bereits Differenzen in anatomischen Strukturen abhängig von der Herkunft der Studiengruppe festgestellt worden sind, lässt sich diese Vermutung auch auf die Anatomie der Zähne übertragen [116, 117].

Eine Vielzahl publizierter Studien deutet auf die Annahme hin, dass ethnische Faktoren eine Rolle bezüglich anatomischer Variationen spielen [108]. Die Häufigkeitsverteilungen aus verschiedenen Studienergebnissen unterschiedlicher ethnischer Herkünfte weichen teilweise erheblich voneinander ab, sodass nachfolgend die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Resultate mit denen aus Studien verglichen werden, deren Teilnehmer nicht einer ausgewählten deutschen Gesellschaft angehören.

Zum einen veröffentlichten Caliskan et al. eine Studie aus einer türkischstämmigen Bevölkerungsgruppe und stellten fest, dass 64,15% der einhundert 1. UK-Prämolaren einen Kanal aufwiesen, etwa 30,19% zwei und 5,66% drei Kanäle zeigten [118]. Eine jordanische Bevölkerungsgruppe zeigte unter fünfhundert 1. UK-Prämolaren eine circa 58%ige Prävalenz von einkanaligen, gegenüber etwa 42% zwei- und mehrkanaligen UK-Prämolaren. Unter vierhundert 2. UK-Prämolaren befanden sich zu 72% einkanalige und zu 23,3% zwei- oder mehrkanalige PM [119]. Yoshioka et al. beschrieben 2011 in einer ost-asiatischen Population (Japan) eine Verteilung mit einem 80,6%igen Anteil von einwurzeligen und 19,4%igen zwei- oder mehr als zweiwurzeligen 1. UK-Prämolaren [120].

Auch c-shaped Kanäle wurden in unterschiedlichen Ethnien untersucht. In der Vergangenheit deuteten mehrere Studien daraufhin, dass diese besondere Form des Kanalquerschnittes vor allem im asiatischen Kontinent weit verbreitet auftritt [48]. Das 2014 von Fernandes et al. veröffentlichte Review bezüglich der c-shaped Kanal-Konfiguration in UK-Prämolaren zeigt bei verschiedenen Herkünften deutliche Schwankungen in der Prävalenz. Die höchsten Werte konnten in chinesischen (0,6%–41,27%) und in koreanischen Räumen (31,3%–45,5%) festgestellt werden [48].

Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Berücksichtigung der ethnischen Herkunft im Hinblick auf die Wurzelkanalanatomie in der Entscheidungsfindung und Therapie endodontischer Maßnahmen hilfreich sein kann.

Ein weiterer Aspekt beim Vergleich von Studien ist die Untersuchungsmethodik der jeweiligen Forschergruppe. Es werden verschiedenste Verfahren in der Diagnostik und Ermittlung der Anatomie der Wurzelkanalsysteme der Zähne genutzt, um möglichst genaue und detailreiche Aussagen treffen zu können.

1992 publizierten Baisden et al. ihre Untersuchungen anhand einhundertsechs 1. UK-Prämolaren, die nach Weine et al. klassifiziert wurden. Sie beschrieben eine Verteilung von 76% einkanaliger und 24% zweikanaliger Zähne, darunter befanden sich 14% c-shaped Kanäle. Die Untersuchungsmethode wird als *ex vivo*-Verfahren beschrieben. In Abständen von drei, sechs, neun und zwölf Millimetern wurden mit einer dünnen Trennscheibe Schnitte präpariert, eingefärbt und die Anatomie anhand der Querschnitte inspiziert [121].

Weitere Ergebnisse wurden 2006 von Lu et al. veröffentlicht. Sie untersuchten 82 extrahierte UK-Prämolare in einer chinesischen Gesellschaft. Auch hier wurden im rechten Winkel zum Apex in der Höhe von drei, sechs, neun und zwölf Millimetern mittels eines Trimmers Schnitte angefertigt. Diese wurden mit Methylenblau angefärbt und nach Weine et al. analysiert. 54% der untersuchten 1. UK-Prämolaren zeigten einen einzelnen Kanal, 46% ein komplizierteres Kanalsystem. Hiervon waren 22% zweikanalig und 18% wiesen c-shaped Kanalquerschnitte auf [122].

Wie bei Baisden et al. wird auch bei Lu et al. die Methodik als *ex vivo*-Verfahren beschrieben, mit destruktiven Schritten. Das Kanalsystem kann in beiden Fällen aufgrund des Trimmer- und Trennscheibeneinsatzes mechanisch beschädigt und die Ergebnisse somit unbeabsichtigt manipuliert werden.

Auch die Transparenzmethode nach Vertucci an extrahierten Zähnen stellt ein *ex vivo*-Verfahren dar. Ihre Klassifizierung fand nach Inspektion der Zähne unter einem Dentalmikroskop statt. Die jeweiligen Ergebnisse dienen in erster Linie der allgemeinen Forschung und Hilfestellung in der Vorhersagbarkeit einer unspezifischen Prämolar-Wurzelkanalbehandlung und bringen in der Praxis demnach tendenziell keinen Mehrwert bei speziellen Therapieentscheidungen gezielter Wurzelkanalbehandlungen [20].

In der vorliegenden Arbeit wurden die Ergebnisse röntgenologisch mittels digitalem Volumentomographen evaluiert. Dabei handelt es sich um ein *non-invasives/non-destruktives* Verfahren, das keinerlei Einfluss oder mechanische Veränderungen auf das Kanalsystem mit sich bringt. Des Weiteren handelt es sich um ein *in vivo*-Verfahren, das zweifellos einen Vorteil hinsichtlich der weiteren Therapieplanungen birgt. Die untersuchten Zähne wurden weder extrahiert noch mechanisch manipuliert, sodass das Untersuchungsverfahren keinen Einfluss auf die Anatomie hatte und somit therapieunterstützend genutzt werden kann.

Kritisch zu bewerten ist jedoch die Tatsache, dass in dieser Arbeit auf DVT-Aufnahmen zurückgegriffen wurde, die nicht ausschließlich zu endodontischen Zwecken angefertigt wurden. Wie hoch der prozentuale Anteil dieser betrug, ist nicht reproduzierbar. Das Auswahlkriterium war eine gute Nachvollziehbarkeit und Klassifizierbarkeit des vorliegenden Kanalsystemes. Die Auflösung einer DVT-Aufnahme steht in direkter Abhängigkeit zu der medizinischen Indikation. Folglich erfordern endodontische Fragestellungen in der Regel eine höhere Auflösung als beispielsweise chirurgische oder kieferorthopädische Planungen. Gerade bei letzteren bleiben gewisse Feinstrukturen unter Umständen unsichtbar.

6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Einteilung der Wurzelkanalsysteme mandibulärer Prämolaren mittels DVT-Aufnahmen eine geeignete Methode darstellt, ihre Wurzelkanalanatomie präzise zu studieren und nachzuvollziehen.

Vertuccis Untersuchungen bezüglich des Variationsvorkommens konnten durch die vorliegenden Ergebnisse bestärkt werden. Sowohl bei 1. als auch 2. UK-Prämolaren dominierte die Typ I-Klassifikation. In circa 19,2% der 1. UK-Prämolaren konnten mehrkanalige Wurzelkanalsysteme festgestellt werden, die 2. UK-Prämolaren wiesen dabei eine niedrigere Prävalenz auf (4,4%) [18, 20].

Differenzen bei den Ergebnissen der angeführten Studien lassen sich höchstwahrscheinlich auf ethnische Hintergründe zurückführen. Auch die Untersuchungskriterien und -methodiken bewirken individuelle Studienresultate [20, 48, 108, 116-122].

Als Schlussfolgerung kann abgeleitet werden, dass bei jeder endodontischen Maßnahme an mandibulären Prämolaren ein mehrkanaliges Wurzelkanalsystem in

Betracht gezogen werden sollte. Aus heutiger Studienlage ergibt sich, dass unabhängig von der Zahnart ein komplexes Wurzelkanalsystem als Regel und nicht als Ausnahme betrachtet werden sollte [21].

Das Klassifizierungssystem nach Vertucci ist weit verbreitet, es beschreibt eine simple Kategorisierung der Anatomie von Wurzelkanälen und kann nahezu ubiquitär Verwendung finden.

Die neue Klassifizierung nach Ahmed et al. ermöglicht eine noch detailliertere Beschreibung der Anatomien. Aufgrund der größeren Komplexität ist es fraglich, ob sie das System nach Vertucci auf lange Sicht ablösen und so Einzug in den klinischen Alltag erhalten wird [1].

Momentan wird die Anzahl der digitalen Volumentomographen in deutschen Praxen und Kliniken auf über 3.500 geschätzt [30]. Ihre Anwendung nimmt stetig zu, was auf ein breites Indikationsspektrum zurückzuführen ist [30]. In vielen Teilbereichen der modernen Zahnmedizin ist die DVT mittlerweile fester Bestandteil der Therapieplanung.

Aus der bisherigen Studienlage lässt sich ableiten, dass die Nutzung eines digitalen Volumentomographen im Sinne komplexer endodontischer Fragestellungen zunehmend an Bedeutung gewinnt, da die DVT die Basis für eine solide Therapie ebnet und die Erfolgswahrscheinlichkeit steigert. Neben komplexer Kanalanatomien können durch die DVT frühzeitig periapikale Pathologien und Strukturen räumlich detailliert dargestellt werden. Neben der AP sind es unter anderem Wurzelperforationen, interne/externe Resorptionen und unbehandelte Pulpaanteile nach erfolgter Wurzelkanalbehandlung, die der Zahnarzt in seine Therapieentscheidung miteinbezieht [12, 79, 123, 124]. Der Behandler kann sich dieses Phänomen zunutze machen und seinen Behandlungsablauf entsprechend planen.

Unumstritten ist dabei eine gründliche kritische Abwägung von zusätzlicher Strahlenexposition und einem möglichen Informationsgewinn in jedem einzelnen Patientenfall. Im Sinne des Strahlenschutzes sind alle möglichen Maßnahmen vom Betreiber des Gerätes zu ergreifen, um eine unnötige zusätzliche Strahlenexposition für den Patienten zu vermeiden.

Der Anwender muss sich umfassend mit der Technik und Funktionsweise der DVT auseinandersetzen, um differenzieren zu können, in welchen Teilbereichen sie ihre Vor- und Nachteile hat. Dabei müssen die richtigen Akquisitionsparameter, die

Ortsauflösung, mögliche Artefakte und die effektive Dosis in die Überlegungen miteinbezogen werden. Allein auf diese Art kann eine unnötige Strahlenbelastung am Patienten vermieden werden, denn jedes nicht angefertigte Röntgenbild entspricht einer 100%igen Dosisreduktion für den Patienten [2, 30].

Wird ein Vergleich zu zweidimensionalen Röntgenaufnahmen gezogen, so stellt man fest, dass es sich bei der DVT mit einer mittleren effektiven Dosis von 106 μSv um eine dosisintensive Aufnahme handelt. Die Panoramaschichtaufnahme weist dabei einen Wert von 10 μSv und die IOA von 4,5 μSv auf. Neben der vergleichsweise hohen Strahlenbelastung zählen unter anderem erhöhte Kosten, reduzierte Ortsauflösung und Abbildungsfehler (bspw. Artefakte) zu den Nachteilen der 3D-Aufnahme. Daher ist zu erwarten, dass in Zukunft beide Techniken synergistisch in der modernen Zahnmedizin ihre Anwendungsgebiete ausfüllen [2].

Die vorliegende Studie soll in der Praxis Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung geben und die Therapie somit erleichtern.

Literaturverzeichnis

1. Ahmed, H.M.A., et al., *A new system for classifying root and root canal morphology*. Int Endod J, 2017. 50(8): p. 761-770.
2. Schulze, R., *Lehrbuch zahnärztliches Röntgen : Grundlagen, Technik, Anwendung : Hintergrundinformationen*. 2019: Mainz.
3. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP publication 103. Ann ICRP, 2007. 37(2-4): p. 1-332.
4. Looe, H.K., et al., *Conversion coefficients for the estimation of effective doses in intraoral and panoramic dental radiology from dose-area product values*. Radiat Prot Dosimetry, 2008. 131(3): p. 365-73.
5. Okano, T., et al., *Absorbed and effective doses from cone beam volumetric imaging for implant planning*. Dentomaxillofac Radiol, 2009. 38(2): p. 79-85.
6. Okano, T., et al., *Estimation of Effective Dose to Salivary Glands at Examination of the Oral and Maxillofacial Region*. Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai zasshi, 2009. 65: p. 594-602.
7. Ludlow, J.B., L.E. Davies-Ludlow, and S.C. White, *Patient risk related to common dental radiographic examinations: the impact of 2007 International Commission on Radiological Protection recommendations regarding dose calculation*. J Am Dent Assoc, 2008. 139(9): p. 1237-43.
8. Ludlow, J.B. and M. Ivanovic, *Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2008. 106(1): p. 106-14.
9. Ludlow, J.B., E. Platin, and A. Mol, *Characteristics of Kodak Insight, an F-speed intraoral film*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2001. 91(1): p. 120-9.
10. Lofthag-Hansen, S., et al., *Calculating effective dose on a cone beam computed tomography device: 3D Accuitomo and 3D Accuitomo FPD*. Dentomaxillofac Radiol, 2008. 37(2): p. 72-9.
11. Hirsch, E., et al., *Dosimetry of the cone beam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3D Accuitomo in different fields of view*. Dentomaxillofac Radiol, 2008. 37(5): p. 268-73.
12. Silva, M.A., et al., *Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: a radiation dose evaluation*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. 133(5): p. 640.e1-5.
13. Loubele, M., et al., *Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCCT scanners for dentomaxillofacial applications*. Eur J Radiol, 2009. 71(3): p. 461-8.
14. Suomalainen, A., et al., *Dosimetry and image quality of four dental cone beam computed tomography scanners compared with multislice computed tomography scanners*. Dentomaxillofac Radiol, 2009. 38(6): p. 367-78.
15. Roberts, J.A., et al., *Effective dose from cone beam CT examinations in dentistry*. Br J Radiol, 2009. 82(973): p. 35-40.
16. Qu, X.M., et al., *Effective radiation dose of ProMax 3D cone-beam computerized tomography scanner with different dental protocols*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2010. 110(6): p. 770-6.
17. Pauwels, R., et al., *Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners*. European Journal of Radiology, 2012. 81(2): p. 267-271.
18. Vertucci, F.J., *Root canal morphology of mandibular premolars*. J Am Dent Assoc, 1978. 97(1): p. 47-50.
19. Patientenberatung, A.Z.V.-u.; Available from: http://www.agz-rnk.de/agz/content/3/3_1/3_1_1/index.php.
20. Vertucci, F.J., *Root canal anatomy of the human permanent teeth*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1984. 58(5): p. 589-99.
21. Kenneth M Hargreaves, L.H.B., *Cohen's pathway of the pulp*. Vol. 11. 2016, St. Louis: Elsevier. 907.

22. Eskoz, N. and F.S. Weine, *Canal configuration of the mesiobuccal root of the maxillary second molar*. J Endod, 1995. 21(1): p. 38-42.
23. Arnold, M. and F. Paqué, *Die Anatomie von Unterkiefer-Prämolaren*. ZM, 2018.
24. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) Bundesministerium für Umwelt, N.u.R.B. *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung*. 2020 [cited 2020 22.11.2020]; Available from: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/diagnostik/roentgen/haeufigkeit-exposition.html>.
25. Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung, *Jahrbuch 2019 Statistische Basisdaten zur vertragszahnärztlichen Versorgung, in Köln: KZBV 2019: Köln*. p. 1-184.
26. Hülsmann, M., *Endodontie, in Dent-Praxis*. 1993: Stuttgart u.a.
27. Cleghorn, B.M., W.H. Christie, and C.C. Dong, *The root and root canal morphology of the human mandibular first premolar: a literature review*. J Endod, 2007. 33(5): p. 509-16.
28. Cantatore, G., E. Berutti, and A. Castellucci, *Missed anatomy: frequency and clinical impact*. 2006. 15(1): p. 3-31.
29. Plotino, G., et al., *Three-dimensional imaging using microcomputed tomography for studying tooth macromorphology*. J Am Dent Assoc, 2006. 137(11): p. 1555-61.
30. Interessengemeinschaft Zahnärztlicher Verbände in Deutschland IGZ e.V., D.R.E.B., *Das zahnärztliche Röntgen*. IGZ Die Alternative, 2015. 3: p. 1-40.
31. Pasler, F.A., *Zahnärztliche Radiologie*. Vol. 5. 2007: Georg Thieme Verlag. 336.
32. Hellwig, E., J. Klimek, and T. Attin, *Einführung in die Zahnerhaltung : Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie*. 2013: Köln.
33. Hülsmann, M., *Endodontie : 20 Tabellen, in Checklisten der Zahnmedizin*. 2008: Stuttgart u.a.
34. *Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology*. Int Endod J, 2006. 39(12): p. 921-30.
35. Klein, R.M.F., et al., *Evaluation of X-ray beam angulation for successful twin canal identification in mandibular incisors*. 1997. 30(1): p. 58-63.
36. European Commission, *Radiation Protection no 136: European guidelines on radiation protection in dental radiology. The safe use of radiographs in dental practice RADIATION PROTECTION*. 2004.
37. American Association of Endodontists, *Endodontic Competency: Executive Summary 2019*: p. 1-6.
38. Corcoran, J., M.J. Apicella, and P. Mines, *The effect of operator experience in locating additional canals in maxillary molars*. J Endod, 2007. 33(1): p. 15-7.
39. Buhley, L.J., et al., *Effect of magnification on locating the MB2 canal in maxillary molars*. J Endod, 2002. 28(4): p. 324-7.
40. Arnold, M., *Vergrößerungshilfen in der Endodontie*. zm online, 2020. 15_16/2020.
41. Peikoff, M.D. and J.R. Trott, *An endodontic failure caused by an unusual anatomical anomaly*. J Endod, 1977. 3(9): p. 356-9.
42. Hoen, M.M. and F.E. Pink, *Contemporary endodontic retreatments: an analysis based on clinical treatment findings*. J Endod, 2002. 28(12): p. 834-6.
43. Krasner, P. and H.J. Rankow, *Anatomy of the pulp-chamber floor*. J Endod, 2004. 30(1): p. 5-16.
44. Carabelli, G., et al., *Systematisches Handbuch der Zahnheilkunde*. 1844: Georg Olms Verlag.
45. Preiswerk, G., *Lehrbuch und Atlas der konservierenden Zahnheilkunde, in Lehmann's medicin. Handatlanten*. 1912: München.
46. Hess, W., E. Zürcher, and W.H. Dolamore, *The Anatomy of the Root-canals of the Teeth of the Permanent Dentition*. 1925: J. Bale, sons & Danielsson, Limited.
47. Weine, F.S., et al., *Canal configuration in the mesiobuccal root of the maxillary first molar and its endodontic significance*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1969. 28(3): p. 419-25.
48. Fernandes, M., I. de Ataíde, and R. Wagle, *C-shaped root canal configuration: A review of literature*. J Conserv Dent, 2014. 17(4): p. 312-9.
49. Weine, F.S., et al., *Canal configuration of the mesiobuccal root of the maxillary first molar of a Japanese sub-population*. Int Endod J, 1999. 32(2): p. 79-87.

50. Weine, F.S., *Endodontic Therapy*. 2004: Mosby.
51. Cleghorn, B.M., W.H. Christie, and C.C. Dong, *The root and root canal morphology of the human mandibular second premolar: a literature review*. J Endod, 2007. 33(9): p. 1031-7.
52. Vertucci, F.J., J.E. Haddix, and L.R.J.P.o.t.P. Britto, *Tooth morphology and access cavity preparation*. 2006. 9: p. 148-232.
53. Walker, R. and J.J.E. Brown, *Radiography*. 2005. 3: p. 77-92.
54. Patel, S., et al., *New dimensions in endodontic imaging: part 1. Conventional and alternative radiographic systems*. Int Endod J, 2009. 42(6): p. 447-62.
55. Glickman, G. and M.J.P.o.t.P. Pettiette, 9th edn. St. Louis, MI: Mosby Elsevier, *Chapter 5. Preparation for treatment*. 2006: p. 97-135.
56. Endodontist", A.A.o., *Guide to Clinical Endodontics*. American Association of Endodontists, 2016. Sixth Edition: p. 40.
57. Patel, S., et al., *European Society of Endodontology position statement: Use of cone beam computed tomography in Endodontics*. 2019. 52(12): p. 1675-1678.
58. Röntgen, W.C., *Eine neue Art von Strahlen: I-II Mitteilung*. 1895: Verlag und Druck der Stahel'schen KB Hof. und Universitätsbuch-und Kunsthandlung.
59. Walkhoff, F.O., *Unsichtbare, photographisch wirksame Strahlen*. Photographische Rundschau, 1900. 28: p. 189-91.
60. Bundesregierung BRD, *Richtlinie Fachkunde und Kenntnisse im strahlenschutz bei dem Betrieb von röntgeneinrichtungen in der Medizin und Zahnmedizin*. Gemeinsames Ministerialblatt, 2006.
61. Harris, D., et al., *E.A.O. Guidelines for the use of Diagnostic Imaging in Implant Dentistry*. 2002. 13(5): p. 566-570.
62. Hounsfield, G.N., *Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system*. Br J Radiol, 1973. 46(552): p. 1016-22.
63. Mozzo, P., et al., *A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results*. Eur Radiol, 1998. 8(9): p. 1558-64.
64. Reich, S., *3D-Planung in der Implantologie*. Der Freie Zahnarzt, 2019. 63(2): p. 78-89.
65. Patel, S., et al., *European Society of Endodontology position statement: Use of cone beam computed tomography in Endodontics: European Society of Endodontology (ESE) developed by*. Int Endod J, 2019. 52(12): p. 1675-1678.
66. Rodig, T. and M. Hulsman, *Diagnosis and root canal treatment of a mandibular second premolar with three root canals*. Int Endod J, 2003. 36(12): p. 912-9.
67. Walton, R.E., *Endodontic radiographic technics*. Dent Radiogr Photogr, 1973. 46(3): p. 51-9.
68. Holger Rapsch, F.P., *Diagnostik und Instrumentierung lingualer Kanalabzweigungen in ersten Unterkieferprämolaren*. Endodontie, 2017. 26: p. 155-164.
69. England, M.C., Jr., G.R. Hartwell, and J.R. Lance, *Detection and treatment of multiple canals in mandibular premolars*. J Endod, 1991. 17(4): p. 174-8.
70. Ralf, S., *S2k-Leitlinie Dentale digitale Volumetomographie*. AWMF, 08.2013.
71. Yoshioka, T., et al., *Periapical bone defects of root filled teeth with persistent lesions evaluated by cone-beam computed tomography*. Int Endod J, 2011. 44(3): p. 245-52.
72. Simon, J.H., et al., *Differential diagnosis of large periapical lesions using cone-beam computed tomography measurements and biopsy*. J Endod, 2006. 32(9): p. 833-7.
73. Tsurumachi, T. and K. Honda, *A new cone beam computerized tomography system for use in endodontic surgery*. Int Endod J, 2007. 40(3): p. 224-32.
74. Cotton, T.P., et al., *Endodontic applications of cone-beam volumetric tomography*. J Endod, 2007. 33(9): p. 1121-32.
75. Trope, M., et al., *Differentiation of radicular cyst and granulomas using computerized tomography*. 1989. 5(2): p. 69-72.
76. Tachibana, H. and K. Matsumoto, *Applicability of X-ray computerized tomography in endodontics*. Endod Dent Traumatol, 1990. 6(1): p. 16-20.
77. Dowker, S.E., G.R. Davis, and J.C. Elliott, *X-ray microtomography: nondestructive three-dimensional imaging for in vitro endodontic studies*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 1997. 83(4): p. 510-6.

78. Shemesh, H., et al., *The use of cone-beam computed tomography and digital periapical radiographs to diagnose root perforations*. J Endod, 2011. 37(4): p. 513-6.
79. Schulze, R., et al., *Artefacts in CBCT: a review*. Dentomaxillofac Radiol, 2011. 40(5): p. 265-73.
80. Friedman, S.J.E.t., *Prognosis of initial endodontic therapy*. 2002. 2(1): p. 59-88.
81. Matherne, R.P., et al., *Use of cone-beam computed tomography to identify root canal systems in vitro*. J Endod, 2008. 34(1): p. 87-9.
82. Robinson, S., et al., *Dental CT evaluation of mandibular first premolar root configurations and canal variations*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2002. 93(3): p. 328-32.
83. Bender, I.B. and S. Seltzer, *Roentgenographic and direct observation of experimental lesions in bone: II. 1961*. J Endod, 2003. 29(11): p. 707-12; discussion 701.
84. Cohen, S. and K.M. Hargreaves, *Pathways of the Pulp*. 2006: Elsevier Mosby.
85. Lofthag-Hansen, S., et al., *Limited cone-beam CT and intraoral radiography for the diagnosis of periapical pathology*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2007. 103(1): p. 114-9.
86. de Paula-Silva, F.W., et al., *Accuracy of periapical radiography and cone-beam computed tomography scans in diagnosing apical periodontitis using histopathological findings as a gold standard*. J Endod, 2009. 35(7): p. 1009-12.
87. Nakata, K., et al., *Effectiveness of dental computed tomography in diagnostic imaging of periradicular lesion of each root of a multirrooted tooth: a case report*. J Endod, 2006. 32(6): p. 583-7.
88. Andreasen, F.M., et al., *Occurrence of pulp canal obliteration after luxation injuries in the permanent dentition*. Endod Dent Traumatol, 1987. 3(3): p. 103-15.
89. Oginni, A.O., C.A. Adekoya-Sofowora, and K.A. Kolawole, *Evaluation of radiographs, clinical signs and symptoms associated with pulp canal obliteration: an aid to treatment decision*. Dent Traumatol, 2009. 25(6): p. 620-5.
90. Sayegh, F.S. and A.J. Reed, *Calcification in the dental pulp*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1968. 25(6): p. 873-82.
91. Zehnder, M.S., et al., *Guided endodontics: accuracy of a novel method for guided access cavity preparation and root canal location*. International endodontic journal, 2016. 49(10): p. 966-972.
92. Velvart, P., H. Hecker, and G. Tillinger, *Detection of the apical lesion and the mandibular canal in conventional radiography and computed tomography*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2001. 92(6): p. 682-8.
93. Low, K.M., et al., *Comparison of periapical radiography and limited cone-beam tomography in posterior maxillary teeth referred for apical surgery*. J Endod, 2008. 34(5): p. 557-62.
94. Patel, S., et al., *The potential applications of cone beam computed tomography in the management of endodontic problems*. Int Endod J, 2007. 40(10): p. 818-30.
95. Barton, D.J., et al., *Tuned-aperture computed tomography versus parallax analog and digital radiographic images in detecting second mesiobuccal canals in maxillary first molars*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2003. 96(2): p. 223-8.
96. Revesz, G., H.L. Kundel, and M.A.J.I.R. Graber, *The influence of structured noise on the detection of radiologic abnormalities*. 1974. 9(6): p. 479-486.
97. Gröndahl, H.G. and S.J.E.t. Huuonen, *Radiographic manifestations of periapical inflammatory lesions: how new radiological techniques may improve endodontic diagnosis and treatment planning*. 2004. 8(1): p. 55-67.
98. Brynolf, I., *A histological and roentgenological study of the periapical region of human upper incisors*. Vol. 11. 1967: Almqvist & Wiksell.
99. Brullmann, D. and R.K. Schulze, *Spatial resolution in CBCT machines for dental/maxillofacial applications-what do we know today?* Dentomaxillofac Radiol, 2015. 44(1): p. 20140204.
100. de Kinkelder, R., et al., *Heartbeat-Induced Axial Motion Artifacts in Optical Coherence Tomography Measurements of the Retina*. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2011. 52(6): p. 3908-3913.

101. Spin-Neto, R., et al., *Cone beam CT image artefacts related to head motion simulated by a robot skull: visual characteristics and impact on image quality*. *Dento maxillo facial radiology*, 2013. 42(2): p. 32310645-32310645.
102. Schulze, R.K., D. Berndt, and B. d'Hoedt, *On cone-beam computed tomography artifacts induced by titanium implants*. *Clin Oral Implants Res*, 2010. 21(1): p. 100-7.
103. Ludlow, J.B., et al., *Effective dose of dental CBCT-a meta analysis of published data and additional data for nine CBCT units*. *Dentomaxillofac Radiol*, 2015. 44(1): p. 20140197.
104. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) Bundesministerium für Umwelt, N.u.R.B., *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2017*. 2020.
105. Bundesamt für Strahlenschutz, B., Referat Presse-und Öffentlichkeitsarbeit, Postfach, *Strahlenthemen: Röntgendiagnostik–schädlich oder nützlich*. 2005. 100149: p. 38201.
106. Schauer, D.A. and O.W. Linton, *National Council on Radiation Protection and Measurements Report Shows Substantial Medical Exposure Increase*. 2009. 253(2): p. 293-296.
107. Hachenberger, C., et al., *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung–Jahresbericht 2015*. 2017, Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
108. Walker, R.T., *Root canal anatomy of mandibular first premolars in a southern Chinese population*. 1988. 4(5): p. 226-228.
109. Hülsmann, M., *Mandibular first premolar with three root canals*. 1990. 6(4): p. 189-191.
110. Versiani M.A., O.-Z.R., *Root Canal Anatomy: Implications in Biofilm Disinfection*. . The Root Canal Biofilm. Vol. 9. 2015, Berlin, Heidelberg: Springer Series on Biofilms.
111. Briseno-Marroquin, B., et al., *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): p. 2008-13.
112. Kottoor, J., D.V. Albuquerque, and N. Velmurugan, *A new anatomically based nomenclature for the roots and root canals-part 1: maxillary molars*. *Int J Dent*, 2012. 2012: p. 120565.
113. Saber, S., et al., *Root and canal morphology of maxillary premolar teeth in an Egyptian subpopulation using two classification systems: a cone beam computed tomography study*. *Int Endod J*, 2019. 52(3): p. 267-278.
114. Vertucci, F., A. Seelig, and R. Gillis, *Root canal morphology of the human maxillary second premolar*. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 1974. 38(3): p. 456-64.
115. Burklein, S., R. Heck, and E. Schafer, *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): p. 1448-1452.
116. Shao, H., et al., *Tibial shaft anatomy differs between Caucasians and East Asian individuals*. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2018. 26(9): p. 2758-2765.
117. Verkicharla, P.K., et al., *Differences in retinal shape between East Asian and Caucasian eyes*. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2017. 37(3): p. 275-283.
118. Caliskan, M.K., et al., *Root canal morphology of human permanent teeth in a Turkish population*. *J Endod*, 1995. 21(4): p. 200-4.
119. Awawdeh, L.A. and A.A. Al-Qudah, *Root form and canal morphology of mandibular premolars in a Jordanian population*. *Int Endod J*, 2008. 41(3): p. 240-8.
120. Yoshioka, T., et al., *Radiographic evaluation of root canal multiplicity in mandibular first premolars*. *J Endod*, 2004. 30(2): p. 73-4.
121. Baisden, M.K., J.C. Kulild, and R.N. Weller, *Root canal configuration of the mandibular first premolar*. *J Endod*, 1992. 18(10): p. 505-8.
122. Lu, T.Y., S.F. Yang, and S.F. Pai, *Complicated root canal morphology of mandibular first premolar in a Chinese population using the cross section method*. *J Endod*, 2006. 32(10): p. 932-6.
123. Tyndall, D.A. and H. Kohltfarber, *Application of cone beam volumetric tomography in endodontics*. *Australian dental journal*, 2012. 57 Suppl 1: p. 72-81.
124. Schryvers, A., et al., *Endodontic management of a maxillary first molar with two palatal roots: A case report*. *Australian endodontic journal : the journal of the Australian Society of Endodontology Inc*, 2018.

