

Lößnitzgymnasium

Steinbachstraße 21

01445 Radebeul

Anatomische Forschung
zur Darstellung der Vielfalt der
Wurzelkanalsysteme

Paula Arnold

Begleitlehrer: Frau Kahrs

Abgabetermin: 21.12.2012

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Methode.....	3
3. Ergebnisse.....	7
3.1 Destruktive Methoden.....	8
3.1.1 Per oculo.....	8
3.1.2 Lichtmikroskopie.....	9
3.1.3 Korrosionsmethode.....	10
3.1.4 Aufhellungsmethode.....	10
3.1.5 Ausgussmethode.....	11
3.1.6 Rasterelektronenmikroskopie (REM).....	11
3.1.7 Mikroradiographie (TMR).....	12
3.2 Non-destruktive Methoden.....	13
3.2.1 Zweidimensionales Röntgen.....	13
3.2.2 Computertomographie (CT).....	14
3.2.3 Röntgenmikrotomographie (XMT).....	15
3.2.4 Magnetresonanztomographie (MRT).....	15
3.2.5 Dentale digitale Volumentomographie (DVT).....	16
3.3 Praktischer Teil: Darstellung und Gegenüberstellung verschiedener Methoden zur Darstellung des Wurzelkanalsystems am extrahierten Zahn.....	17
3.3.1 Non-destruktive Methoden.....	17
3.3.2 Destruktive Methoden.....	20
4. Diskussion.....	22
5. Schlussfolgerung.....	26
6. Abbildungen.....	27
7. Literaturquellenverzeichnis.....	44
8. Internetquellenverzeichnis.....	48
9. Danksagung.....	49
10. Eigenständigkeitserklärung.....	50

1. Einleitung

Während der Erarbeitung der Studienarbeit mit dem Thema: „Von den ersten Versuchen einer antimikrobiellen Therapie bis zur modernen Endodontologie“ wurde deutlich, welche Bedeutung der Gefäßnervenstrang, die sogenannte Pulpa, unter anderem für die Entwicklung des Zahnes und die Abwehr mikrobieller Angriffe auf den Zahn besitzt. Je nach Entwicklungsstand des Zahnes hinterlässt die Pulpa ein Hohlraumsystem, das auch Wurzelkanalsystem genannt wird. Mit dem Zutritt von Mikroorganismen aus der Mundhöhle in den Zahn und der Besiedelung des Wurzelkanalsystems können sich verschiedene pathologische Prozesse entwickeln, so dass nicht nur der Erhalt des betroffenen Zahnes, sondern auch die Gesundheit des Patienten gefährdet ist.

Der Erkenntnisgewinn in der Zahnmedizin in der Anatomie des Zahnes war abhängig von der Nutzung neuer technischer Entwicklungen und hatte damit Einfluss auf die Entwicklung von diagnostischen und therapeutischen Verfahren und die schrittweise Abkehr vom Aberglauben. Die Darstellung und Untersuchung des Wurzelkanalsystems nahmen in der Vergangenheit und Gegenwart eine wichtige Bedeutung in der Ursachenforschung zu Erfolg und Misserfolg einer zahnerhaltenden Therapie ein. Besonders hilfreich für die Erschließung des Themas waren die Abhandlung „Endodontie: Rückblick und Ausblick“ sowie die Habilitationsschrift „Die räumliche Darstellung des Endodonts“ von Michael A. Baumann (siehe Anhang).

Ziel dieser Arbeit ist es, Untersuchungsmethoden zur Darstellung des Wurzelkanalsystems vorzustellen und Besonderheiten der einzelnen Verfahren an einem Experiment herauszuarbeiten.

2. Methode

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wurden im Rahmen einer begrenzten Literaturrecherche die einzelnen in der Vergangenheit und Gegenwart genutzten Verfahren und Methoden zur Darstellung der Vielfalt von Wurzelkanalsystemen ermittelt. In die Literaturrecherche wurden einzelne Lehrbücher der Zahnheilkunde verschiedener Jahrgänge sowie deutsch- und englischsprachige Einzelpublikationen nach Auswahl des Fachbetreuers aufgenommen.

Die Literaturrecherche im Internet unter www.pubmed.com wurde nur zu speziellen Fragestellungen genutzt, da eine Abfrage zu den Stichworten: „root“ und „canal“ und „anatomy“ eine unzureichende Eingrenzung bei 8355 Publikationen ermöglichte. Eine Eingrenzung auf wesentliche Artikel ermöglichte die Hilfestellung der Redaktion des Journal of Endodontics aus dem Jahr 2008.

Im zweiten Teil der Arbeit sollen ausgewählte Methoden an einem extrahierten Zahn zur Veranschaulichung demonstriert werden. Dr. Frank Paqué aus der Universität Zürich Klinik für Präventivzahnmedizin, Parodontologie und Kariologie stellte für diese Arbeit einen extrahierten oberen Molaren zur Verfügung. Als Grund für die Extraktion kann die tiefe und ausgedehnte Karies angenommen werden, die eine Erhaltung des Zahnes nicht mehr ermöglichte (Abb. 1a-c). Das Alter und Geschlecht des Patienten sind unbekannt. Nach Extraktion erfolgte die feuchte Lagerung und Desinfektion in einer 0,1%igen Thymol-Lösung.

Vor Untersuchungsbeginn erfolgte die Vermessung der Wurzel- und Zahnlänge. Dabei wurde die längste Distanz von der Wurzelspitze bis zur Höckerspitze gemessen, um diese mit den abgebildeten radiographischen Dimensionen vergleichen zu können.

Als Untersuchungsmethoden kamen zur Anwendung:

1. Non-destruktive Verfahren

- a) MikroCT-Aufnahme
- b) Dentale digitale Volumetomographie (DVT)
- c) Zweidimensionales Röntgen mit Kontrastmittel

2. Destruktive Methoden

- a) Schliffpräparat Lichtmikroskop natives Präparat
- b) Bruchpräparat Rasterelektronenmikroskop

In der Universität Zürich wurde durch Dr. Frank Paqué von dem Zahn bei 70 kV und 114 mA eine MikroCt-Aufnahme (mCT 40, SCANCO MEDICAL, Brüttsellen, Schweiz) mit einer isotropischen Auflösung von 16 µm angefertigt (Abb. 2). Aus den Rohdaten wurde der Zahn dreidimensional rekonstruiert mit VGStudio Max 2.2 (Volumegraphics, Heidelberg). Die typischen Bestandteile des Zahnes wurden farblich markiert, so dass die topographische

Beziehung des Wurzelkanalsystems zur Zahnwurzel und Zahnkrone ermittelt werden konnten.

Die weitere radiologische Untersuchung erfolgte gemeinsam mit Dipl.-Stom. Arnold mit der DVT (Veraviewpocs 3D, Morita) in einer auf Endodontie spezialisierten Zahnarztpraxis in Dresden (Abb. 3). Der Zahn wurde dazu mit Wachs auf einer Auflage fixiert, so dass eine verwacklungsfreie Aufnahme möglich wurde. Die Aufnahme wurde bei 60kV und 3 mA angefertigt. Mithilfe der zugehörigen Software iDixel (Version 2.1.1.1, Morita, Japan) wurde der Zahn aus den Röntgenrohdaten dreidimensional rekonstruiert und in drei Ebenen schichtweise auf einem Befundmonitor angezeigt. Es erfolgte eine Vermessung der Länge und Breite des Zahnes in der größten Ausdehnung.

Zur Vermessung wurde der Zahn auf dem Befundmonitor so ausgerichtet, dass das Ende der Wurzelspitzen auf einer Ebene dargestellt werden konnte. In der axialen Ebene wurden 5 Schnittbilder von der Wurzelspitze bis zur Zahnkrone mit jeweils 2 mm Abstand für eine vergleichende Darstellung als zweidimensionales Bild exportiert.

Die zweidimensionalen digitalen Ausgangsröntgenaufnahmen (Kodak 6000, Carestream) vom ursprünglichen Zustand des Zahnes wurden in orthoradialer Projektion in Rechtwinkeltechnik angefertigt (Abb. 4), um diese mit einer Röntgenkontrastaufnahme in gleicher Projektion vergleichen zu können. Bevor die Wurzelkanäle kontrastverstärkend mit Edelstahlfeilen in den Größen ISO 008 und 010 markiert werden konnten, war es erforderlich, den Zahn zu trepanieren. Im Anschluss erfolgte nach Präparation der endodontischen Zugangskavität die Darstellung der Wurzelkanäleingänge am Boden der Pulpakammer unter Sicht mit einem Dentalmikroskop (ProErgo, Zeiss, Oberkochen)(Abb. 5). Mit Langschaftrosenbohrern (Drux, Gummersbach) wurden während der trockenen rotierenden Präparation Dentinüberhänge vom Sekundärdentin für einen geradlinigen Zugang zum koronalen Wurzelkanaldrittel in den absteigenden Größen ISO 012, 008 und 006 entfernt (Abb. 6). Nach einer ultraschallaktivierten Reinigung mit Natriumhypochlorid (NaOCl) in 5%iger Konzentration wurden die dargestellten Wurzelkanäle mit einer K-Feile ISO 008 mittels passiven nach apikal gerichteten Arbeitsdruck sondiert und auf vollständige Wurzelkanallänge erschlossen bis die Feile am Ende des Wurzelkanals sichtbar war. Mit den eingelegten kontrastgebenden Wurzelkanalinstrumenten wurde eine erneute Röntgenaufnahme in Rechtwinkeltechnik angefertigt (Abb. 7).

Für die weitergehende Untersuchung mit destruktiven Techniken wurde die endodontische Zugangskavität mit Komposit Tetric evoflow (vivadent) in Säure-Ätz-Technik verschlossen. Die Wurzelkanäle wurden vor dem Verschluss mit destilliertem Wasser aufgefüllt, um einem Austrocknen des Dentins während der Kunststoffeinbettung vorzubeugen.

Die apikalen Foramen an allen drei Wurzeln wurden mit Wachs versiegelt. Im Anschluss erfolgte die Einbettung in einen langsam chemisch polymerisierenden Kunststoff Spezifix 20 (...). Die Kunststoffeinbettung ermöglichte nach einer dreitägigen Aushärtung die Herstellung von Schliffpräparaten (Abb. 8). Entlang der Zahnachse wurden von apikal in Richtung koronal 5 Schliffpräparate hergestellt. Der Kunststoffblock wurde dazu in dem Accutom-50 (Struers) befestigt und unter Wasserkühlung rotierend mit einer 0,4 mm starken diamantierten Scheibe in 5 Segmente mit jeweils 2 mm Dicke getrennt (Abb. 9 und 10). Die Scheiben mit den Wurzelanteilen wurden bis zur weiteren mikroskopischen Untersuchung feucht gelagert. Die mikroskopische Untersuchung der Schliffpräparate erfolgte mit dem Lichtmikroskop Leica MZ12 (Leica) bei 8-100facher Vergrößerung im Auflichtverfahren und wurde fotografisch dokumentiert (Abb. 11). Zum Vergleich erfolgte eine Gegenüberstellung der lichtmikroskopischen Beurteilung unter Verwendung eines Dentalmikroskops mit Xenonbeleuchtung (ProErgo, Zeiss, Oberkochen), bei 25facher Vergrößerung im Auflichtverfahren und unter Verwendung einer UV-Durchleuchtung.

Zur Anwendung des Rasterelektronenmikroskops wurden exemplarisch aus der dritten Schnittebene die palatinale und die mesiobukkale Wurzelscheibe aus dem Kunststoff herausgelöst. Damit die Wurzelkanaloberfläche auf mögliche Seitenkanäle oder Isthmen untersucht werden kann, wurden die Proben auf Höhe des Wurzelkanals halbiert. Dazu wurden jeweils Sollbruchstellen auf Höhe des zu beurteilenden Wurzelkanals durch das seitliche Einschleifen einer Kerbe mit einem Diamant präpariert und im Anschluss mit einem Spatel gebrochen (Abb. 12 und 13). Die Proben wurden im weiterführend für 1 Stunde in 5%iger Natriumhypochloridlösung gelagert zur Auflösung möglicher anhaftender Weichgewebe und danach für 10 Minuten mit 10%iger Zitronensäure gespült zur Entfernung von Schmierschichten auf der Wurzelkanalwand. Die weitere Lagerung erfolgte in 0,1%igen Thymol-Lösung.

Die Untersuchung der Proben fand mit Dr. Richter aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik am Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universitätsklinik Dresden

am Rasterelektronenmikroskop (XL 30 ESEM, Philips, Eindhoven NL) (Abb. 14 und 15) statt. Durch die Nutzung eines Feuchtraummodus konnte auf eine kritische Punkttrocknung und Gold-Palladium-Bedampfung der Proben verzichtet werden. Die Proben wurden auf dem Objektträger mit einer Grafitmasse befestigt. Die Untersuchung erfolgte bei 20 kV und 1,2 mBar und bei 50 bis 1200facher Vergrößerung.

3. Ergebnisse

In der Wurzelkanalbehandlung besteht das Ziel, die nicht mehr erhaltungsfähige oder bereits abgestorbene Pulpa als mögliches Substrat für Mikroorganismen zu entfernen und Bedingungen zu schaffen, das Hohlraumsystem zu desinfizieren und gegen einen Neuzutritt von Mikroorganismen abzudichten, damit der Zahn entzündungsfrei erhalten bleiben kann. Der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist deshalb davon abhängig, in wie weit es gelingt, das Wurzelkanalsystem vollständig mechanisch zu erschließen, um es so vorbereiten zu können, dass es hinreichend gereinigt, desinfiziert und wieder verschlossen werden kann. Aufgrund des physiologischen Alterns des Zahnes und den pathologischen Reizen auf den Zahn verkleinert die Pulpa durch eine lebenslange Produktion von Dentin die Pulpakammer und führt zu einer ständigen Verkleinerung und Verästelung des Wurzelkanalsystems, so dass das Auffinden für den Zahnarzt erschwert wird.

Noch bis zum 18. Jahrhundert bestanden vereinfachte Vorstellungen von der Form und dem Verlauf des Wurzelkanalsystems. So wurden Wurzelkanäle nur als konische Röhren beschrieben.¹ Carabelli (1844) gilt als erster Zahnarzt, der umfangreiche Studien zur Anatomie Wurzelkanäle dokumentierte.² Die Arbeit beschränkte sich jedoch nur auf die Beschreibung der Anzahl und der groben Form von Wurzelkanälen. Für weitergehende anatomische Forschungen wurden Schliffserien von Zähnen hergestellt und mikroskopisch untersucht.³ Nachteilig für eine vollständige Beurteilung war der schliffbedingte Verlust an Zahnhartsubstanz. Die zweidimensionale Untersuchung eines Schliffpräparates erforderte die dreidimensionale Rekonstruktion des Wurzelkanalsystems für eine genaue Analyse.

Um die dreidimensionale Anatomie beschreiben zu können, fanden zwei verschiedene Verfahren Verbreitung. Zum einen wurde der Versuch unternommen, das Hohlraumsystem

¹ Vgl. Richter (1797), S. 134

² Vgl. Baumann (1995), S. 10

³ Vgl. Black (1902) und Miller (1904)

mit Metallen auszugießen und den Zahn chemisch aufzulösen, um die Dreidimensionalität erfassen zu können. Eine zerstörungsfreie Methode untersuchte der Leipziger Anatomie-Professor *Spalteholz* 1908 an Gefäßen des Herzens. Diese neue Methode über das „Durchsichtigmachen menschlicher und tierischer Präparate“ beschrieb er erstmals 1911. Diese sogenannte Aufhellungsmethode war einfach im Verfahren und damit geeignet auch größere Zahlen an zu untersuchenden Zähnen zu analysieren und findet bis heute noch Anwendung in der zahnmedizinischen anatomischen Forschung. Bis zur Entdeckung der X-Strahlen durch *Röntgen* im Jahr 1895 war die Untersuchung jedoch nur an extrahierten Zähnen möglich und nicht am Patienten. Erste umfangreiche radiologische anatomische Studien wurden erst durch *Djerassi* 1922 und *Mueller* 1933 vorgestellt. Auch in diesen Untersuchungen bezogen sich die Arbeiten noch auf extrahierte Zähne. Jeder Zahn wurde zumeist aus zwei Richtungen geröntgt. Auf die Röntgenbilder wurde der Zahn jeweils zweidimensional abgebildet. Eine räumliche Darstellung des Wurzelkanalsystems war nicht möglich. Erst mit der Entwicklung der Magnetresonanztomographie und der Computertomographie gelang es, Zähne und Wurzelkanalsysteme dreidimensional zu rekonstruieren. Die hohe Strahlenbelastung der Computertomographie erlaubte den Einsatz am Patienten nur in seltenen Fällen, so dass eine anatomische Forschung ebenfalls nur auf extrahierte Zähne begrenzt blieb.

Grundsätzlich lassen sich die Untersuchungsmethoden zur Darstellung der Vielfalt der Wurzelkanalsysteme in destruktive und non-destruktive Methoden unterteilen.

3.1 Destruktive Methoden

Unter einem destruktiven Verfahren versteht man die Untersuchung an einem Zahn, bei welchem die Integrität der Zahnhartsubstanz und des Wurzelkanalsystems zerstört werden muss, um das Wurzelkanalsystem darstellen zu können.

3.1.1 Per oculo

Das Verfahren wird an extrahierten Zähnen bzw. während der zahnärztlichen Behandlung am Patienten angewendet. Um die Anzahl und Lage der Wurzelkanäle zu bestimmen, wird der zu behandelnde Zahn bis zur Pulpakammer geöffnet. Der Zahnschmelz und das Dentin werden unter Wasserkühlung und unter Verwendung hochtouriger Antriebe (50000-200000 U/min)

mit kleinen Bohrern und Diamanten entfernt. Nach der mechanischen oder chemischen Entfernung des Pulpagewebes wird die Pulpakammer gereinigt und unter Sicht mit dem bloßen Auge auf das Vorhandensein von Wurzelkanälen untersucht. Während dieser Analyse werden grazile Sonden zum Abtasten benutzt.

Am extrahierten Zahn kann aus der Form und Anzahl der Wurzeln die Anzahl von Wurzelkanälen vermutet werden. Zur Abklärung des genauen Verlaufs und der Form des Wurzelkanalsystems wurden weitergehende Verfahren nötig. In der zahnärztlichen Diagnostik und Therapie werden am Patienten aktuell vermehrt Vergrößerungshilfen (Lupe, Dentalmikroskop) genutzt, um die Wurzelkanalstrukturen auffinden zu können.⁴

3.1.2 Lichtmikroskopie

Während der deskriptiven mikroskopischen Betrachtung versucht man durch das Zerteilen eines extrahierten Zahnes, die anatomischen Details freizulegen und darzustellen (Abb. 16). Dabei gelten die Anfertigung von Zahnschliffen und -schnitten als älteste Methoden.⁵ Georg Carabelli stellte als erster 1831 Schliffpräparate im „Systematischen Handbuch der Zahnheilkunde“ vor.⁶

Zur Anfertigung von Schliffpräparaten wurden die Zähne entweder mit feinen Sandpapieren schichtweise reduziert oder mit Trennscheiben zerlegt. Die freigelegten Wurzelkanäle wurden im Anschluss angefärbt.⁷

Das Herstellen von besonders dünnen für die Durchlicht-Mikroskopie geeigneten Präparaten gelang erst nach dem Fixieren, Trocknen und einer anschließenden Entkalkung. Mit Hilfe der Anfertigung von Serienschnitten nach Anfärbung mit den Farbstoffen Hämatoxyllin-Eosin erfolgten anatomische Studien des Wurzelkanalsystems und der Verzweigungen am Ende der Wurzelspitze.⁸

⁴ siehe Studienarbeit (2012)

⁵ Vgl. Klimm, (2003), S. 42

⁶ Vgl. Carabelli (1844), S.207-230

⁷ Vgl. Loos (1909) und Barrett (1925)

⁸ Vgl. Black (1902), Rottenbiller (1918) und Skillen (1932)

3.1.3 Korrosionstechnik

Für die Herstellung von räumlichen Pulpapräparaten nutzte man seit Anfang des 20. Jahrhunderts das Korrosionsverfahren. Dazu war es notwendig, den extrahierten Zahn und die Pulpakammer zu öffnen, um das Wurzelkanalsystem mit einem fließfähigen Material ausfüllen zu können. *Preiswerk* (1901) nutzte für diese Methode Woodsches Metall, welches sich beim Erstarren ausdehnt und das Kanallumen abdichtet. Nach der Erkaltung des Metalls wurde die Zahnhartsubstanz in Kalilauge aufgelöst.⁹ Übrig blieb der Ausguss des mit Metall gefüllten Wurzelkanalsystems.

Da aber das Metall nicht bis in die kleinsten Verzweigungen eindrang, wurde nach alternativen Materialien gesucht, um die Korrosionsmethode zu optimieren. So verwendete *Fischer* (1907) Zelluloid zum Ausgießen.¹⁰ *Feiler* (1911) und *Hess* (1917) verbesserten die Methode und testeten flüssiges Guttapercha, Kollodium, Kunstharz und Kautschuk.¹¹ Zum Auflösen der Zahnhartsubstanz verwendeten sie 50%ige Salzsäure.

Einen neuen Weg versuchte *Türkheim* (1923) indem er versuchte, das Pulpagewebe zu fixieren und anschließend die Zahnhartsubstanz schonungsvoll und langsam mit 15%iger Salpetersäure. Später wurden eingefärbte Polyester gießharze¹² oder Silikon¹³ zur Markierung des Wurzelkanalsystems verwendet.

3.1.4 Aufhellungsmethode

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde eine neue Methode zur Darstellung anatomischer Hohlräume entwickelt.¹⁴ Ähnlich wie bei der Korrosionsmethode wurde der Zahn bis zur Pulpakammer trepaniert. Nach einer chemischen Auflösung der Pulpa wurden kontrastgebende Färbemittel in das Wurzelkanalsystem eingefüllt (Abb. 17). Auf dem XXIV. Kongress für Innere Medizin in Wiesbaden 1907 beschrieb *Spalteholz* erstmals die Herstellung von transparenten Präparaten von Organen aber auch ganzen Tierkörpern und

⁹ Vgl. Preiswerk (1901)

¹⁰ Vgl. Klimm (2003), S. 42

¹¹ Vgl. Baumann (1995), S. 11

¹² Vgl. Skidmore (1971), Takahashi (1985) und Kishi (1989)

¹³ Vgl. Davis (1972)

¹⁴ Vgl. Krause (1909) und Spalteholz (1911)

Körperteilen. „Dabei wurden Hohlräume farblich markiert, so dass diese das transparente Objekt hindurch in alle Richtungen dreidimensional zu sehen waren.“¹⁵

Während der 12-30stündigen Aufbewahrung des Zahnes in Karbolsäure, wurde dieser durchsichtig und die meisten farblich markierten Strukturen konnten durch die Flüssigkeit hindurch erkennbar gemacht werden. Um eine Verbesserung der Technik zu erzielen, wurden verschiedene Färbeflüssigkeiten wie z.B. Gelatine und Zinnober oder Berliner Blau, sowie die Injektion chinesischer Tinte und die anschließende Aufhellung in Benzol angewendet.¹⁶

3.1.5 Ausgussmethode

Mit der Ausgussmethode sollte der Mangel der durch Korrosion verlorengegangenen Zahnhartsubstanz behoben werden. *Barker* (1969) verfuhr analog zur Korrosionsmethode und füllte das Wurzelkanalsystem mit einem Epoxidharz auf. Bevor die Zahnhartsubstanz in Säure aufgelöst wurde, wurde der Zahn in der Außenkontur mit Silikon abgeformt. Im Anschluss wurde die im Epoxidharz abgebildete Pulpa in die Gussform aus Silikon zurückgesetzt und mit durchsichtigem Kunststoff ausgegossen. Die Methode wurde zur Ausbildung von Studenten in der Zahnmedizin weiter verbessert durch die Verwendung verschiedenfarbiger Kunststoffe.¹⁷

4.1.6 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Das Rasterelektronenmikroskop ermöglicht mithilfe eines sehr fein gebündelten Elektronenstrahls eine Oberfläche abzutasten. In der Zahnmedizin dient das REM der Darstellung der äußeren Zahnkontur und der inneren Kanalform in hoher Auflösung und starker Vergrößerung. Dabei wird bei einem REM eine Elektronenquelle verwendet. In einem elektrischen Feld werden die Elektronen beschleunigt und anschließend durch eine Elektronenlinse abgelenkt. Es erfolgt die Fokussierung auf das zu untersuchende Objekt. Damit ein Zwischenbild auf der einfachen Brennweite entstehen kann, müssen die Elektronen zwei Objektpulen durchlaufen. Im Anschluss daran werden die Elektronenwellen gestreut.

¹⁵ zit. Studienarbeit, S. 27, Vgl. Spalteholz (1911), S.3

¹⁶ Vgl. Moral (1914) und von Lenhossek (1922)

¹⁷ Vgl. Wakkerman (1975)

Wenn die Elektronen wiederholt an den Projektionsspulen abgelenkt werden, kann das Bild durch Projektion auf einem Leuchtschirm erzeugt werden.¹⁸

Durch die viel kleinere Wellenlänge der Elektronen werden Details innerhalb der Zellorgane auf Molekülebene sichtbar.¹⁹ Während ein Lichtmikroskop eine maximale Vergrößerung von 1.000 unter Verwendung einer Ölimmersionslinse erreichen kann, ist das Rasterelektronenmikroskop in der Lage, eine 1.000.000fache Vergrößerung der Präparate zu ermöglichen.

Wichtige Neuentwicklungen sind die Röntgenmikroanalyse, die digitale Bildspeicherung und -verarbeitung, das Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM), das eine Analyse der zu untersuchenden Probe bei Umgebungsdruck zulässt.²⁰

Das REM findet in der anatomischen Forschung Anwendung zur Beurteilung von zusätzlichen feinen Wurzelkanälen²¹ oder Isthmen²². Aktuell verwendet man das REM vor allem in der zahnmedizinischen Forschung, um zu überprüfen, inwiefern die endodontologischen Therapieverfahren effektiv sind.²³

4.1.7 Mikroradiographie (TMR)

Die transversale Mikroradiographie ist schon seit dem Jahre 1940 bekannt und ist auf den Mediziner *Thewlis* zurück zu führen.²⁴ Man versteht unter dem Prinzip der TMR²⁵ „die Messung der Absorption von monochromatischen Röntgenstrahlen durch eine Zahnhartsubstanz (bzw. Knochenprobe) im Vergleich mit der Absorption eines Standards.“²⁶ Durch die Weiterentwicklung von *Angmar* et al. 1963 konnten exakte und quantitativ wertvolle Aussagen über den Mineralgehalt des Zahnschmelzes und des Dentins getroffen werden. Notwendig ist dafür, dass besonders dünne und planparallele Zahnschliffe angefertigt werden, die zwischen 80 und 150 µm dick sein müssen.²⁷ Bei der Anfertigung von

¹⁸ Vgl. Bossek (2008), S. 115

¹⁹ Vgl. Gloede (1986), S. 180

²⁰ Vgl. Flegler (1995) und Koch (2003)

²¹ Vgl. Koenigs (1974)

²² Vgl. Tam (2002)

²³ Vgl. Metzger (2010), S. 697-702 und Rödiger (2010)

²⁴ Vgl. <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/784/pdf/Doktorarbeit.pdf>, S. 9/10

²⁵ heißt transversale Mikroradiographie

²⁶ Vgl. <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/784/pdf/Doktorarbeit.pdf>, S. 9/10

²⁷ Vgl. http://edoc.ub.uni-muenchen.de/4766/1/Mueller-Stahl_Florian.pdf, S.18

Dentinschnitten muss die Dicke der einzelnen Elemente bis zu 200 µm betragen. Nun wird die Probe mit Röntgenstrahlen untersucht, sodass anschließend die Mikroradiographien hergestellt werden können, die auf einem Röntgenfilm dargestellt werden können. Da die Technik der Mikroradiographie eine besonders hohe Auflösung besitzt, ist das Verfahren sehr gut geeignet, morphologische Strukturen des Zahnes zu analysieren. *Saunders* (1957, 1966) nutzte das Verfahren zur Darstellung der Blutgefäße in der Pulpa, indem er Kontrastmittel in den Blutkreislauf applizierte. Mit der Darstellung des Gefäßnetzes innerhalb der Pulpa gelang es gleichzeitig, die Anatomie des Wurzelkanalsystems darzustellen.

3.2 Non-destruktive Methoden

Nichtdestruktive Verfahren sollen eine Untersuchung der Anatomie des Wurzelkanalsystems unter vollständigem Erhalt des Zahnes ermöglichen. Damit können diese Verfahren wiederholt angewendet werden, um beispielsweise vergleichend Therapieverfahren auf die Wirksamkeit hin überprüfen zu können.

Damit sind nicht-destruktive Verfahren nicht nur für in-vitro-Untersuchungen sondern auch für in-vivo-Untersuchungen am Patienten geeignet.

3.2.1 Zweidimensionales Röntgen

Die Entdeckung der Röntgenstrahlen und der Röntgentechnik 1895 durch *Wilhelm Conrad Röntgen*²⁸ war eine neue, entscheidende Entdeckung und für die Zahnmedizin von großer Bedeutung. Es wurde erstmalig möglich, die Zähne der Patienten in vivo zu analysieren und auf ihre Anatomie und Pathologie zu untersuchen. Von der Entdeckung der Röntgenstrahlen bis zu ersten systematischen Röntgenuntersuchungen menschlicher Zähne vergingen noch mehr als 20 Jahre. Erste Untersuchungen fanden aufgrund der noch hohen Expositionszeit nur an extrahierten Zähnen statt.²⁹

²⁸ Vgl. Röntgen (1895), S. 1-10

²⁹ Vgl. Djerassi (1922) und Mueller (1933)

Aktuell werden vor allem zur Verminderung der Strahlendosis digitale Röntgensensoren für die intraorale Röntgenaufnahme am Patienten benutzt. Wie auch in der digitalen Fotografie kommen dabei zwei unterschiedliche Detektorenarten zum Einsatz. Es werden CCD³⁰ und CMOS³¹ Detektoren oder PSP³² Detektoren verwendet.³³ Während bei CCD Sensoren das Bild schrittweise ausgelesen wird, erfolgt bei CMOS-Sensoren die Bildumwandlung sofort, da die Transistoren sich unmittelbar am Pixel befinden.³⁴ Die sogenannte Radiovisographie wurde erstmalig von *Moyen* vorgestellt.³⁵ Mit dieser Technik war es möglich, die Helligkeit und den Kontrast der Röntgenbilder sofort am Computer nachzubearbeiten. Die Strahlendosis je anzufertigender Röntgenaufnahme konnte auf 50-65% im Vergleich zu hochauflösenden Zahnfilmen reduziert werden.³⁶ Zusätzlich konnten nach einer Kalibrierung Längen und Winkel direkt am Röntgenbild ausgemessen werden.³⁷ Je nach Ausrichtung des Röntgenstrahls erfolgt die Abbildung aller kontrastgebenden Körper- und Gewebeanteile auf dem Sensor. Damit wird aus einem dreidimensionalen Objekt ein zweidimensionales Abbild produziert, das durch den Zahnarzt dreidimensional interpretiert werden muss. Zur Erleichterung der Interpretation werden im Einzelfall wiederholte Röntgenaufnahmen aus unterschiedlichen Projektionsrichtungen erforderlich.³⁸

3.2.2 Computertomographie (CT)

Im Gegensatz zur zweidimensionalen Röntgenaufnahme werden während einer umlaufenden Bewegung der Röntgenröhre um den zu beurteilenden Körper bei der Computertomographie Schnittbilder reproduziert und mit einem Computer dreidimensional digital rekonstruiert. *Hounsfield* entwickelte 1969 erstmalig ein CT. Die erste CT-Aufnahme am Menschen wurde 1971 angefertigt.³⁹ Aufgrund der geringen Auflösung und der langen Expositionszeit wurden erste Versuche zur Untersuchung der Anatomie menschlicher Zähne erst im Jahr 1990 unternommen.⁴⁰ Die Abbildungsqualität reichte zur Beurteilung der Wurzelkanalstrukturen nicht aus. Erst 10 Jahre später erfolgte während einer retrospektiven Untersuchung an 100

³⁰ Charge coupled device (CCD)

³¹ Complementary metal oxide semiconductor (CMOS)

³² Photostimulable detector (PSP)

³³ Vgl. Grover (2012)

³⁴ Vgl. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/CMOS-Sensor-CMOS-sensor.html>; zugegriffen am 16.12.2012

³⁵ Vgl. *Moyen* (1986, 1989)

³⁶ Vgl. *Pharaoah* (2009)

³⁷ Vgl. *Klimm* (2003, 2011)

³⁸ Vgl. *Walton* (1973)

³⁹ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Computertomographie>; zugegriffen am 16.12.2012

⁴⁰ Vgl. *Tachibana* (1990)

Dental CT-Aufnahmen eine Untersuchung zur Anzahl von Wurzelkanälen in oberen ersten Molaren.⁴¹

3.2.3 Röntgenmikrotomographie (XMT)

Die Röntgenmikrotomographie ist eine modifizierte Methode der axialen Computertomographie, die eine zerstörungsfreie Untersuchung von Zähnen ermöglicht.⁴² Dank der XMT ist die Analyse von mikrostrukturierten Proben möglich. Die Ortsauflösung liegt bei 20 µm/Voxel⁴³ bis 500 nm/Voxel. Die Schichtstärke von bis zu 12,5 µm ist im Vergleich zu einem konventionellen CT mit etwa 1,5 mm deutlich kleiner.⁴⁴ Die Anwendung der Mikro-CT-Technik ist auf in-vitro-Untersuchungen von kleinen Proben begrenzt. In der zahnmedizinischen Forschung wird das Verfahren zur Darstellung der Anatomie des Wurzelkanalsystems genutzt⁴⁵ und darüber hinaus zur Überprüfung der Effektivität verschiedener Therapieverfahren im Rahmen der Endodontie.⁴⁶ Dazu können mithilfe einer Software MikroCT-Aufnahmen vor und nach der Therapie durch Überlagerung verglichen werden, so dass bspw. Fehler in der Behandlung oder die Wirkungsweise verschiedener Wurzelkanalinstrumente ermittelt und analysiert werden kann.⁴⁷

3.2.4 Magnetresonanztomographie (MRT)

Entwickelt wurde die Technik der MRT von dem amerikanischen Forscher *Lauterbur* im Jahre 1973. Die Idee bestand in der Nutzung magnetischer Gradientenfelder für eine räumliche Zuordnung des Untersuchungsobjektes. Die MRT basiert auf der Rotation eines Magnetfeldes, sodass unterschiedliche Projektionen der Probe entstehen. Diese Daten werden nachfolgend ausgewertet und zu einem zwei- oder dreidimensionalen Bild errechnet. Die Magnetresonanztomographie auch Kernspintomographie genannt, ist eine röntgenstrahlenfreie Methode zur Darstellung der inneren Strukturen von den zu untersuchenden Körpern. In der Zahnmedizin ist das Verfahren geeignet für die non-destruktive Widergabe von dem Markorgan des Zahnes.⁴⁸ Dabei nutzt man anstatt der Röntgenstrahlen zwei starke Magnetfelder und Radiowellen. Die Grundlage dieser Technik

⁴¹ Rathi (2010)

⁴² Vgl. Klimm (2011), S. 36

⁴³ Voxel heißt Volumenpunkt

⁴⁴ Dowker (1997)

⁴⁵ Grande (2012)

⁴⁶ Peters (2000) und Paqué (2011)

⁴⁷ Metzger (2011)

⁴⁸ Baumann 1993 a und b

besteht in der Eigenschaft von Wasserstoffatomen, welche sich durch den Einfluss eines Magnetfeldes ähnlich der Kompassnadeln in eine bestimmte Richtung ausrichten. Der Spin-Effekt wird erreicht, indem man Radiowellen mit einer bestimmten Frequenz auf die Wasserstoffatome der Probe lenkt, welche sich daraufhin beginnen zu drehen. Bei der Beendigung des Impulses können sich die Atome wieder in ihren Ursprungszustand zurück ausrichten. Der Magnetresonanztomograph kann nun die Impulse messen, welche abgegeben werden, wenn sich die Atome wieder in ihren Normalzustand bewegen.⁴⁹

Da die Pulpa als Weichgewebe mehr Wasserstoffatome besitzt als die Knochenstruktur entstehen Unterschiede in der Impuls-Abgabe. Diese Unterschiede werden durch Grauabstufungen während der Verarbeitung und Messung der Impulse analysiert und im detailreichen Abbild dargestellt. Die Magnetresonanztomographie kann sowohl an extrahierten Zähnen als auch am Patienten in vivo angewendet werden.

3.2.5 Dentale digitale Volumetomographie (DVT)

Mit der Einführung der dentalen digitalen Volumetomographie (DVT) in der Zahnmedizin im Jahr 1998 besteht erstmals die Möglichkeit einer dreidimensionalen Bildgebung und -auswertung mit einer im Vergleich zur Computertomographie deutlich reduzierten Röntgenstrahlung.⁵⁰ Die dentale digitale Volumetomographie ermöglicht eine dreidimensionale radiographische Darstellung und Beurteilung von Hartgeweben bis zu einer Größe von etwa 100 bis 120 µm. Die neue Art der Computertomographie (CT) nach dem Prinzip der Rückprojektion wird für Problemstellungen in der Endodontie generell als geeignetes diagnostisches Verfahren empfohlen. Im Vergleich zu CT-Aufnahmen ist die effektive Dosis der Röntgenstrahlen moderner DVT-Geräte geringer, jedoch höher als die konventioneller zweidimensionaler Röntgenaufnahmen. Mit Hilfe von DVT-Aufnahmen lassen sich anatomische Besonderheiten hinsichtlich Wurzelform und Wurzelkanalanzahl ermitteln. Präoperative differenzialdiagnostische Fragestellungen in Bezug auf das Vorhandensein von Vertikalfrakturen, Perforationen oder Resorptionen können durch eine DVT-Aufnahme erstmals mit größerer Sicherheit ermittelt werden. Mit der DVT steht ein aussagekräftiges bildgebendes Verfahren für die Ermittlung des Behandlungserfolges zur Verfügung, das auch als Grundlage für weitergehende epidemiologische Untersuchungen dienen kann.

⁴⁹ Vgl. <http://www.gesund-durch.de/mrt-strahlenfreie-bilder-aus-dem-koerperinneren/>; zugegriffen am 02.11.2012

⁵⁰ Vgl. Mozzo (1998)

Anhand der dreidimensionalen Rekonstruktion lassen sich die Anzahl und der Verlauf der Wurzelkanäle sowie anatomische Besonderheiten bestimmen.⁵¹

3.3. Praktischer Teil: Darstellung und Gegenüberstellung verschiedener Methoden zur Darstellung des Wurzelkanalsystems am extrahierten Zahn

An nur einem extrahierten oberen ersten Molaren gelang es, verschiedene Untersuchungsmethoden zur Darstellung des Wurzelkanalsystems anzuwenden. Die Auswertung und Interpretation der Abbildungen erfolgte mit einem auf Endodontie spezialisierten Zahnarzt.

Vor Beginn der Untersuchung wurde der Zahn aus verschiedenen Richtungen fotografiert (vgl. Abb. 1a-c). An der klinischen Zahnkrone war an der hinteren Wand eine ausgedehnte und an der vorderen Wand eine kleine kariöse Läsion (Abb. 1c) zu erkennen. Die tiefe Karies und Zerstörung des Zahnes bis ehemals tief unter dem Zahnfleischrand kann als Grund für die Extraktion angenommen werden. Ansonsten wies der Zahn keine Hinweise auf Frakturen oder Risse auf und erschien für die weitergehenden Untersuchungen geeignet.

3.3.1 Non-destruktive Methoden

Zweidimensionales Röntgen

Ähnlich dem intraoralen Röntgen am Patienten, erfolgten die Röntgenaufnahmen in Rechtwinkeltechnik und anschließend in der mesial- und distalexzentrischen Projektion (Abb. 18a-c). Im Gegensatz zur Anwendung beim Patienten fehlt hierbei die Überlagerung der Zahnstruktur durch das Knochengewebe, so dass die Röntgenaufnahmen klar und kantenscharf erscheinen. Je höher der Mineralgehalt der Zahngewebe, desto höher ist der Widerstand für den Röntgenstrahl, wodurch die Gewebe auf dem Bild heller abgebildet werden. Am hellsten stellt sich der Zahnschmelz dar, während das Wurzel- und Kronendentin, sowie das auf der Wurzel aufliegende Zement radiographisch nicht zu unterscheiden sind. An der äußeren Kontur der Zahnkrone, vom Übergang der Schmelz-Zementgrenze (SZG) zum Wurzeldentin an der distalen Kronenwand, erscheint das Dentin

⁵¹ Vgl. Kottoor (2010), Lee (2011) und Matherne (2008)

weniger röntgenopak als das vergleichbare Gewebe. Auf der Aufnahme in Rechtwinkeltechnik kommt es zu den größten Überlagerungen dentaler Strukturen, so dass die Zahnhartsubstanzdefekte im Vergleich zu der distalexzentrischen Aufnahme weniger deutlich erkannt werden können (vgl. Abb. 18a mit 18c). Im Inneren der Zahnkrone ist die Ausdehnung der Pulpakammer etwa auf Höhe der SZG-Grenze erkennbar. Unter dem offensichtlichen Einfluss der Karies erscheint die Pulpakammer an der hinteren Begrenzung eingengt, während in der vorderen Begrenzung die Pulpakammer normal ausgebildet ist. Von der Pulpakammer sind jeweils zentral entlang der Wurzeln bis zur Wurzelspitze weniger kontrastgebende Linien erkennbar. Diese sind zweidimensionale Projektionen des dreidimensionalen Wurzelkanalsystems und erwecken den Eindruck eines gleichförmigen, röhrenförmigen Hohlraums. An den Wurzelspitzen sind an allen Wurzeln Aufteilungen erkennbar (Abb. 18a und b, Pfeile). Auf allen drei Projektionen entsteht der Eindruck, dass jede Wurzel über einen Wurzelkanal verfügt. Aufgrund der digital verarbeiteten Bildgebung gelingt es unter vergrößerter Betrachtung, weitere Verästelungen an der palatinalen und distobukkalen Wurzel zu erkennen (Abb. 19a und b, Pfeile).

Die Weite der Pulpakammer und des Wurzelkanalsystems kann als ein Hinweis auf einen jungen Patienten etwa im Alter von 18-25 Jahren interpretiert werden.

Mikrotomographie

Auf der Grundlage der Rohdaten von 1347 Einzelabbildungen während der Mikrotomographie gelang am Computer eine dreidimensionale Rekonstruktion. Sowohl die äußere plastisch rekonstruierte Kontur des Zahnes, als auch die an der hinteren Kronenwand eingebrochene Karies erscheinen vollständig und identisch mit der Anatomie des natürlichen Zahnes. Mithilfe der Software gelang es, die unterschiedlichen Grauwerte der Röntgenaufnahmen farblich zu markieren, um das Wurzelkanalsystem in Beziehung zur äußeren Kontur des Zahnes hervorzuheben (Abb. 20a und b). Auf der Wurzeloberfläche sind die Zutrittsstellen der ehemaligen Nerv- und Blutgefäßversorgung erkennbar, die anatomisch als Foramen apicale beschrieben werden (Abb. 20a, Pfeile). Bereits an diesem Präparat ist aber erkennbar, dass sich die Foramen nicht immer an der Wurzelspitze befinden müssen. So endet beispielsweise der zweite mesiobukkale Wurzelkanal etwa 5 mm vor der Wurzelspitze (Abb. 20 a und b, schwarze Pfeile).

Anders als in der zweidimensionalen Röntgenaufnahme angenommen, befinden sich in der mesiobukkalen Wurzel zwei von einander getrennt verlaufende Wurzelkanäle und in der distalen Wurzel drei bereits im oberen Drittel sich wieder vereinigende Wurzelkanäle. Auch zwischen den beiden mesiobukkalen Wurzelkanälen scheint eine Querverbindung zu bestehen.

Für Schulungszwecke wurden die Röntgenbilder farblich so markiert, dass eine erleichterte dreidimensionale Vorstellung des Wurzelkanalsystems möglich wird (Abb. 21). Aus 180 Einzelaufnahmen wurde ein Video im Format *.mp4 angefertigt, so dass der Zahn aus 360° in der Drehung um die eigene Achse betrachtet werden kann.

Auf allen rekonstruierten Abbildungen ist bereits ein sehr differenziertes Wurzelkanalsystem mit mehreren Verästelungen ausmachbar. Entsprechend dem Querschnitt der Wurzel sind die Wurzelkanäle oval bis bandförmig und nur selten kreisförmig. Auf den axialen Schnittebenen ist erkennbar, dass sich der Querschnitt der Wurzelkanäle über die gesamte Wurzellänge mehrfach in der Form und Ausdehnung ändert. Auffällig ist ein Unterschied im Kontrastverhalten um das Wurzelentin. Das weniger mineralisierte Wurzelzement lässt sich vom Dentin unterscheiden. Kleinste zusätzliche Wurzelkanäle sind andeutungsweise sichtbar (Abb. 22a, Pfeile), die in der dreidimensionalen Rekonstruktion von der Software nicht erkannt wurden (vgl. Abb. 21). Risse zwischen Wurzelzement und Dentin waren erfassbar (Abb. 23, Pfeile).

Dentale digitale Volumetomographie

Nach der durch das Programm iDixel (Version 2.1.1.1, Morita, Japan) automatisch dreidimensional rekonstruierten Daten wurde der Zahn vollständig abgebildet. Auf der äußeren Kontur waren ebenso wie bei der MikroCT-Aufnahme die Ausdehnung der Karies und die apikalen Foramen erkennbar (Abb. 24a). Auf dem axialen Schnittbild auf der Höhe der mesialen und distalen Karies ist die Ausdehnung beider kariöser Läsionen bis zur Pulpakammer zu sehen. Die helle Begrenzung markiert den am höchsten mineralisierten Bestandteil der Zahnkrone, den Zahnschmelz. Im Dentin sind Hohlräume und Zonen verminderter Mineralisation abgebildet (Abb. 24b). Auf den ausgewählten axialen Serienschnitten sind die Kontur der Wurzel und die Anzahl der Wurzelkanäle sichtbar (Abb. 25). Im Vergleich zur Mikro-CT-Aufnahme sind Feinstrukturen wie z.B. Risse, Isthmen oder zusätzliche kleinste Wurzelkanäle nicht zu erkennen.

3.3.2 Destruktive Methoden

Per oculo und Dentalmikroskop

Nach Abschluss der Präparation der endodontischen Zugangskavität gelang es unter Sicht mit dem Dentalmikroskop, die Wurzelkanaleingänge darzustellen (vgl. Abb. 6a und b). In die mesiobukkale Wurzel führte ein großer (MB 1) und ein zusätzlicher kleiner Wurzelkanal (MB 2). Das distobukkale Wurzelkanalsystem begann am Boden der Pulpakammer sehr breit mit drei Wurzelkanälen, die über einen Isthmus miteinander in Verbindung standen. In Richtung der palatinalen Wurzel ließ sich ein großer Wurzelkanal darstellen. Ein Isthmus zwischen den beiden mesiobukkalen Wurzelkanälen war nicht zu erkennen.

Zweidimensionales Röntgen mit Kontrastmittel

Für einen geradlinigen und damit erleichterten Zugang der röntgenkontrastreichen Wurzelkanalinstrumente aus Edelstahl in das Wurzelkanalsystem wurden an den Wurzelkanaleingängen überlagernde Sekundärdentinschichten entfernt (Abb. 26 und 27). Aufgrund der großen Weite des palatinalen Wurzelkanaleingangs wurde keine anatomische Veränderung vorgenommen (Abb. 28).

Bei der Rechtwinkeltechnik (RWT) handelt es sich um die favorisierte Aufnahmetechnik während einer Wurzelkanalbehandlung. Es soll während dieser Röntgenaufnahme ermittelt werden, ob alle Wurzelkanäle aufgefunden wurden, welche Länge und welche Krümmung sie aufweisen. Auf der zweidimensionalen unter optimalen Bedingungen ohne überlagernde Knochenstrukturen hergestellten digitalen Röntgenaufnahme sind vier Wurzelkanalinstrumente erkennbar (Abb. 7). Überlagerungsbedingt kann aber keine Aussage darüber erfolgen, ob die mit den Instrumenten markierten Wurzelkanäle selbstständig voneinander verlaufen. Ein Isthmus in der mesialen oder distalen Wurzel konnte nicht ermittelt werden. Auch eine Aussage zur exakten Wurzelkanallänge oder Krümmung war nicht möglich.

Eine zusätzliche mesiodistale Projektion wurde angefertigt für die getrennte Darstellung der mesialen und distalen Wurzelkanäle (Abb. 29 und 30). Die Überlagerungseffekte der beiden Wurzeln erschwerten eine eindeutige Zuordnung und Beurteilung, inwieweit alle Wurzelkanäle aufgefunden wurden. Kleine Wurzelkanalaufteilungen an der Wurzelspitze konnten nicht mehr eindeutig erkannt werden. Obwohl eine weitere Projektionsebene zur

Verfügung stand, war eine dreidimensionale Rekonstruktion des Wurzelkanalverlaufs nur abzuschätzen, jedoch nicht zu rekonstruieren. Ebenso ließ sich die tatsächliche Wurzelkanallänge allein mit dem Röntgenbild nicht bestimmen. Es bestand sogar der Verdacht, dass der dargestellte Wurzelkanal MB 2 zu kurz mit den Kontrastkörpern dargestellt wurde und der Wurzelkanal tatsächlich länger sei (Abb. 29 b, Pfeil).

Trotz genauer Kenntnis der Anatomie aus den Röntgenausgangsaufnahmen gelang es nicht, alle Wurzelkanalaufteilungen an der Wurzelspitze mit den Kontrastkörpern darzustellen.

Schliffpräparat mit Lichtmikroskop

Mit der gewählten Methode gelang es, 5 Schliffpräparate im Abstand von jeweils 2 mm für die weitergehende lichtmikroskopische Untersuchung herzustellen (vgl. Abb. 8-10). Die Präparate wurden jeweils koronal in der Übersicht und in Ausschnittvergrößerungen fotografisch dokumentiert (Abb. 31-54).

Ohne Anfärbung gelang es, am Hartgewebeschliff alle in den zuvor angewendeten Verfahren gefundenen Wurzelkanäle und Hohlräume in großer Detailschärfe zu erkennen. Zusätzlich konnten weitere endodontische Hohlräume (Abb. 39 und 40), Wurzelkanäle (Abb. 32-35, 54) und Risse (Abb. 38 und 39) und Gewebeeinschlüsse (Abb. 48, 49 und 52) aufgefunden werden.

Rasterelektronenmikroskop

In Vorbereitung auf die Untersuchung am ESEM wurden zwei Dentinproben aus der 3. Ebene ausgewählt (Abb. 55) und aus der Kunststoffeinbettung mechanisch entfernt. Nach der Anfertigung von Bruchpräparaten (vgl. Abb. 12 und 13) und der chemischen Reinigung des Dentins gelang es, Mikrostrukturen des Pulpa-Dentin-Komplexes darzustellen. Die mechanisch unbehandelte Oberfläche des Dentins im palatinalen Wurzelkanal erschien bei 500facher Vergrößerung rau und unregelmäßig (Abb. 56). Erst bei 1200facher Vergrößerung waren unregelmäßige Dentinkanälchen ohne abgerissene Odontoblasten erkennbar (Abb. 57). Innerhalb des mesiobukkalen Wurzelkanals befanden sich in Richtung des Isthmus weichgewebige und hartgewebige Einlagerungen (Abb. 58). Auf der Bruchfläche des Dentins waren trocknungsbedingte Risse des Dentins sichtbar. In der Tiefe ließen sich weiterhin einzelne Odontoblastenfortsätze darstellen (Abb. 58). Zusätzliche Wurzelkanäle waren in den ausgewählten Proben nicht vorhanden.

Vergleichende Darstellungen

Die mesiobukkale Wurzel wurde als Schliffpräparat unter der Sicht eines Dentalmikroskops und eines Lichtmikroskops verglichen. Es konnten keine prinzipiellen Unterschiede erkannt werden (Abb. 59-61). Einfluss auf die detailscharfe Darstellung feingewebiger Strukturen hatte die Art der Beleuchtung. Während im Auflichtverfahren mit Xenonlicht Reflexionen zu beobachten waren, gelang es mittels einer UV-Lampe und seitlicher Durchleuchtung die Unterschiede der Transparenz im Dentin, der Wurzelkanäle, der Risse und der gewebigen Einschlüsse darzustellen (Abb. 59-61 jeweils rechts oben). Ähnliche Ergebnisse wurden mit einer Ringbeleuchtung und zusätzlicher seitlicher Durchleuchtung unter Verwendung eines dunklen Untergrundes erzielt (Abb. 59-61 links unten). Dabei konnte die natürliche Farbgebung des Dentins und des Wurzelzements erhalten bleiben.

Im Vergleich der histologischen Präparate zum zugehörigen Schnittbild des MikroCT fällt eine deutlich größere Farbvielfalt in der Widergabe dentaler Strukturen auf. Gering mineralisierte Gewebe innerhalb des Wurzelkanals, wie z.B. Weichgewebe sind auf der MikroCT-Aufnahme nur zu vermuten, während sie im histologischen Präparat eindeutig zu erkennen sind (Abb. 60 und 61, gelbe Pfeile). Feine Risse, die in der MikroCT-Aufnahme an der Zementgrenze (Abb. 61, schwarzer Pfeil) abgebildet wurden, befanden sich ebenfalls im histologischen Präparat. Umgekehrt waren Risse im stärker mineralisierten Dentin auf der Mikro-CT-Aufnahme nicht erkennbar (Abb. 61, roter Pfeil).

4. Diskussion

Die anatomische Forschung gehört zur Grundlagenforschung in der Medizin. Die Ergebnisse sind unter anderem wichtig für die erfolgreiche Anwendung und Entwicklung von wirksamen Therapieverfahren in der Zahnmedizin.

Die Möglichkeiten zur Untersuchung der Anatomie des Wurzelkanalsystems erstrecken sich von einfachen bis zu sehr aufwändigen Verfahren. Sie erfolgen zumeist an extrahierten Zähnen im Rahmen von in-vitro- bzw. ex-vivo-Untersuchungen.

Mit der Habilitationsschrift von *Hess* im Jahre 1917⁵² erfolgte der entscheidende Durchbruch. Es wurde erstmals möglich nachzuweisen, dass sich das Wurzelkanalsystem altersbedingt umbaut. Weiterhin konnte anschaulich gezeigt werden, dass der Wurzelkanal nicht nur aus einem konischen Rohr besteht, sondern ein System von Kanälen aufweist, die gekennzeichnet sind durch verschiedenartige Ramifikationen, Windungen und Verästelungen.

Die ersten umfangreichen Arbeiten unter Anwendung der Korrosionsmethode und Schnitttechnik von *Hess* an 2800 extrahierten Zähnen verdeutlichte das Vorhandensein von Markkanälen und wies verschiedene Häufigkeiten von Hauptkanälen, sowie die apikalen Verzweigungen auf. Problematisch waren die methodentypischen Artefakte, die durch die Wärmeeinwirkung begründet waren.⁵³ Nachteilig ist zusätzlich, dass das Verhältnis zur Außenkontur verloren geht und die Zerbrechlichkeit der Präparate höher ist.⁵⁴ In Abhängigkeit zur Fließfähigkeit der verwendeten Metalle, wurden nur Teile des Wurzelkanalsystems abgebildet. Eine Differenzierung zwischen Artefakten und tatsächlich abgebildeten Wurzelkanalstrukturen war nach Auflösung der Zahnhartsubstanz nicht mehr zweifelsfrei möglich.⁵⁵

Ein großer Vorteil der durch *Spalteholz* Anfang des 20. Jahrhunderts eingeführten Aufhellungsmethode ist der Erhalt der Außenkontur des zu untersuchenden Objektes (vgl. Abb. 17). Es können jedoch nur die Wurzelkanalanteile durch das transparente Dentin dargestellt werden, die nicht mit Weich- oder Hartgewebe verschlossen oder blockiert sind, damit das eingefügte Färbematerial alle kleinen Kanäle erreichen und markieren kann.

Während jeder Wurzelkanalbehandlung am Patienten muss der Zahn, welcher behandelt wird, auf seine Anatomie vom Zahnarzt untersucht werden. Das hier in Anwendung kommende Verfahren „per oculo“ verfügt über die geringste Auflösung, so dass Feinheiten des Wurzelkanalsystems nicht erfasst werden können. Erst mit Unterstützung einer stark vergrößernden Lupenbrille oder einem Dentalmikroskop gelingt es, ähnliche Darstellungen des Wurzelkanalsystems zu ermöglichen, wie unter Laborbedingungen am histologischen Schliffpräparat. Verbesserte optische Bedingungen könnten eventuell durch eine zusätzliche Durchleuchtung des Zahnes mit Lichtwellen unterschiedlicher Wellenlänge erzielt werden,

⁵² Vgl. Hess (1917)

⁵³ Vgl. Fischer (1911)

⁵⁴ Vgl. Baumann (1995), S. 11

⁵⁵ Vgl. Fischer (1911)

wie am Beispiel des experimentellen Einsatzes einer UV-Lampe im praktischen Arbeitsteil (vgl. Abb. 59-61).

Während die meisten destruktiven Verfahren am Patienten ausscheiden, kommen zwei- und dreidimensionale Röntgenverfahren am Patienten unterstützend zum Einsatz. Auf zweidimensionalen Röntgenaufnahmen kommt es jedoch zu starken Überlagerungseffekten, welche eine Interpretation der Röntgenbilder erschweren (vgl. Abb. 7, 29 und 30). Je nach Projektion werden die Wurzelkanalstrukturen überlagert, so dass eine zuverlässige Aussage über die Anzahl nicht möglich ist. Zusätzlich ist die Interpretation vom Betrachter und von seiner „Tagesform“ abhängig und gibt keine objektiven reproduzierbaren Informationen über die Anzahl und den Verlauf der Wurzelkanäle.⁵⁶

Dreidimensionale Röntgenaufnahmetechniken erscheinen für die Darstellung des Wurzelkanalsystems am Patienten am besten geeignet zu sein.⁵⁷ Nachteilig ist die im Vergleich zu einer Einzelzahnaufnahme höhere Strahlenbelastung für den Patienten. Die Anwendung der DVT ermöglicht eine dreidimensionale Darstellung der Zahn- und Wurzelform bei gleichzeitiger Abbildung angrenzender knöcherner Strukturen.⁵⁸ Endodontische Hohlräume können während der dynamischen Betrachtung ermittelt werden.⁵⁹ Weiterhin kann die Länge des Zahnes und die der Wurzelkanäle besser ermittelt werden als mit zweidimensionalen Röntgenaufnahmen.⁶⁰ Feine Risse, kleinste Wurzelkanäle, Isthmen sind jedoch nicht mit einer DVT erkennbar, wie dies auch im experimentellen Arbeitsteil nachgewiesen wurde. Durch röntgenkontrastreiche bspw. metallische Füllungsmaterialien innerhalb des Wurzelkanals entstehen Artefakte, die die Auswertung erschweren oder unmöglich machen.

Erschwerend kommen zu der im Vergleich zum Mikro-CT geringeren Auflösung, die während der mehreren Sekunden andauernden Aufnahme minimale Bewegung des Patienten hinzu. Durch Atmung, Schluckbewegungen oder sonstige Bewegungen wird das Auflösungsvermögen der Sensoren zusätzlich beeinträchtigt infolge der sogenannten Bewegungsartefakte.⁶¹

⁵⁶ Vgl. Goldmann (1972, 1974)

⁵⁷ Vgl. Schulze (2009)

⁵⁸ Vgl. <http://www.dresden-zahnarzt.de/zahnarzt-leistungen/dentale-volumentomographie.php>, zugegriffen am 19.12.2012

⁵⁹ Vgl. Patel (2009)

⁶⁰ Vgl. Schulze (2009)

⁶¹ Vgl. Barrett (2004)

Das hochauflösende Verfahren der Mikro-Computertomographie kann zurzeit noch nicht am Patienten angewendet werden, da die Röntgenstrahlenbelastung und die Expositionszeit zu hoch sind. Das Verfahren wird deshalb ausschließlich für experimentelle Untersuchungen genutzt. Aufgrund der geringen Schichtstärke wird im Vergleich zu allen anderen Röntgenaufnahmetechniken die beste und kontrastreichste Abbildung von Wurzelkanalsystemen möglich. Trotz der hohen Auflösung, können aber nicht alle Details des Wurzelkanalsystems abgebildet werden. Im Experiment scheint es nicht gelungen zu sein, einen Riss im höher mineralisierten Dentin darzustellen (vgl. Abb. 61). Darüber hinaus erfolgt die dreidimensionale Rekonstruktion anhand der Grauwerte der einzelnen Pixel, so dass eine genaue Wiedergabe des Volumens nur näherungsweise erfolgen kann. Pulpagewebe kann auf der Röntgenaufnahme nicht erkannt werden.

Als Standardverfahren für anatomische Studien haben sich histologische Verfahren bewährt. Sie sind trotz hoch moderner Computer- und Röntgenverfahren noch nicht gleichwertig ersetzbar.

Die Anfertigung von Zahnschliffen und –schnitten ist eine kostengünstige und detailgetreue, jedoch methodisch zeitaufwändige Methode zur Darstellung der Anatomie.⁶² Hitze- und trocknungsbedingte Rissbildungen können durch eine konsequente feuchte Lagerung vermieden werden. Während der langwierigen mikroskopischen Auswertung war das Austrocknen der Dentinproben jedoch nicht zu verhindern (Abb. 62). Zügiges Arbeiten kann die Artefaktausbildung minimieren. Die Einbettung in Kunststoff und anschließende Versiegelung von histologischen Dünnschliffen könnte die Artefaktbildung reduzieren.

Zur Darstellung kleinster Bestandteile des Wurzelkanalsystems empfiehlt sich die Nutzung des REM und ESEM mit einer Auflösung von bis zu 0,4nm. Schließlich konnten im experimentellen Arbeitsteil Dentinkanälchen und Odontoblastenfortsätze im Feuchtraum ohne Goldbedampfung dargestellt werden. Jedoch erschwert die hohe Auflösung die Orientierung auf dem zu untersuchenden Objekt und ist deshalb nur für Detailfragen zur Wurzelkanalanatomie geeignet. Die Darstellung des gesamten Wurzelkanalsystems gelingt mit dem REM nicht. Vielmehr müssen die Proben entlang des Wurzelkanalsystems aufgebrochen werden, so dass herstellungsbedingte Artefakte nicht ausgeschlossen werden können.

⁶² siehe Meyer (1955, 59, 63, 70) Wachserkonstruktion

Besonders geeignet ist das REM zur Prüfung der Wurzelkanaloberfläche auf mikrobielle, chemische oder sonstige morphologische Veränderungen. Damit können Therapieverfahren experimentell überprüft werden.

Die REM-Untersuchung unter Feuchtraumbedingungen ohne Hochvakuum ermöglicht die Erforschung feuchter Proben ohne Volumenveränderung. Bei starker Vergrößerung und längerer Beobachtung kann sich die Probe jedoch erwärmen und schließlich reißen.

Unter Verzicht auf Röntgenstrahlung ermöglicht die MRT die Darstellung des Wurzelkanalsystems und der Weichgewebe ohne den Zahn zerstören zu müssen. Damit wäre das Verfahren ideal für die Anwendung am Patienten. Aktuell ist die Auflösung aber nicht ausreichend. Die Auflösung der Bilder ist bei den zurzeit üblichen Geräten auf etwa 1 mm begrenzt.⁶³ Die lange Zeit und die hohe Feldstärke für das Verfahren lassen eine Anwendung für anatomische Untersuchungen am Patienten nicht zu.

5. Schlussfolgerung

Eine optimale Methode zur Ermittlung der Vielfalt der Wurzelkanalsysteme gibt es in der bisherigen zahnmedizinischen Wissenschaft weder für in-vitro noch für in-vivo-Untersuchungen. Jedes Verfahren birgt Vor- und Nachteile, die entsprechend der erforderlichen anatomischen Fragestellung abgewogen werden müssen. Ein Erfassen aller Details eines Wurzelkanalsystems ist am besten leistbar, indem man mehrere Methoden durchführt und die Ergebnisse methodenkritisch vergleicht.

Für die Behandlung am Patienten empfiehlt sich die Verwendung optischer Vergrößerungen zur Darstellung des Wurzelkanalsystems. Die Nutzung der dentalen digitalen Volumentomographie stellt eine wichtige Erweiterung für die Ermittlung der tatsächlichen Anatomie des Wurzelkanalsystems dar.

⁶³ Vgl. <http://www.gesundheit.de/medizin/untersuchungen/untersuchungsmethoden/magnetresonanztomographie-vor-und-nachteile>, zugegriffen am 19.12.2012

6. Abbildungen

Abb. 1

Dr. Frank Paqué aus der Universität
Zürich am Mikro-Computertomographen



Abb. 2

Zahn 16 in a) okklusaler, b) bukkaler und
c) mesialexzentrischer Ansicht



Abb. 3

Dentale digitale Volumentomographie
mit Patient (Veraviewposcs 3 D, Morita)



Abb. 4

Zahn 16 auf zweidimensionaler
Röntgenaufnahme in Rechtwinkeltechnik
abgebildet



Abb. 5

Arbeit am Dentalmikroskop ProErgo
(Zeiss, Oberkochen)

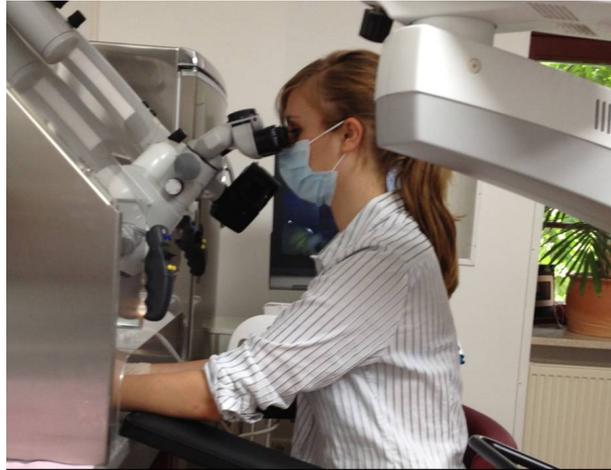


Abb. 6

Zahn 16 nach Präparation der
endodontischen Zugangskavität
b) vergrößerte Darstellung der
Ausgangssituation mit den
Wurzelkanleingängen MB 1 und 2

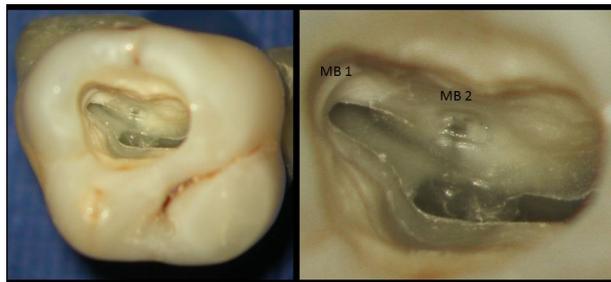


Abb. 7

Zweidimensionale Röntgenaufnahme mit
kontrastgebenden Instrumenten innerhalb
der aufgefundenen Wurzelkanäle

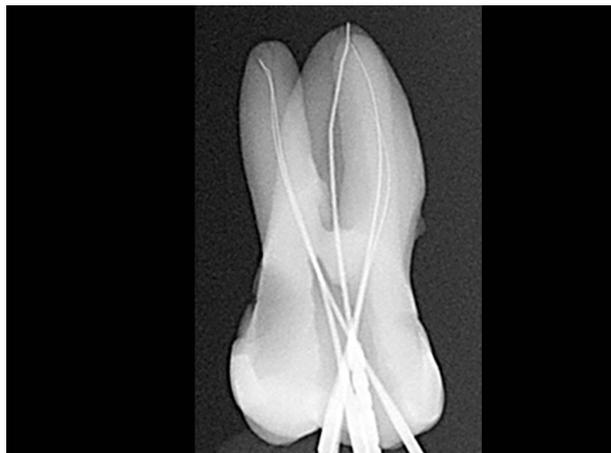


Abb. 8

Schematische Darstellung zur Herstellung
der 5 Schliffpräparate am Zahn 16 nach
Einbettung in Kunststoff

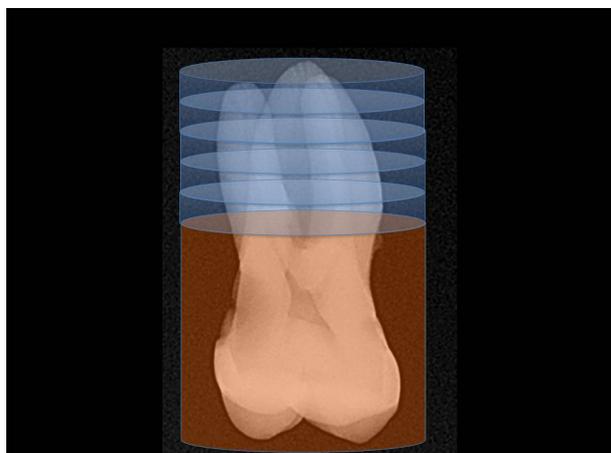


Abb. 9

Herstellung der Schliffpräparate unter
Wasserkühlung im Accutom 50 (Strues)



Abb. 10

Fertige markierte und vermessene
Schliffpräparate



Abb. 11

Lichtmikroskop Leica mit Digitalkamera



Abb. 12

Vorbereitung des Bruchpräparates aus
der palatinalen Wurzel mit
Sollbruchstellen, roter Pfeil markiert
Untersuchungsrichtung mit REM

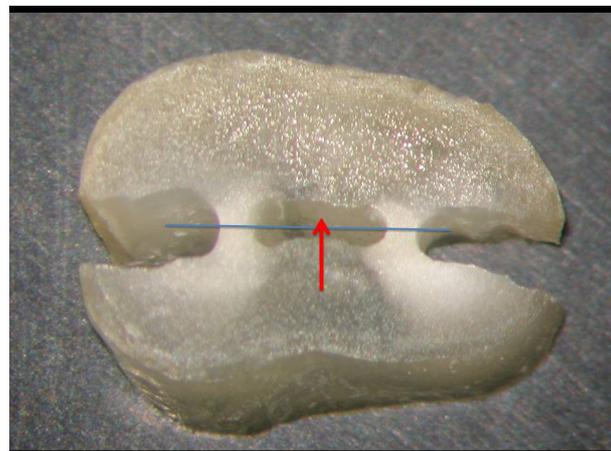


Abb. 13

Vorbereitung des Bruchpräparates aus der mesiobukkalen Wurzel mit Sollbruchstellen, roter Pfeil markiert Untersuchungsrichtung mit REM

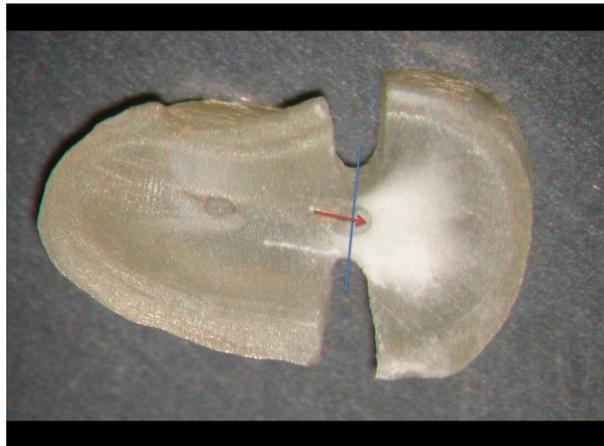


Abb. 14

Rasterelektronenmikroskop



Abb. 15

Gemeinsame Untersuchung der Präparate mit Dr. Richter, Universitätsklinikum Dresden



Abb. 16

Schliffpräparat Zahn 47 mit Darstellung des Wurzelkanalverlauf
Abdruck mit freundlicher Genehmigung
Dipl.-Stom. M. Arnold



Abb. 17

Transparenter erster unterer Molar mit farblich markierter Ausdehnung des Wurzelkanalsystems



Abb. 18

Zweidimensionale digitale Röntgenaufnahme in a) Rechtwinkeltechnik, b) mesialexzentrischer und c) distalexzentrischer Projektion



Abb. 19

Ausschnittvergrößerung zur Darstellung der apikalen Verzweigungen des Wurzelkanalsystems mit mehreren Foramen (Pfeile)

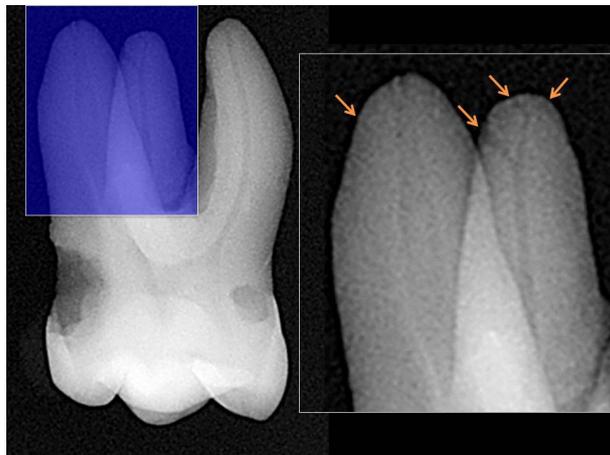


Abb. 20

Dreidimensional digital rekonstruierter Zahn 16 auf der Grundlage der Mikro-Computertomographie

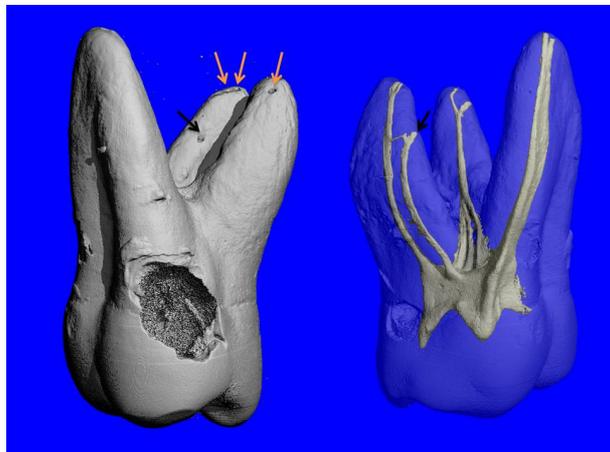


Abb. 21

Verschiedene ausgewählte
Rekonstruktionen zur Darstellung als
Video

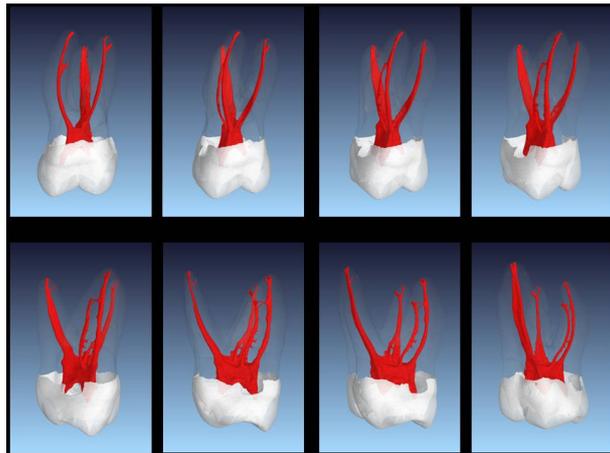


Abb. 22

Mikro-CT-Abbildung der palatinalen
Wurzel mit einem Hauptwurzelkanal und
mehreren zusätzlichen Hohlräumen

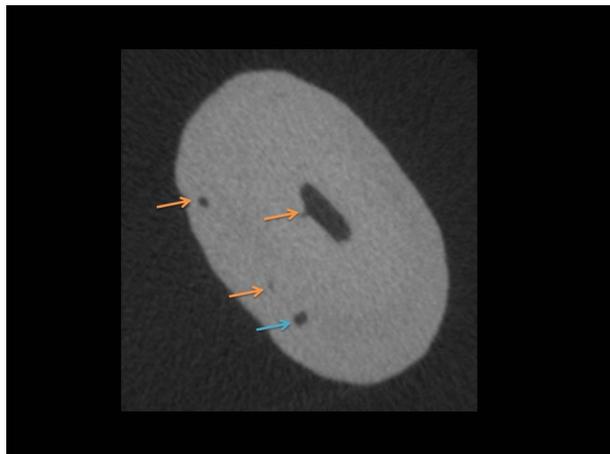


Abb. 23

Schnittebenen des MicroCT in der
Übersicht und als
Ausschnittvergrößerung mit erkennbaren
kleinsten Rissen und Wurzelkanälen

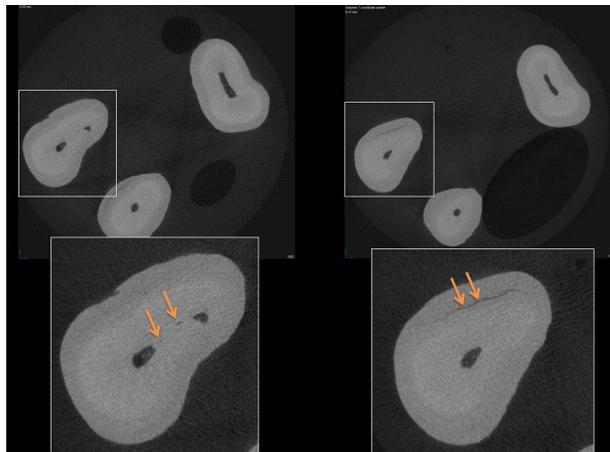


Abb. 24

a) Dreidimensionale Rekonstruktion der
Röntgendaten aus der dentalen digitalen
Volumentomographie (DVT)
b) Schnittbild mit erkennbaren
demineralisierten Zonen bis zur
Pulpakammer

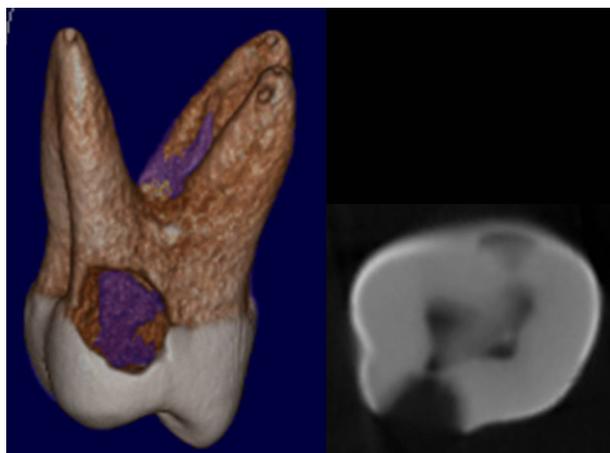


Abb. 25

Ausgewählte Schnittbilder aus dem Datensatz der DVT von koronal nach apikal

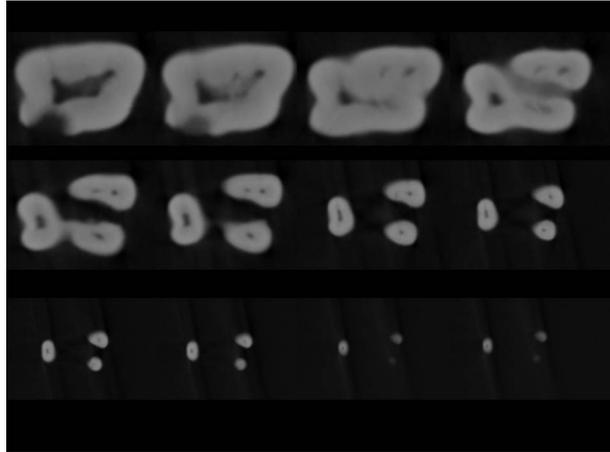


Abb. 26

Vergrößerte Sicht mit Dentalmikroskop der Wurzelkanaleingänge MB 1 und 2

a) Ausgang

b) nach vertiefender Präparation

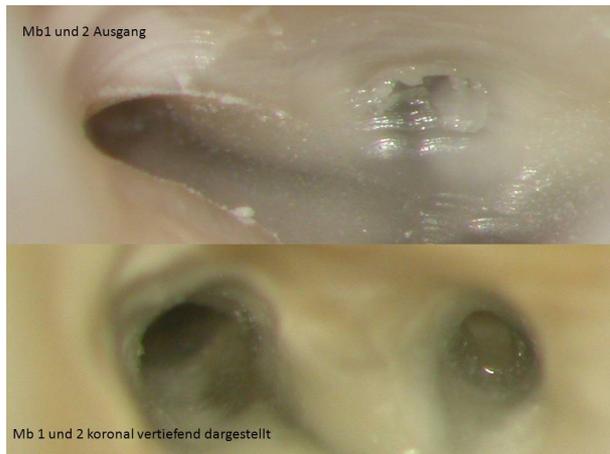


Abb. 27

Vergrößerte Sicht mit Dentalmikroskop der Wurzelkanaleingänge DB 1-3

a) Ausgang

b) nach vertiefender Präparation

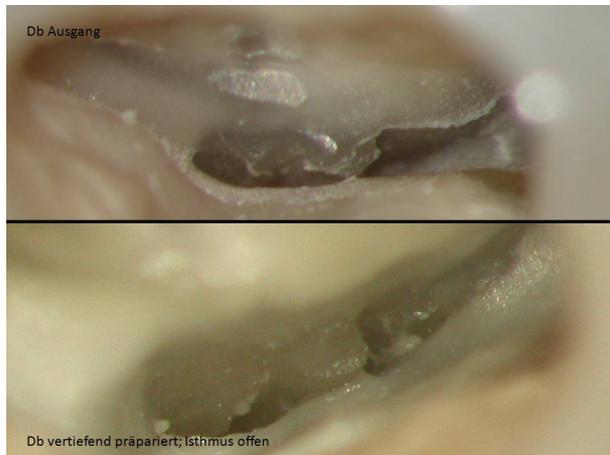


Abb. 28

Vergrößerte Sicht mit Dentalmikroskop des palatinalen Wurzelkanaleingangs



Abb. 29

a) Darstellung der aufgefundenen Wurzelkanäle in der mesiobukkalen Wurzel

b) vergrößerte Sicht auf scheinbar zu kurzen Wurzelkanal MB 2 (Pfeil)

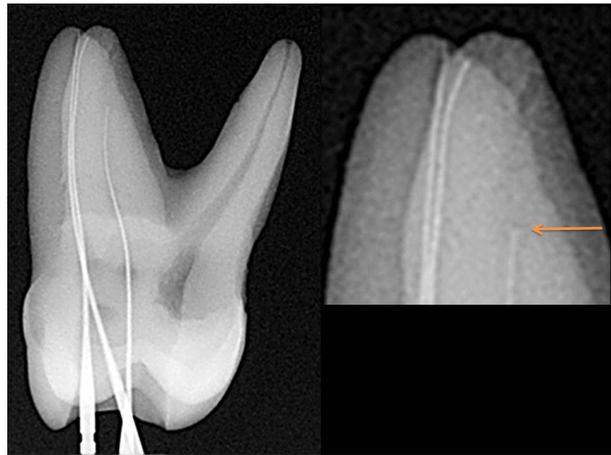


Abb. 30

a) Darstellung der aufgefundenen Wurzelkanäle in der distobukkalen Wurzel

b) vergrößerte Sicht auf den nicht erfassten Abzweig an der Wurzelspitze



Abb. 31

Schliffpräparat 1, Übersicht, 8x



Abb. 32

Schliffpräparat 1, vergrößerte
Darstellung distobukkaler Wurzelkanal
und ein zusätzlicher Wurzelkanal (Pfeil),
25x

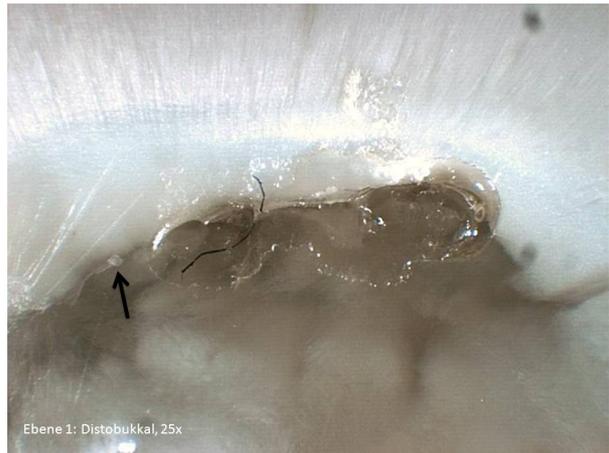


Abb. 33

Schliffpräparat 1, vergrößerte
Darstellung mesiobukkale Wurzelkanäle
mit einem zusätzlichen Wurzelkanal
(Pfeil), 25x



Abb. 34

Vergrößerte Darstellung des zusätzlichen
Wurzelkanals, 80x



Abb. 35

Schliffpräparat 1, vergrößerte
Darstellung palatinaler Wurzelkanal mit
einem zusätzlichen Wurzelkanal (Pfeil),
25x



Abb. 36

Schliffpräparat 2, Übersicht, 8x



Abb. 37

Schliffpräparat 2, vergrößerte Darstellung distobukkal, 20x



Abb. 38

Schliffpräparat 2, vergrößerte Darstellung distobukkal mit verschiedenen Rissen parallel und senkrecht zum Wurzelkanal (Pfeil), 50x



Abb. 39

Schliffpräparat 2, mesiobukkale Wurzel mit verschiedenen Dentinrissen und Wurzelkanälen, 16x



Abb. 40

Schliffpräparat 2, vergrößerte
Darstellung mesiobukkale Wurzel mit
verschiedenen Dentinrissen und
Wurzelkanal MB 2, 50x



Abb. 41

Schliffpräparat 2, palatinale Wurzel, 16x



Abb. 42

Schliffpräparat 3, Übersicht, 8x



Abb. 43

Schliffpräparat 3, distobukkale Wurzel,
20x



Abb. 44

Schliffpräparat 3, mesiobukkale Wurzel,
20x



Abb. 45

Schliffpräparat 3, palatinale Wurzel, 20x



Abb. 46

Schliffpräparat 4, Übersicht, 8x



Abb. 47

Schliffpräparat 4, distobukkale Wurzel,
25x



Abb. 48

Schliffpräparat 4, mesiobukkale Wurzel
mit MB 1 und weichgewebiger
Einlagerung, 25



Abb. 49

Schliffpräparat 4, vergrößerte Darstellung
mesiobukkale Wurzel mit MB 1 (Pfeil)
und MB 2



Abb. 50

Schliffpräparat 4, palatinale Wurzel, 20x



Abb. 51

Schliffpräparat 5, Übersicht, 8x



Abb. 52

Schliffpräparat 5, distobukkal mit zwei Wurzelkanälen und Weichgewebe (Pfeil), 32x



Abb. 53

Schliffpräparat 5, mesiobukkal mit einem Wurzelkanal, 32x



Abb. 54

Schliffpräparat 5, palatinale Wurzel mit zusätzlichem Wurzelkanal (Pfeil), 32x



Abb. 55

Schematische Darstellung der Entnahme der Dentinproben für die REM-Untersuchung

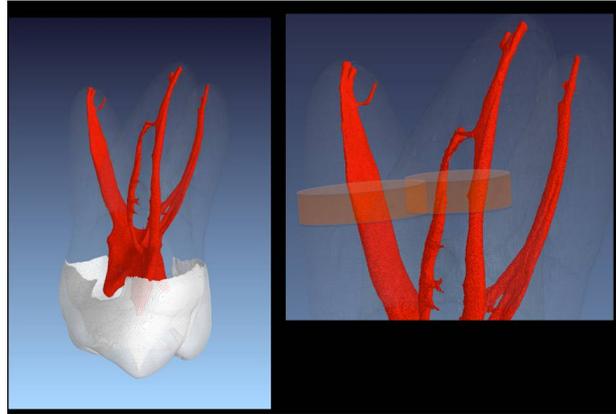


Abb. 56

REM-Ansicht auf palatinale Wurzelkanalwand, 500x

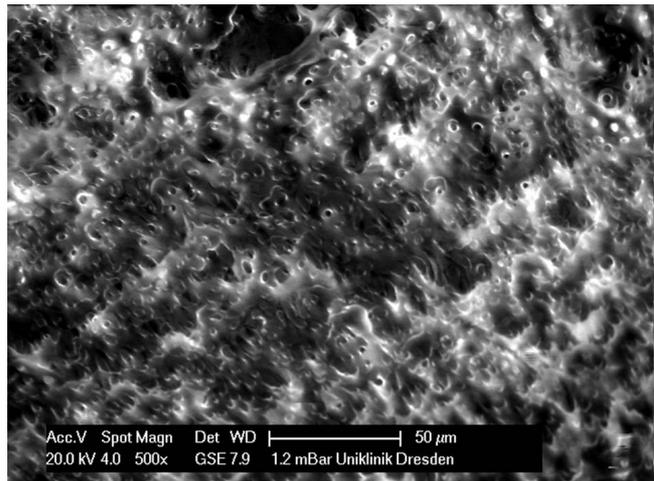


Abb. 57

REM-Ansicht auf palatinale Wurzelkanalwand, Dentin erscheint durch Einwirkung der Zitronensäure erosiv verändert, Dentintubuli unregelmäßig, 1200x

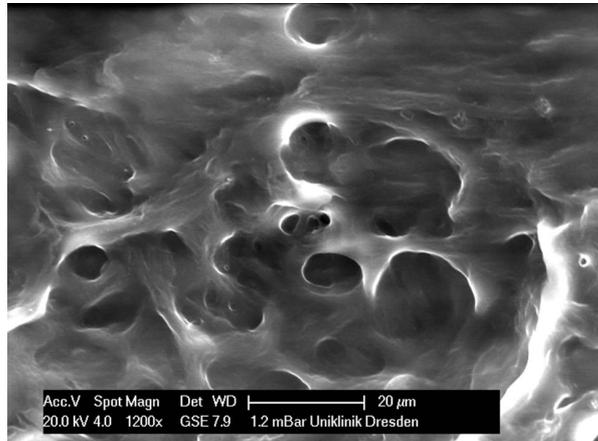


Abb. 58

REM-Ansicht der mesiobukkalen Dentinprobe mit Sicht in Richtung Isthmus, Einlagerungen im Wurzelkanal, 50x

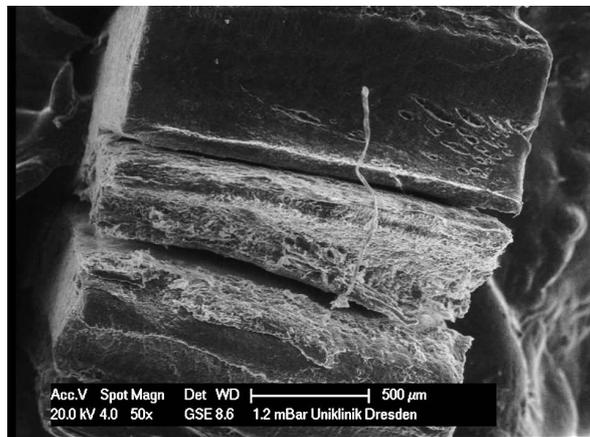


Abb. 59

Vergleichende Darstellung der
Schliffebene 2

- a) Dentalmikroskop mit Xenonlicht
- b) Dentalmikroskop mit UV-Licht
- c) Lichtmikroskop mit Ringlicht
- d) Vergleich MikroCT

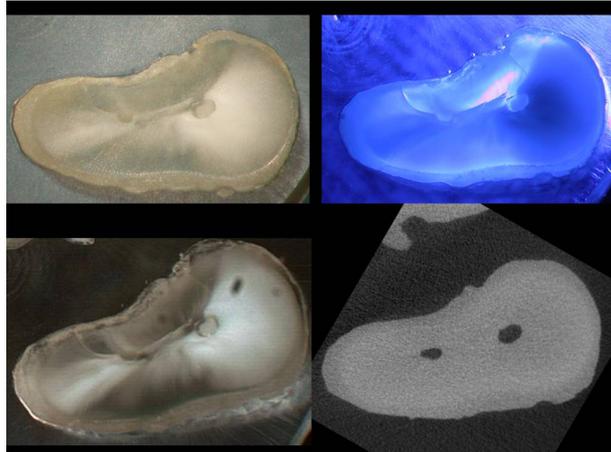


Abb. 60

Vergleichende Darstellung der
Schliffebene 3

- a) Dentalmikroskop mit Xenonlicht
 - b) Dentalmikroskop mit UV-Licht
 - c) Lichtmikroskop mit Ringlicht
 - d) Vergleich MikroCT
- Weichgewebe (Pfeil)

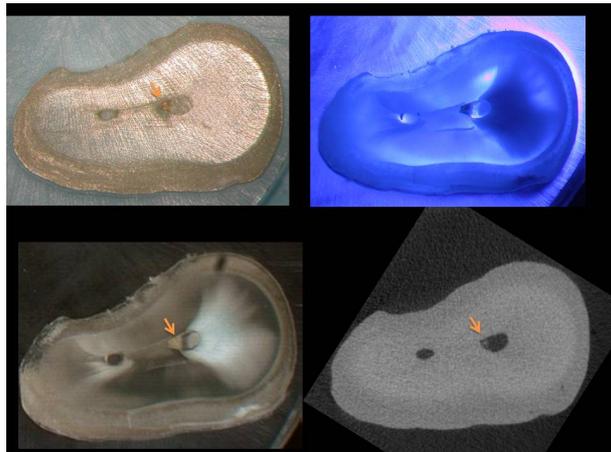


Abb. 61

Vergleichende Darstellung der
Schliffebene 3

- a) Dentalmikroskop mit Xenonlicht
 - b) Dentalmikroskop mit UV-Licht
 - c) Lichtmikroskop mit Ringlicht
 - d) Vergleich MikroCT
- Weichgewebe (gelber Pfeil) Riss an
Zementgrenze (schwarzer Pfeil)

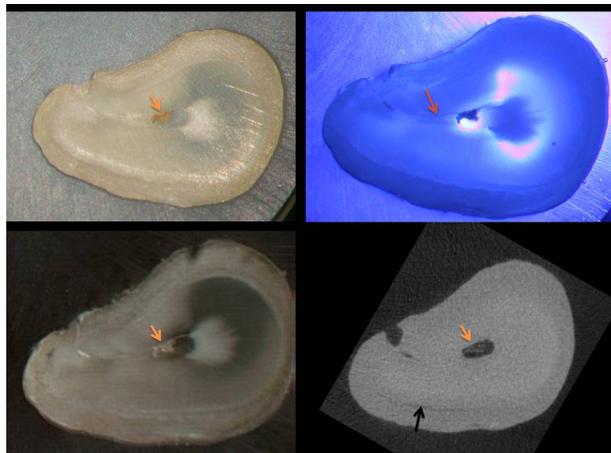
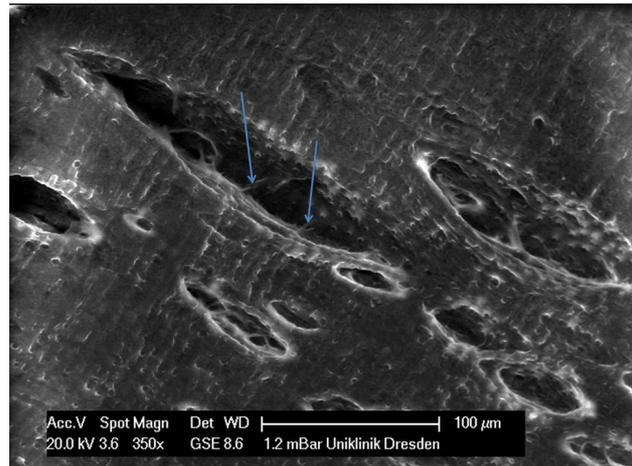


Abb. 62

REM-Aufnahme Bruchfläche
mesiobukkale Wurzel, Dentinrisse mit in
der Tiefe erkennbaren Dentinkanälen und
Odontoblastenfortsätzen (Pfeile), 350x



7. Literaturquellenverzeichnis

ANGMAR B, CARLSTROM D, GLAS JE. Studies on the ultrastructure of dental enamel. IV. The mineralization of normal human enamel. *J Ultrastruct Res.* 1963 Feb;8:12-23.

Barker BC, Lockett BC, Parsons KC. The demonstration of root canal anatomy. *Aust Dent J.* 1969 Feb;14(1):37-41.

Barrett JF, Keat N. Artifacts in CT: recognition and avoidance. *Radiographics* 2004;24:1679-1691.

Barrett MT. The internal anatomy of the teeth with special reference to the pulp and its branches. *Dent Cosmos* 67, 581 (1925)

Baumann MA, Gross D, Lehmann V, Zick K. [Magnetic resonance microscopy--new prospects for endodontics]. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 1993;103(11):1407-14.

Baumann MA, Schwebel T, Kriete A. Dental anatomy portrayed with microscopic volume investigations. *Comput Med Imaging Graph.* 1993 May-Jun;17(3):221-8.

Black, GV. Descriptive anatomy of the human teeth. 4th edition, Philadelphia: S.S. White Dental Manufacturing Company, 1902

Carabelli, G. Systematisches Handbuch der Zahnheilkunde. Erster Band, Wien: Braumüller & Seidel, 1844

Davis SR, Brayton SM, Goldman M. The morphology of the prepared root canal: a study utilizing injectable silicone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1972 Oct;34(4):642-8.

Djerassi I. Die Verästelung des apikalen Wurzelkanals nebst Folgerungen, die sich daraus ergeben. *Verteljahresschr Zahnheilk* 38, 297. 1922

Dowker SE, Davis GR, Elliott JC. X-ray microtomography: nondestructive three-dimensional imaging for in vitro endodontic studies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1997 Apr;83(4):510-6.

Feiler, E. Korrosionspräparate und Wurzelbehandlung *Dtsch Mschr Zahnheilk* 29, 742. 1911

Fischer G. Über die feinere Anatomie der Wurzelkanäle menschlicher Zähne. *Dtsch Mschr Zahnheilkunde* 25, 544. 1907

- Flegler S, Heckman J, Klomparens K. Elektronenmikroskopie: Grundlagen – Methoden – Anwendungen, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin und Oxford. 1995
- Goldman M, Pearson AH, Darzenta N. Endodontic success – who’s reading the radiograph? Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1972;33:432-437.
- Goldman M, Pearson AH, Darzenta N. Reliability of radiographic interpretations. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1974;38:287-293.
- Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Testarelli L, D'Ambrosio F, Pecci R, Bedini R. Present and future in the use of micro-CT scanner 3D analysis for the study of dental and root canal morphology. Ann Ist Super Sanita. 2012;48(1):26-34.
- Grover C, Shetty N. Methods to study root canal morphology: A review. ENDO 2012 6:171-182.
- Hess, W. Zur Anatomie der Wurzelkanäle des menschlichen Gebisses mit Berücksichtigung der feineren Verzweigungen am Foramen apicale. Habilitationsschrift, Zürich: 1917
- JOE Editorial Board. Root canal anatomy: an online study guide. J Endod. 2008;34(5 Suppl):e7-e16.
- Kishi Y, Kai K, Toris H, Tsumuraya Y, Takahashi K. Vascular architecture of the pulp in human teeth using resin cast examined under SEM. Shika Kiso Igakkai Zasshi. 1989 Feb;31(1):112-4.
- Klimm, W. Endodontologie: Grundlagen und Praxis. 1. Auflage. Dresden, Leipzig: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2003
- Klimm, W. Endodontologie: Lehrbuch für Studium und Beruf. 2. Auflage. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2011
- Koch, SW. Versuche zu Reifungs- und Mineralisationsvorgängen mit anorganischen und organischen Kalziumphosphat-Lösungen an Zahnhartgeweben, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Zahnmedizin: 2003
- Koenigs JF, Brilliant JD, Foreman DW. Preliminary scanning electron microscope investigations of accessory foramina in the furcation areas of human molar teeth. Oral Surg Oral Med Oral Pathol: 1974 Nov; 38(5):773-82
- Kottoor J, Velmurugan N, Sudha R, Hemamalathi S. Maxillary first molar with seven root canals diagnosed with cone-beam computed tomography scanning: a case report. J Endod 2010;36:915-921.

Krause, R. Über die Herstellung durchsichtiger Präparate. Anat Anz (Ergänzungsband) 34, 133: 1909

Lee JH, Kim KD, Lee JK et al. Mesio Buccal root canal anatomy of Korean maxillary first and second molars by cone-beam computed tomography. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2011;111:785-791.

Lenhossek von M. Makroskopische Anatomie zur genaueren Kenntnis der Wurzelkanäle. In: Scheff J: Handbuch der Zahnheilkunde. Hölder-Pichler-Tempsky A.-G., Wien G. Freitag GmbH, Leipzig: 1922

Loos, R. Topographie der Pulpahöhle mit Rücksicht auf die Präparation der Kavität. I Die Topographie der Pulpahöhle. Vjschr Zahnheilk 25, 40; Österr.-Ungar: 1909

Matherne RP, Angelopoulos C, Kulild JC, Tira D. Use of cone-beam computed tomography to identify root canal systems in vitro. J Endod 2008;34:87-89.

Metzger Z, Teperovich E, Cohen R, Zary R, Paqué F, Hülsmann M. The self-adjusting file (SAF). Part 3: removal of debris and smear layer-A scanning electron microscope study. J Endod. 2010 Apr;36(4):697-702.

Moral, H. Über Pulpenausgüsse. Dtsch Mschr Zahnheilk 32, 617: 1914

Mouyen, F. Apparatus for providing a dental radiographic image and intraoral sensor used therewith. US Patent 4593400: 1986 Jun 3

Mouyen F, Benz C, Sonnabend E, Lodter JP. Presentation and physical evaluation of RadioVisioGraphy. Oral Surg Oral Med Oral Pathol; 68(2):238-42: 1989 Aug

Mozzo P, Procacci C, Tacconi A. A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. Eur Radiol 1998;8:1558-1564.

Mueller, AH. Anatomy of the root canals of the incisors, cuspids and bicuspid of the permanent teeth. J Am Dent Assoc 20, 1361: 1933

Patel S, Dawood A, Whaites E, Pitt Ford T. New dimensions in endodontic imaging: part 1. Conventional and alternative radiographic systems. Int Endod J;42:447-462: 2009

Paqué F, Zehnder M, De-Deus G. Microtomography-based comparison of reciprocating single-file F2 ProTaper technique versus rotary full sequence. J Endod. 2011 Oct;37(10):1394-7.

Peters, O.A. & Laib, A. & Rügsegger, P. & Barbakow, F. Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res.* 2000 Jun;79(6):1405-9.

Pharaoah M, White SC. *Oral Radiology: Principles and Interpretation.* ed 6. St. Louis, MO: Mosby: 2009

Preiswerk, G. Die Pulpa-Amputation, eine klinische, pathohistologische und bakteriologische Studie. *Öserr.-Ung Vjschr Zahnheilk* 17, 145: 1901

Rathi S, Patil J, Jaju PP. Detection of Mesiobuccal Canal in Maxillary Molars and Distolingual Canal in Mandibular Molars by Dental CT: A Retrospective Study of 100 Cases. *Int J Dent.* 2010;2010:291276.

Rödig T, Döllmann S, Konietschke F, Drebenstedt S, Hülsmann M. Effectiveness of different irrigant agitation techniques on debris and smear layer removal in curved root canals: a scanning electron microscopy study. *J Endod.* 2010 Dec;36(12):1983-7.

Röntgen, W.C. Ueber eine neue Art von Strahlen. Würzburg: Physik.- medic. Gesellschaft: 1895.

Rottenbiller, E. Zur Frage der Wurzelkanalramifikationen. *Österr.-Ung. Vjschr Zahnheilk* 34, 12: 1918

Saunders, RL. X-ray microscopy of the periodontal and dental pulp vessels in the monkey and in man. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1966 Oct;22(4):503-18.

SAUNDERS RL. X-ray microscopy of human dental pulp vessels. *Nature.* 1957 Dec 14;180(4598):1353-4.

Schulze R, Haßfeld S, Schulze D et al. Dentale Volumentomographie (DVT) – S1-Empfehlung. *Dtsch Zahnärztl Z* 2009;64:490-496.

Skidmore AE, Bjorndahl AM. Root canal morphology of the human first molar. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1971 Nov;32(5):778-84

Skillen, WG. Morphology of root canals. *J Am Dent Assoc* 19, 719: 1932

Tachibana H, Matsumoto K. Applicability of X-ray computerized tomography in endodontics. *Endod Dent Traumatol.* 1990 Feb;6(1):16-20.

Takahashi, K. Vascular architecture of dog pulp using corrosion resin cast examined under a scanning electron microscope. *J Dent Res.* 1985 Apr;64 Spec

No:579-84.

Tam A, Yu DC. Location of canal isthmus and accessory canals in the mesiobuccal root of maxillary first permanent molars. J Can Dent Assoc.: 2002 Jan;68(1):28-33.

Türkheim, H. Die Verästelungen des apikalen Wurzelkanals. Vjschr Zahnheilk 39, 92: 1923

Wakkerman HL, Thé GS, Spanauf AJ. Plastic replicas as three-dimensional models of pulps. J Dent Educ.: 1975 Aug;39(8):544-6.

Walton, RE. Endodontic radiographic techniques. Dent Radiogr Photogr 1973; 46: 51-59.

8. Internetquellenverzeichnis

<http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/784/pdf/Doktorarbeit.pdf>, S. 9/10

<http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/784/pdf/Doktorarbeit.pdf>, S. 9/10

http://edoc.ub.uni-muenchen.de/4766/1/Mueller-Stahl_Florian.pdf, S.18

<http://de.wikipedia.org/wiki/Computertomographie>; zugegriffen am 16.12.2012

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/CMOS-Sensor-CMOS-sensor.html>; zugegriffen am 16.12.2012

<http://www.gesund-durch.de/mrt-strahlenfreie-bilder-aus-dem-koerperinneren/>; zugegriffen am 02.11.2012

<http://www.dresden-zahnarzt.de/zahnarzt-leistungen/dentale-volumetomographie.php>, zugegriffen am 19.12.2012

<http://www.gesundheit.de/medizin/untersuchungen/untersuchungsmethoden/magnetresonanztomographie-vor-und-nachteile>, zugegriffen am 19.12.2012

9. Danksagung

Bei der Bearbeitung dieses Themas durfte ich, wie schon zuvor bei der Erarbeitung der Studienarbeit die umfangreiche Fachliteratur von Dipl.-Stom. Michael Arnold nutzen. Dadurch erhielt ich erste tiefergehende Einblicke in die Historie und Gegenwart der anatomischen Forschung. Weiterhin stand er mir als Zahnarzt während des Prozesses der Umsetzung stets beratend zur Seite und half mir bei der Umsetzung der praktischen Arbeiten.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Dr. Frank Paqué aus der Universität Zürich für die Bereitstellung des Zahnes mit besonderer Anatomie und die Bereitstellung der elektronischen Daten der Mikro-Computertomographie.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Dr. Gert Richter aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde aus der Universitätsklinik Dresden bedanken. Er sorgte für den unkomplizierten, schnellen und hilfreichen Zugang zum ESEM und weitere technische Arbeitsmöglichkeiten.

Mein Dank gilt ebenso Dr. Holm Reuver, Zahnarzt aus Neustadt an der Weinstraße, für die freundliche Bereitstellung des transparenten Präparates in Abbildung 17.

Darüber hinaus möchte ich bei meiner Begleitlehrerin Frau Kahrs bedanken für ihre freundliche Betreuung der besonderen Lernleistung.

9. Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die besondere Lernleistung ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literatur- und Quellenverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

01445 Radebeul

Datum: 15.12.2012

Name: Paula Arnold