

Aus der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde,
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Prof. Dr. M. Hannig

**Analyse von Mikrofrakturen von Unterkieferinzisiven
bei handinstrumenteller und maschineller
Wurzelkanalaufbereitung**

Dissertation zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Zahnheilkunde der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2018

vorgelegt von:

Pelin Lale Acanal-Lozankovski
geb. am:17.12.1982 in Hannover

Tag der Promotion:

Dekan: Prof. Dr. M.D. Menger

1. Berichterstatter: Prof. Dr. S. Rupf

2. Berichterstatter:

Für mein Vater Dr. rer. nat. Hüseyin Miktat Acanal

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	1
1.1 Deutsche Zusammenfassung	1
1.2 Englisch Summary	3
2 Einleitung und Problemdarstellung	4
3 Literaturübersicht	11
3.1 Anforderungen an die Wurzelkanalaufbereitung	11
3.2 Das Instrumentarium.....	12
3.3 Wurzelkanalaufbereitungstechniken	14
3.3.1 Manuelle Wurzelkanalaufbereitungstechniken.....	14
3.3.2 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitungstechniken:	16
3.4 Literaturübersicht zur Frakturbildung im Dentin durch Wurzelkanalaufbereitung	21
3.4.1 Methoden zur Darstellung von Mikrofrakturen	24
3.5 Fragestellung	25
4 Material und Methode	26
4.1 Vorversuchsreihe	26
4.2 Probenmaterial.....	26
4.3 Wurzelkanalaufbereitung und Vorbereitung für die Frakturanalyse.....	27
4.4 Analyse der Frakturbildung	31
4.4.1 Lichtmikroskopische Frakturanalyse:	31
4.4.2 Frakturanalyse durch Mikro CT	33
4.5 Statistische Auswertung.....	33
5 Ergebnisse	34
5.1 Ergebnisse der Vorversuchsreihe.....	34
5.2 Die lichtmikroskopische Untersuchung	35
5.2.1 Anzahl der Mikrofrakturen	37
5.2.2 Gesamtfrakturenlänge.....	39
5.2.3 Statistische Auswertung	43
5.3 Mikro CT Untersuchung:	44
6 Diskussion	48
6.1 Die Schlussfolgerungen aus der Vorversuchsreihe	48
6.2 Kritische Betrachtung der eigenen Untersuchung	48
6.3 Prüfung der Hypothesen und Vergleich der lichtmikroskopischen Ergebnisse mit der Literatur	54

6.4 Mikro CT Untersuchung	60
7 Klinische Schlussfolgerungen	62
Literaturverzeichnis	65
Anhang.....	77
Abbildungsverzeichnis.....	92
Tabellenverzeichnis	96
Danksagung.....	97

1 Zusammenfassung

1.1 Deutsche Zusammenfassung

Problemstellung und Zielsetzung

Die Ursachen des Misserfolgs einer endodontischen Behandlung sind nicht immer klar erkennbar. Eine der häufigen Ursachen ist die vertikale Wurzelfraktur (vertikal root fracture: VRF). Nach der Diagnose einer VRF ist der Zahnerhalt, mit sehr wenigen Ausnahmen, nicht möglich. Aus welchen Gründen es zu einer VRF kommt und wie man sie vermeiden kann, ist im Einzelfall häufig unbekannt. Die durch Wurzelkanalaufbereitung induzierten Mikrofrakturen im Wurzelkambium stehen im Verdacht, die ersten Prädilektionsstellen für eine spätere VRF zu setzen. Die Zielsetzung in der vorliegenden Studie war daher der Vergleich von vier verschiedenen Aufbereitungstechniken in Bezug auf die Mikrofrakturbildung im Wurzelkambium bei der Wurzelkanalaufbereitung.

Material und Methode

80 humane Unterkieferinzisivi mit abgeschlossenem Wurzelwachstum und ausschließlich makroskopisch sichtbaren apikalen Foramen wurden auf fünf Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe war die unaufbereitete Kontrollgruppe (Gruppe U). Von den übrigen Unterkieferinzisivi wurden die Kronen entfernt und die Wurzelkanäle mit Handinstrumenten (Gruppe H), einem permanent rotierenden System (Komet F6 Sky Taper, Gruppe K), einem alternierend arbeitendem System (Reciproc, Gruppe R) und einem weiteren alternierend arbeitendem System mit plastisch verformbaren Instrumenten (Reciproc Blue, Gruppe B) nach Herstellerangaben aufbereitet. Die Proben wurden während der Aufbereitung in feuchte Gaze eingewickelt und in der Hand fixiert. Es wurden pro Wurzel 2ml 17%ige EDTA-, 5%ige NaOCl- Lösung und 15%iges EDTA Gel als Spülflüssigkeiten und Gleitmittel verwendet. Nach der Aufbereitung wurden die Proben in der Längsrichtung bis zum Wurzelkanal aufgeschliffen und mit Methylenblau eingefärbt. Danach wurde jede Probe unter einem 3D Lichtmikroskop (VHX 5000, Keyence, Japan) unter 200-facher Vergrößerung aufgenommen und auf Frakturen analysiert. Sowohl die Anzahl der Frakturen, als auch die Gesamtfrakturenlänge wurden pro Probe dokumentiert. Die statistische Auswertung wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Vier Proben wurden zusätzlich vergleichend im Mikro CT untersucht.

Ergebnisse

Alle untersuchten Wurzelkanalaufbereitungsmethoden verursachten Dentindefekte. Die Gesamtfrakturlänge war bei der Aufbereitung mit dem permanent rotierenden System signifikant höher als bei der Aufbereitung mit Handinstrumenten ($p=0,0455$). Im Vergleich der maschinellen Systeme verursachten die alternierend arbeitenden plastisch verformbaren Instrumente sowohl bei der Frakturanzahl als auch bei der Gesamtfrakturlänge signifikant weniger Defekte als das permanent rotierende System ($p=0,0016$ und $p=0,0024$).

Schlussfolgerung

Es sollte der Schwerpunkt vor allem auf die Weiterentwicklung schonender endodontischer Methoden für die Wurzelkanalaufbereitung gelegt werden, um Dentinfrakturen durch therapeutische Eingriffe zu vermeiden.

1.2 Englisch Summary

Aim of the study

The reasons of failure in endodontics are not always easy to identify. One of the frequent reasons is the vertical root fracture (VRF). After the diagnosis of a VRF – with some very few exceptions - the preservation of the tooth is impossible. The unanswered question in this context is, how is a VRF caused and how can this situation be avoided. The microfractures set during the root canal preparation are suspected to later on lead to a VRF. Therefore, the aim of this study is the comparison of different root canal preparation techniques in relation to the microcrack formation in the root dentin after root canal preparation.

Methods

80 human mandibular incisivi with terminated root growth and with only one apical foramen were divided into five groups. One group was the unprepared control group (group U). The other teeth were decapitated and root canals were prepared with manual files (group H), with a full rotating system (Komet F6 sky taper (group K)), with an alternating system (reciproc (group R)) and with another alternating System with plasticly deformable Files (reciproc blue (group B)) following the manufacturers' recommendations. During preparation, the roots were held in the hand and wrapped with a gauze tissue. For each root we used 2ml of 17% EDTA- and 5% NaOCl-solution, and 15% EDTA Gel for Irrigation and Instrumentfracture prophylaxis. After preparation, the samples were separated longitudinally until the root canal was shown and stained with methylenblue. After that, every sample was examined under a three-dimensional light microscope (VHX 5000, Keyence, Japan) with a magnification of 200. The number of fractures and the total length of fracture per sample was documented. The statistics were made with Mann-Whitney-U-tests. Four samples underwent an additional comparative micro CT examination.

Results

All the used root canal preparation techniques caused dentin defects. The total fracture length was slightly higher with the fully rotating system Komet F6 sky taper than with manual instrumentation ($p=0,0455$). In the comparison of the mechanical preparation systems the alternating plasticly deformable Instruments caused significantly less dentin defects than the fully rotating system (in both categories number of fractures and total fracture length). ($p=0,0016$ and $0,0024$).

Conclusion

The further development in endodontology should have the focus on avoiding crack formations in dentin induced by the root canal treatment.

2 Einleitung und Problemdarstellung

Die Wurzelkanalbehandlung ist bei Vorliegen einer Pulpanekrose oder einer infizierten Pulpa die einzige Methode, den betroffenen Zahn langfristig zu erhalten. Nach einer korrekt ausgeführten, erfolgreichen Wurzelkanalbehandlung bewahrt ein Zahn seine Funktion als Teil des Kauapparates, erhält den Alveolarknochen und verhindert eine Positionsänderung der Nachbarzähne und die Elongation des Antagonisten (Hellwig, 2013).

Die Aufbereitungslänge sollte bis zur apikalen Konstriktion des Wurzelkanals reichen. Diese befindet sich 0,5 – 2 mm entfernt vom anatomischen Apex. In dieser Region muss eine Wurzelkanalfüllung enden, um ein Überpressen des Wurzelfüllmaterials in die periapikale Region zu vermeiden und die Kontaktzone zwischen Füllmaterial und Desmodont so klein wie möglich zu halten (Wu et al., 2000).

Aufgrund der Variabilität und Komplexität der Wurzelkanalanatomie und der Wurzelkanalsysteme stellt die Wurzelkanalbehandlung eine Herausforderung dar. Das Ziel der Wurzelkanalaufbereitung ist, das Endodont so weit wie möglich von Mikroorganismen zu befreien und dicht gegen eine Reinfektion zu verschließen (Löst, 2006). Das Wurzelkanalsystem besteht nicht nur aus Hauptkanälen, sondern auch aus von diesen ausgehenden, kleinen, instrumentell nicht erreichbaren Seitenkanälchen. Nicht selten gibt es horizontale Verbindungen zwischen den Hauptkanälen, es fusionieren separate Wurzelkanäle oder zwei oder mehrere Kanäle gehen apikal vom Hauptkanal als apikales Delta ab (siehe Abbildung 1).

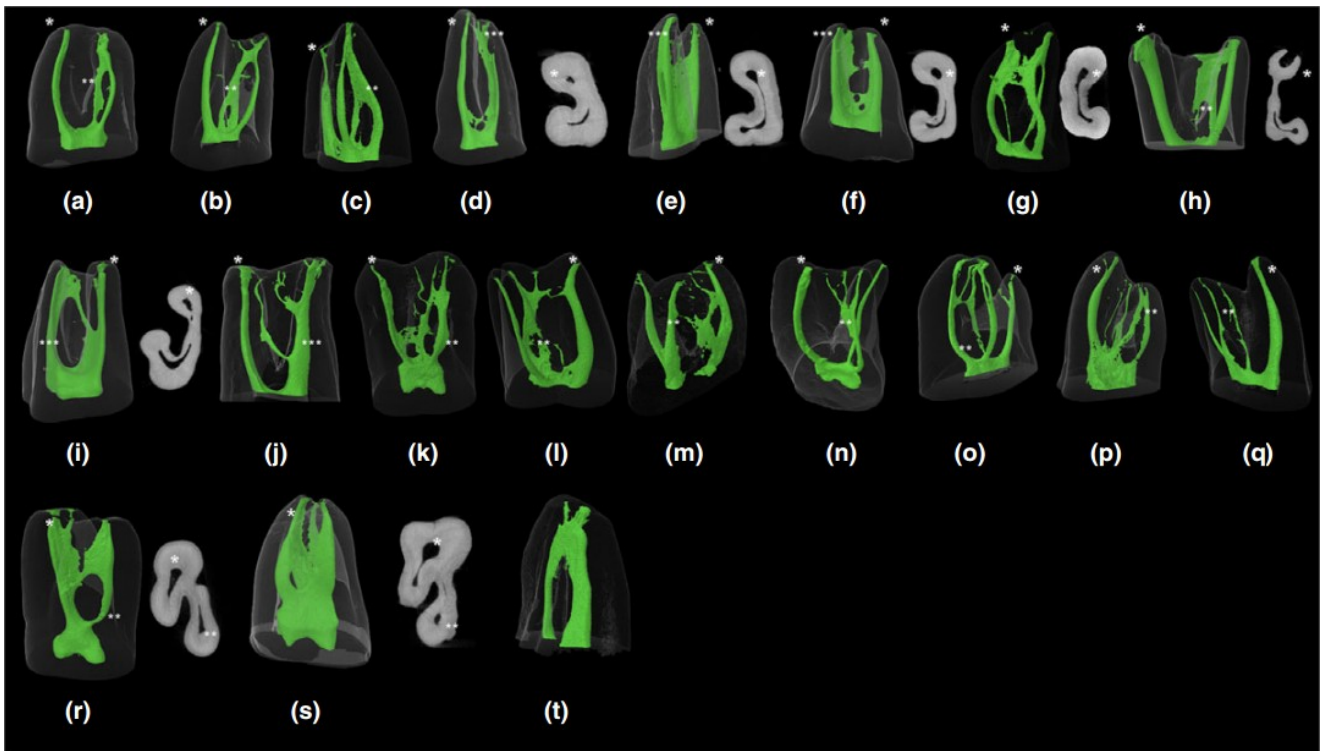


Abbildung 1: Dreidimensionale Mikro CT Rekonstruktionen (mit einer Auflösung von 19,2 μm) von Wurzelkanalformationen eines zweiten Oberkiefermolaren. Dargestellt sind repräsentative Aufnahmen von fusionierenden Wurzelkanälen (a-t), im Querschnitt c-förmige Wurzelkanäle (d-i), buccale Kanäle, die in separate Foramina münden, aber Verbindung zum palatinalen Kanal besitzen (k-m), und komplett separate buccale Kanäle (n-q) (Ordinola-Zapata et al., 2017) (copyright 2018, mit Genehmigung von John Wiley and sons, s. Anhang)

Die Erweiterung und Formgebung des Wurzelkanallumens entfernt nicht nur Mikroorganismen aus dem Wurzelkanal, sondern erhöht vor allem die desinfizierende Wirkung von Spüllösungen in mechanisch nicht oder nur bedingt zugänglichen Bereichen und ermöglicht damit erst die weitgehende apikale und koronale Obturation des Wurzelkanalsystems (Peters, 2004; Schilder, 1974). Somit spielt die mechanische Aufbereitung der Wurzelkanäle eine entscheidende Rolle für den Therapiererfolg. Die Desinfektion des Kanalsystems im apikalen Bereich ist besonders wichtig, da dieser insbesondere bei gekrümmter Kanal Anatomie schwer zu erreichen ist und da bei infiziertem Kanalsystem die Bakterien apikal kumulieren (Saunders und Saunders, 1997). Die von koronal nach apikal verjüngende konische Präparation dient dem besseren Zugang in den apikalen Abschnitt des Wurzelkanals (Kroncke, 1981). Dabei sollte die ursprüngliche Kanalgeometrie bzw. Kanalkrümmung beibehalten werden, um die Stabilität der Wurzel nicht zu beeinträchtigen (Schilder, 1974). Je konischer die Kanalpräparation durchgeführt wird, desto mehr wird die Wurzel im koronalen Kanalabschnitt geschwächt. Dies erhöht das Risiko horizontaler und vertikaler Wurzelfrakturen (VRF) (Versluis et al., 2006; Wilcox et al., 1997).

Hinzu kommt die erhöhte Steifigkeit des Instrumentes bei höheren Konizitäten. So werden die Kanalanatomie verändert und die Erfolgsaussichten der Wurzelkanalbehandlung reduziert (Bishop and Dummer, 1997).

Traditionell erfolgte die Wurzelkanalaufbereitung hauptsächlich manuell-mechanisch mittels Edelstahlfeilen. Es wurden zahlreiche Techniken mit unterschiedlichen Feilenarten entwickelt, um den Wurzelkanal mechanisch und chemisch zu bearbeiten, ohne die Kanalanatomie zu verändern. Insbesondere bei gekrümmten Kanälen gab es dabei Schwierigkeiten, da Instrumente aus Edelstahl eine zu große Rückstellkraft (hohe Steifigkeit) besitzen und daher die Kanalanatomie verändern (Bishop and Dummer, 1997; Glossen et al., 1995). Dentinspäne, die bei der Aufbereitung entstehen, beinhalten Anteile von Pulpagewebe und Bakterien, welche grazile Kanalabschnitte blockieren können. Dies verhindert die effiziente Reinigung des apikalen Abschnitts und reduziert die Erfolgsaussichten der Endodontiebehandlung (Molven and Halse, 1988).

Die Einführung von Nickel-Titan-Instrumenten in die Endodontie durch Walia und Mitarbeiter im Jahre 1988 versprach höhere Erfolgsaussichten, vor allem bei gekrümmter Kanalanatomie (Walia et al., 1988). Die heutigen Nickel-Titan-Legierungen bestehen zu etwa 55 Massenprozent aus Nickel und zu 45 Massenprozent aus Titan (Thompson, 2000). Das Elastizitätsmodul dieser Legierung beträgt etwa ein Fünftel von dem der Edelstahllegierung (Walia et al., 1988). Auch das Biegemoment der Nickel-Titan-Legierung liegt unter dem der Edelstahllegierung. Dadurch erhält sie ihren pseudoelastischen Charakter. Bei Überschreiten der kritischen Spannungsgrenze tritt eine Umwandlung der Metallgitterstruktur von der Austenit-Phase (Hochtemperaturphase) in die Martensit-Phase (Niedrigtemperaturphase) auf und die Feile wird plastisch verformt (Thompson, 2000). Das heißt, trotz starker Dehnung kommt es nur zu einer geringfügig ansteigenden Spannung. Nach Unterschreiten der kritischen Spannungsgrenze geht die Legierung in die Austenit-Phase ohne Restdeformation zurück (Andreasen et al., 1985; Lee et al., 1988; Thompson, 2000). Die hohe Flexibilität, der so genannte „Memory Effekt“, und die reduzierte erhöhte zyklische Ermüdungsfestigkeit der Nickel-Titan-Instrumente lassen sich durch das pseudoelastische Verhalten erklären. Diese Eigenschaften ermöglichen im Vergleich zu Edelstahl-Instrumenten eine bessere Formgebung für gekrümmte Wurzelkanalverläufe, ohne die Kanalgeometrie grundlegend zu verändern (Chen and Messer, 2002; Glossen et al., 1995; Schäfer, 2002). Neuerdings gibt es außerdem Wurzelkanalfeilen aus einer Nickel-Titan-Legierung, die mit einem speziellen Verfahren hitzebehandelt werden und dadurch noch flexibler sind. Sie liegen bereits in der Martensit-Phase vor.

Im Gegensatz zur feilenden handinstrumentellen Aufbereitung können die Nickel-Titan-Instrumente sowohl permanent rotierend als auch alternierend eingesetzt werden. Allerdings haben mehrere Studien eine erhöhte Frakturanfälligkeit bei der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung gegenüber der manuellen Aufbereitung dokumentiert (Bergmans et al., 2001; Dietz et al., 2000; Pruett et al., 1997; Turpin et al., 2000). Es treten meist spontane Torsions- und Biegefrakturen auf, wobei letztere auf die zyklische Ermüdung des rotierenden Instruments zurückzuführen ist (Peters et al., 2003; Sattapan et al., 2000). Diese Materialermüdung ist die Folge eines ständigen Wechsels zwischen Kompressionsbelastung an der Innenseite und Dehnungsbelastung an der Außenseite der Kanalkrümmung, denen eine maschinell rotierende oder maschinell-alternierende Feile ausgesetzt wird. Dadurch durchläuft eine Feile sowohl einen Dehnungszyklus- als auch einen Kompressionszyklus (Bergmans et al., 2001; Haikel et al., 1999; Pruett et al., 1997). Das Auftreten der Biegefraktur hängt von dem Krümmungsradius des Wurzelkanals und dem Durchmesser des Wurzelkanalinstruments ab. Die Anzahl der Instrumentenfrakturen ist umso größer, je kleiner der Krümmungsradius des Wurzelkanals ist (Haikel et al., 1999; Pruett et al., 1997). Bei Wurzelkanalinstrumenten mit einem größeren Durchmesser wird die Biegefraktur häufiger beobachtet (Haikel et al., 1999). Des Weiteren hat sich gezeigt, dass Instrumente mit größerer Konizität (Taper) bei gleichbleibendem Instrumentendurchmesser frakturanfälliger in gekrümmten Kanalverläufen sind. Ursache ist die vergrößerte Oberfläche des Instrumentes am Ort der stärksten Krümmung (Beer, 2004).

Die Torsionsfraktur kommt bei einer plötzlich auftretenden Überbelastung vor. Dies tritt bei engeren Kanälen auf, wenn der apikale Teil des Wurzelkanalinstruments plötzlich klemmt (der sogenannte „Taper-Lock“ Effekt). Dabei steigt der Torquewert über die Torsionsgrenze und der Spitzenbereich der Feile frakturiert (Peters et al., 2003; Sattapan et al., 2000). Ob diese Frakturen auftreten, ist von der Erfahrung und der Sorgfalt des Behandlers abhängig. Durch die Verwendung eines drehmomentbegrenzten Endodontiemotors mit instrumentenspezifischen Einstellungen von Drehzahl und Drehmoment (Torque) können sie deutlich reduziert werden (Gambarini, 2000).

Die Entwicklung von drehmomentbegrenzten Endodontiemotoren ermöglichte zudem eine erhöhte Arbeitssicherheit durch eine Verringerung der Gefahr einer Instrumentenfraktur (Guelzow et al., 2005; Yin et al., 2010). Zur Kostenreduktion, Vereinfachung des Behandlungsablaufes und Vermeidung von Kreuzkontaminationen zwischen Patienten wurden in jüngster Zeit moderne Systeme entwickelt worden. Diese verfügen über Feilen, die nur einmal verwendbar sind und bei denen die gesamte Wurzelkanalaufbereitung mit einer

einzigsten Feile durchgeführt wird (Burklein et al., 2012; Paque et al., 2011). Pruett und Mitarbeiter empfehlen ebenfalls eine einmalige Verwendung der maschinellen Instrumente, um die Biegefrakturrate zu verringern (Pruett et al., 1997).

Während ursprünglich mehrere Feilen in einer Aufbereitungssequenz eingesetzt wurden, wird bei den Ein-Feilen-Systemen der gesamte Substanzabtrag während der Wurzelkanalaufbereitung mit einer Feile durchgeführt. Da bei diesem Aufbereitungsansatz eine schrittweise Erweiterung der Wurzelkanäle verlassen wird, kann daraus eine höhere Belastung für die Wurzelkanalwand resultieren, die wiederum zu Frakturen führen kann. Aus diesem Grund vergleicht die vorliegende Studie die klassische Handaufbereitung durch zahlreiche aufeinander abgestimmte Instrumenten mit drei aktuellen maschinellen Aufbereitungssystemen, einem permanent rotierenden Zwei-Feilen- und zwei alternierend arbeitenden Ein-Feilen-Systemen.

Neben den bereits erwähnten Vorteilen besitzt die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung auch ihre Schwachpunkte. Da die Instrumente vollständig oder teilweise rotieren, erreicht die Behandlung optimale Ergebnisse in Kanälen mit einem ursprünglich runden Querschnitt. Allerdings weisen nicht alle Zahnwurzeln einen runden Wurzelkanalquerschnitt auf. Durch die Aufbereitung eines ovalen oder C-förmigen Wurzelkanals mit einem rotierenden Instrument wird an einigen Stellen nicht genug, an anderen Stellen jedoch zu viel Material abgetragen. Dadurch ist die mechanische und chemische Reinigung nicht ausreichend und die Wurzel wird zusätzlich noch geschwächt. (siehe Abbildung 2) Nach Lang und Mitarbeiter führen bereits minimale Veränderungen der Wurzelkanalgeometrie zu einer signifikanten Destabilisierung der Zahnwurzel (Lang and Raab, 2005).

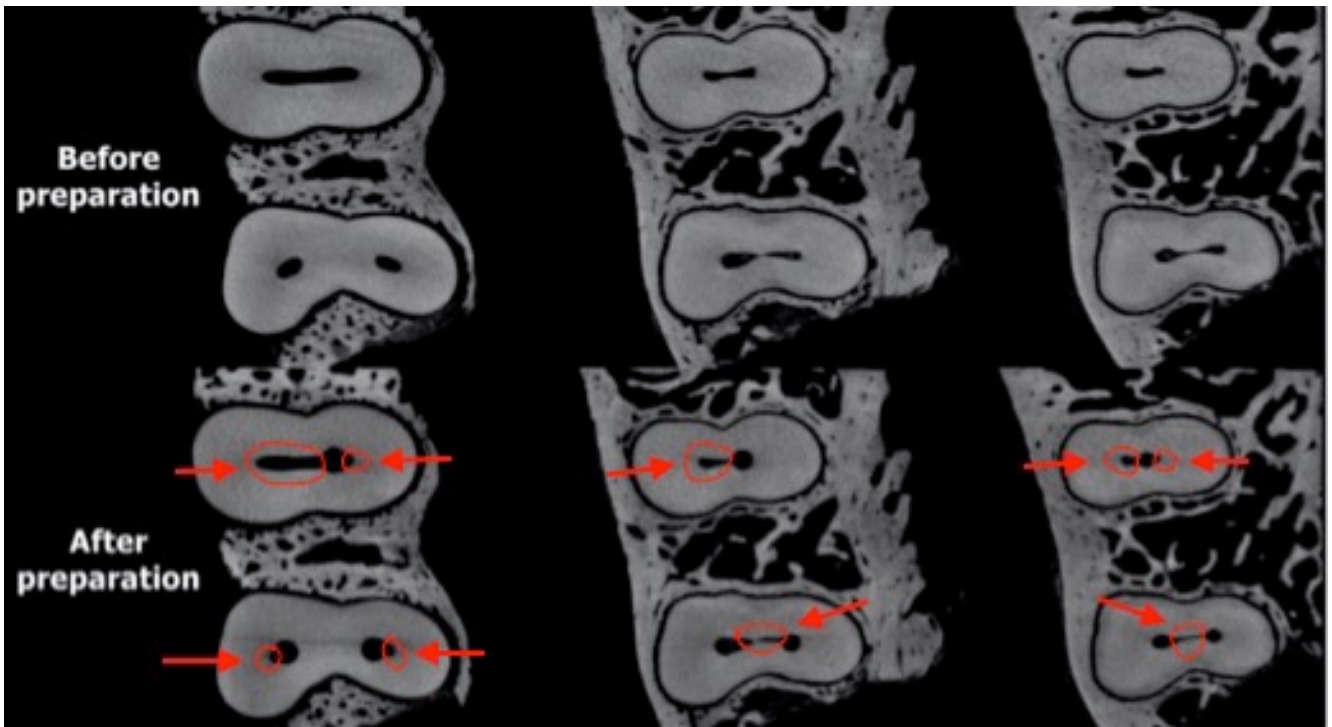


Abbildung 2: Mikro CT Darstellung von ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer jeweils vor und nach der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. Rot eingekreist und mit roten Pfeilen gekennzeichnete Bereiche wurden durch die maschinelle Aufbereitung nicht bearbeitet (De-Deus et al., 2017a). (copyright 2018, mit Genehmigung von Elsevier, s. Anhang)

Um dieser Problematik zu begegnen, wurden in den vergangenen Jahren extrem flexible, selbst zentrierende Wurzelkanalinstrumente aus Nickel-Titan-Legierungen entwickelt, die sich der Kanalanatomie in der Rotationsbewegung anpassen (zum Beispiel self adjusting File (SAF) von ReDent Nova, Israel, XP Endo von FKG Dentaire, Schweiz, Mity X-Trem von JS Dental, USA). Diese Instrumente sind in der Lage, die originäre Form des Kanals zu erhalten (Elnaghy et al., 2017; Metzger et al., 2010b; Yoldas et al., 2012a). Zur Unterstützung der Wurzelkanalaufbereitung wird ein Kunststofffilament angeboten (EDDY, VDW, Deutschland), das Schallenergie in den mit einer Spülflüssigkeit gefüllten Wurzelkanal appliziert. Durch Kavitation und einen Peitscheneffekt werden Debris und Gewebereste sowie Biofilme aus dem Wurzelkanal herausgelöst. Eine mechanische Aufbereitung ovaler, sanduhrförmiger oder C-förmiger Wurzelkanäle kann so sehr strukturschonend und selektiv unterstützt durch einzelne Handinstrumente durchgeführt werden.

Für die Wurzelkanalaufbereitung unterschiedlicher Kanalquerschnitte stehen somit optimierte Instrumente zur Verfügung. Gerade Wurzelkanäle mit einem runden Kanalquerschnitt, wie sie für Inzisivi, Canini und disto-bukkale Wurzeln oberer Molaren typisch sind, können handinstrumentell, rotierend-maschinell und alternierend-maschinell bearbeitet werden. Gekrümmte Wurzelkanäle sind durch hitzebehandelte konische Nickel-Titan-Instrumente

optimal zu bearbeiten. Für unregelmäßig geformte Wurzelkanäle mit einem nicht runden Querschnitt bieten sich Handinstrumente, neu entwickelte sehr flexible Nickel-Titan-Instrumente, sowie ultraschalaktivierte Kunststofffilamente oder speziell geformte finale Feilen an.

Es werden grundsätzlich nach Wurzelkanalaufbereitungen zwei Arten von Frakturen beobachtet. Eine Fraktur der gesamten Wurzelwand ist ein durchgehender Defekt von der Kanalinnenwand bis zur Wurzeloberfläche. Eine Mikrofraktur hingegen ist ein inkompletter Defekt, der nicht durchgehend vorhanden ist.

Die hier betrachteten Wurzelkanalaufbereitungen wurden an extrahierten Unterkieferinzisiven unter Verwendung von 2ml NaOCl- und 2ml EDTA Spülung pro Kanal durchgeführt. Als zusätzliches Gleitmedium wurde ein 17%iges EDTA Gel verwendet. Die Aufbereitungen erfolgten schonend und drucklos unter strenger Einhaltung der Herstellerangaben. In Folge dessen wurden hauptsächlich Mikrofrakturen (Infraktion) erwartet.

3 Literaturübersicht

3.1 Anforderungen an die Wurzelkanalaufbereitung

Der Therapieerfolg einer Wurzelkanalbehandlung hängt von folgenden Faktoren ab:

- Entfernung des vitalen oder nekrotischen Pulpagewebes,
- Eliminierung der Mikroorganismen aus dem Wurzelkanalsystem sowohl mechanisch durch die Aufbereitung als auch chemisch durch desinfizierende Spülungen,
- konische Aufbereitung des Wurzelkanals von apikal nach koronal unter Beibehaltung des originären Wurzelkanalverlaufs,
- die apikale Konstriktion des Wurzelkanals soll erhalten bleiben, eine Überinstrumentierung mit übermäßiger Erweiterung des Foramens sowie eine Unterinstrumentierung muss vermieden werden (Löst, 2006; Schäfer, 2000).

Die grundlegenden Anforderungen an die Wurzelkanalaufbereitung sind die konische Formgebung und die Keimelimination im dreidimensionalen Kanalsystem. Die Wurzel soll dabei nicht durch übermäßigen Materialabtrag geschwächt werden. Die mechanische Erweiterung des Wurzelkanallumens dient nicht nur der Entfernung von Mikroorganismen an der Wurzelkanalwand, sondern erhöht vor allem die Effizienz der chemischen Wurzelkanalaufbereitung, also die Desinfektion durch Spüllösungen. Durch die Vergrößerung des Kanallumens wird zudem der dichte, vollständige Verschluss des Wurzelkanalsystems erst ermöglicht (Himmel and Levitan, 2003; Peters, 2004; Schilder, 1974).

Probleme der Formgebung bei der Wurzelkanalaufbereitung:

Die Zielstellung der Wurzelkanalaufbereitung ist die Präparation eines konischen Kanallumens von apikal nach koronal. Probleme bei der Wurzelkanalaufbereitung treten am häufigsten bei gekrümmten Wurzelkanälen auf (Saunders and Saunders, 1997). Die Verwirklichung des gleichmäßigen Substanzabtrags an allen Kanalwänden, ohne den Kanalverlauf zu verändern, ist technisch besonders schwer zu erreichen (Schafer and Schlingemann, 2003; Schafer and Vlassis, 2004; Song et al., 2004).

Die Flexibilität des Wurzelkanalinstrumentes spielt bei dieser Thematik die größte Rolle. Studien haben belegt, dass wenig flexible Instrumente an bestimmten Bereichen des Wurzelabschnitts verstärkt Substanz abtragen: im koronalen Drittel an der äußeren Krümmung, im mittleren Drittel an der inneren Krümmung und im apikalen Drittel wieder an der äußeren

Kurvatur (Calberson et al., 2004; Luiten et al., 1995; Yun and Kim, 2003). Diese Änderung der Kanalanatomie wird als Begradigung oder im Englischen als „canal transportation“ bezeichnet und stellt eine der häufigsten Komplikationen bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle dar (Esposito and Cunningham, 1995; Glossen et al., 1995; Pettiette et al., 1999).

Weitere Veränderungen der Kanalanatomie im apikalen Drittel des Wurzelkanals werden wie folgt in der Literatur beschrieben:

- Ledge: Bildung einer Stufe im apikalen Verlauf des Kanallumens an der äußeren Kurvatur.
- Zip: Entstehung einer Trichterform in Apexnähe aufgrund des übermäßigen Dentinabtrags an der äußeren Kurvatur.
- Via falsa mit Perforation: Iatrogene Perforation der Kanalwand an der äußeren Kurvatur der Wurzel.
- Elbow: Entstehung einer ellenbogenförmigen Kerbung an der äußeren Kurvatur der Wurzelkanalwand in Apexnähe.
- Strip perforation: Zu starker Substanzabtrag an der inneren Kurvatur des Wurzelkanallumens

Die oben genannten Veränderungen des Wurzelkanalverlaufes bei der Aufbereitung hinterlassen einerseits unberührte Wurzelkanalwände, die von Debris und Mikroorganismen mechanisch nicht befreit wurden. Andererseits führt die Bildung verschiedener Unregelmäßigkeiten im Kanalverlauf zu einer apikalen Verblockung durch infizierte Dentinspäne oder nekrotisches Gewebe. Letztendlich verbleibt dieses infizierte Gewebe entweder im Wurzelkanal (Braun et al., 2003) oder wird über den Apex hinaus in das periapikale Gewebe transportiert (Himel and Levitan, 2003, Hülsmann, 2001). Deformationen der Wurzelkanalgeometrie erschweren zudem die dichte Obturation des Wurzelkanallumens (Royal and Donnelly, 1995). Im Falle einer Perforation, die durch spezielle Techniken nicht gedeckt werden kann, ist der Zahn nicht mehr erhaltungsfähig.

3.2 Das Instrumentarium

Es sind für die Wurzelkanalbehandlung handinstrumentelle und maschinelle Techniken verfügbar.

Die manuelle Aufbereitung wird mit Handinstrumenten aus Chrom-Nickel-Edelstahl, Nickel-Titan- oder Titan-Aluminium-Legierungen durchgeführt (Schäfer, 2000). Grundsätzlich wird

bei den Handinstrumenten zwischen Reamern, K- Feilen und Hedströmfeilen unterschieden. Die wichtigsten Merkmale eines Wurzelkanalinstrumentes sind Schneidekantenwinkel und Instrumentenquerschnitt. Nach diesen Kriterien wird die optimale Anwendung des Instrumentes vorgegeben. Der Schneidekantenwinkel beschreibt den Winkel zwischen der Schneidekante und der Längsachse des Instrumentes. Je größer der Schneidekantenwinkel, desto größer ist die Schneidleistung. Die Querschnittsform eines Instruments bestimmt den Spannraum. Die Größe des Spannraums ist wichtig, um abgetragenes Material abzutransportieren, ohne Verblockungen im Wurzelkanal zu verursachen.

Alle Wurzelkanalinstrumente sind international durch ISO-Normen standardisiert. Dieser ISO-Standard definiert alle Dimensionen, Toleranzen so wie Mindestanforderungen an Belastbarkeit. Der Querschnitt an der Instrumentenspitze wird in 1/100 mm angegeben. Eine Endodontiefeile der ISO Größe 8 hat am Instrumentenende einen Durchmesser von 0,08 mm. Der materialabtragende Abschnitt der Feile wird Arbeitsteil genannt. Die Länge des Arbeitsteils beträgt 16 mm. Der Durchmesser des Arbeitsteils steigt von der Instrumentenspitze beginnend pro Millimeter an. Je stärker der Durchmesser ansteigt, desto konischer ist das Instrument. Die Konizität beschreibt das Taper in 1/10mm. Ein Taper von 02 würde bedeuten, dass der Durchmesser des Instrumentes an der Instrumentenspitze pro Millimeter kontinuierlich um 0,02 mm ansteigt.

Reamer werden mittels Verdrillung aus einem dreieckigen oder quadratischen Drahtrohling hergestellt und haben einen Schneidekantenwinkel von ca. 20 Grad. Wegen des kleinen Schneidekantenwinkels ist mit dieser Feilenart nur ein geringer Materialabtrag möglich. Es wird hier eine vorwiegend drehende Arbeitsweise im Kanal empfohlen (Schäfer, 2000). Bei kleineren ISO Größen ist der Querschnitt rechteckig, bei den größeren dagegen dreieckförmig. Die Dreiecksform erlaubt einen besseren Abtransport der Dentinspäne und Debris.

Die K-Feile wird ähnlich wie der Reamer durch Verdrillung eines Edelstahlrahtes hergestellt. Der Unterschied liegt in der höheren Anzahl an Verdrillungen pro Längseinheit und damit dem größeren Schneidewinkel von ca. 40 Grad. Die Schneidleistung ist dadurch im Vergleich zu einem Reamer höher. Sowohl eine drehende als auch eine feilende Arbeitsweise ist möglich. Die Querschnittsform und somit der Abtransport von geschabtem Material aus dem Wurzelkanal ist ähnlich wie beim Reamer (Baumann, 2007).

Die Hedströmfeilen werden aus einem rundem Rohling durch Fräsung hergestellt (Schäfer, 2000). Hier liegt der Schneidekantenwinkel bei ca. 60 Grad und die Schneidleistung ist

somit im Vergleich zu den Reamern und K Feilen am größten. Der Instrumentenquerschnitt ist bei der Hedströmfeile rund und der Spannraum dadurch sehr klein. Somit erfolgt der Abtransport des geschabten Materials aus dem Wurzelkanal deutlich schlechter als bei den Reamern oder K Feilen (Baumann, 2007). Für Hedströmfeilen wird nur die feilende Arbeitsweise empfohlen, da durch das Instrumentendesign eine hohe Gefahr besteht, dass das Instrument sich im Wurzelkanal verkantet.

Grundsätzlich ist die Aufbereitung von gekrümmten Wurzelkanälen mit Edelstahl Instrumenten wegen der bestehenden Bruchgefahr erschwert.

3.3 Wurzelkanalaufbereitungstechniken

3.3.1 Manuelle Wurzelkanalaufbereitungstechniken

Die Aufbereitungstechniken mit Handinstrumenten werden in apikal-koronale und koronal-apikale Techniken unterteilt.

Zu den apikal-koronalen Techniken gehören die standardisierte Technik, die step-back Technik und die balanced-force Technik.

Standardisierte Technik

Alle WK-Instrumente werden auf der zu Beginn der Behandlung ermittelten Arbeitslänge eingeführt und aufsteigend in ihrer Größe eingesetzt. Der Nachteil dieser Technik liegt in der möglichen Stufenbildung mit Abweichung von der Kanalgeometrie im apikalen Drittel des Wurzelkanals bis hin zu möglichen Perforationen schon bei leicht gekrümmten Wurzelkanälen.

Step-Back Technik

Bei dieser Technik handelt es sich um eine Modifikation der standardisierten Technik. Auch hier wird zunächst die Arbeitslänge ermittelt. Der Wurzelkanal wird auf voller Arbeitslänge um einige ISO-Größen aufbereitet. Die danach folgenden Instrumente werden bei geraden Kanälen jeweils um 0,5 mm und bei gekrümmten Kanälen um 1 mm pro Instrument weiter koronal eingesetzt. Somit erreicht man höhere Konizitäten, was die technische Ausführung der Wurzelkanalfüllung erleichtert.

Der Nachteil dieser Technik liegt ebenfalls in der Stufenbildung und der Abweichung vom ursprünglichen Kanalverlauf im apikalen Wurzel Drittel bei gekrümmten Kanälen.

Balanced-force Technik

Diese Technik ist speziell für die Aufbereitung der gekrümmten Kanalverläufe entwickelt worden. Es werden flexible Instrumente mit einer nichtschneidenden Spitze verwendet. Ein Wurzelkanalinstrument wird unter leichten Rotationen in den Wurzelkanal eingebracht, bis ein Widerstand spürbar ist. Danach erfolgt eine Rotation um 90 Grad im Uhrzeigersinn und anschließend eine Gegenrotation um 270 Grad. Anschließend wird das Instrument unter Drehung im Uhrzeigersinn wieder aus dem Kanal herausgebracht. Erst nach Erreichen der vollen Arbeitslänge wird der Wurzelkanal auf weitere ISO Größen erweitert. Anschließend folgt die „Step-back Technik“, um koronal konischer zu werden. Dadurch können Abweichungen von dem Kanalverlauf oder die Stufenbildungen bei gekrümmten Kanalverläufen weitestgehend vermieden werden. Nachteilig ist jedoch das erheblich höhere Frakturrisiko der Instrumente im Kanal aufgrund der vielen Rotationsbewegungen (Roane et al., 1985).

Koronal-apikale Techniken sind die step-down Technik, double-flared Technik und die crown-down Technik.

Step-down Technik

Diese Technik ist für die Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanalverläufe entwickelt worden. Hier werden zuerst die beiden koronalen Drittel des Kanals im Sinne eines erweiterten Zugangswegs aufbereitet. Erst danach wird das apikale Drittel bearbeitet, mit aufsteigenden ISO-Größen, bis auf die volle Arbeitslänge. Anschließend folgt die „step-back Technik“ im apikalen Drittel. Durch das frühe Erweitern des koronalen Kanalabschnittes können Spüllösungen eine Verlegung des Wurzelkanals durch Dentinspäne und Debris verhindern. Bei engen und gekrümmten Kanälen ist diese Technik allerdings nachteilig, da Begradigungen und Deformation des Kanalverlaufes in solchen Fällen öfter vorkommen.

Double-flared Technik

Bei dieser Technik handelt es sich um eine Modifikation der „step-down Technik“. Auch hier erfolgt zuerst die Aufbereitung der beiden koronalen Drittel. Danach wird aber im Gegensatz zu der „step-down Technik“ mit Feilen absteigender ISO-Größe bis auf Arbeitslänge weiter präpariert. Erst nach Erreichen der vollen Arbeitslänge wird die apikale Konstriktion auf die gewünschte ISO-Größe gebracht und es schließt sich die „step-back Technik“ an. Hiermit kann der Wurzelkanal ebenfalls durch Spüllösungen sehr gut gereinigt werden und der Transport des abgetragenen infizierten Materials Richtung Apex wird verhindert.

Crown-down Technik

Diese Technik eignet sich besonders zur Aufbereitung gekrümmter Kanäle. Es wird zunächst die Arbeitslänge ermittelt. Danach erfolgt die Penetration des Wurzelkanals mit einem Instrument der ISO Größe 35 bis auf Friktion. Der Kanal wird bis zu dieser Stelle auf ISO 35 aufbereitet. Anschließend erfolgt die Aufbereitung mit Instrumenten absteigender ISO Größe bis auf die volle Arbeitslänge. Danach wird der Arbeitsablauf von koronal nach apikal mit Instrumenten aufsteigender ISO Größe ab ISO 40 wiederholt. Durch diese Technik kann der Kanalverlauf weitestgehend erhalten bleiben.

3.3.2 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitungstechniken:

Die Entwicklung maschineller Aufbereitungssysteme hat in erster Linie die Vereinfachung und Beschleunigung des Behandlungsablaufs in der Endodontie als Ziel (Hülsmann, 2000). Dabei gelten für die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung die gleichen Anforderungen wie für die manuelle Aufbereitung (Heidemann, 2005). Die Entwicklung der maschinellen Aufbereitung begann 1892, als Oltramare die vierkantigen Pulpaextirpationsnadeln vorstellte, die durch eine Rotation die vitale Pulpa um sich wickeln und somit die Extirpation erleichtern. 1899 verwendete Rollins ein selbst konstruiertes Winkelstück mit einer rotierenden Wurzelkanalnadel mit 100 Umdrehungen pro Minute (Hülsmann, 2000; Mikolajczyk, 2014).

Es wurde jedoch bemängelt, dass die Taktilität des Behandlers durch die maschinelle Behandlung verloren ginge und Perforationen häufiger vorkämen, da die Instrumente starr waren und die senkrechte Einführung in den Kanal in den meisten Fällen nicht realisierbar war (Mikolajczyk, 2014; Weigele, 1941). Auch die hohe Frakturanfälligkeit der damaligen Instrumente wurde kritisiert, da sie einen Misserfolg der Behandlung wahrscheinlich machte (Brubacher, 1913). Daraufhin wurden weitere Systeme entwickelt, um diese Probleme bei der Aufbereitung zu beseitigen. Durch die Einführung des Racer-Feilkopfes 1958 und dessen Weiterentwicklung durch das Giromatic-System 1964 erlangte die maschinelle Aufbereitung immer größere Popularität (Hülsmann, 2000). Nichtsdestotrotz konnten Misserfolge durch Instrumentenfrakturen und Aufbereitungsfehler nicht minimiert werden (Frank, 1967). Die maschinelle Aufbereitung wurde demnach nur in Kombination mit der Handaufbereitungstechnik empfohlen (Abou-Rass and Jastrab, 1982; Beun et al., 2005; Löst, 1992).

Die meisten Komplikationen waren sowohl bei der maschinellen als auch bei der manuellen Aufbereitung hauptsächlich auf die Steifheit der Edelmetallinstrumente zurückzuführen. Deswegen wurde weiter nach Legierungen gesucht, die flexibel genug waren, um gekrümmte

Kanalverläufe aufzubereiten ohne die Kanalgeometrie zu beeinträchtigen und die so der Frakturgefahr begegneten (Schäfer, 1998). So war die Einführung der Nickel-Titan Legierung für den Fachbereich Endodontie, aber auch für Kieferorthopädie, besonders interessant.

Die meisten Nickel-Titan-Legierungen bestehen aus 40 - 45 m% Titan und 55 - 60 m% Nickel. Sie weisen ein kleines Elastizitätsmodul auf, welches etwa einem Fünftel dessen der klassischen Chrom-Nickel-Edelstahl-Legierungen entspricht (Walia, et al., 1988). Somit leisten sie gegen eine elastische Deformation sehr geringen Widerstand und sind sehr flexibel. Durch ihr pseudoelastisches Verhalten kann nach einer bis zu 10%igen linearen Dehnung eine vollständige Rückstellung erwartet werden (Kaack, 2002; Mikolajczyk, 2014; Stoeckel and Yu, 1991). Des Weiteren besitzen Nickel-Titan Legierungen einen „memory effect“. Somit erfahren plastische Verformungen, die in einem niedrigen Temperaturbereich (martensitische Phase) zustande gekommen sind, durch das Erwärmen auf 125 Grad Celsius eine spontane Rückumwandlung (austenitische Phase) (Kaack, 2002; Schäfer, 2002).

Es wurde weiter geforscht mit dem Ziel, die mechanischen Eigenschaften von Nickel-Titanlegierungen weiter zu optimieren. Ein häufig verwendetes Verfahren ist in diesem Zusammenhang die Wärmebehandlung (Frick et al., 2005; Wagner et al., 2008). Dabei wird die Legierung auf Temperaturen zwischen 300 und 600 Grad Celsius erwärmt. Durch diese Wärmebehandlung werden kristalline Gitterdefekte reduziert und das Phasentransformationsverhalten beeinflusst (Hayashi et al., 2007; Yahata et al., 2009).

Andere neue Entwicklungen der Nickel-Titan-Legierung sind M-Wire, R Phasentechnologie und das Controlled Memory (CM) Wire. Diese werden durch neue Verfahren der Wärmebehandlung hergestellt und weisen eine höhere zyklische Ermüdungsresistenz auf als die herkömmliche Nickel-Titan-Legierung. Eine besondere Stellung nimmt bis heute die Controlled Memory Wire ein, die laut Hersteller einen bis zu 300 % höheren Widerstand gegen zyklische Materialermüdung aufweist. Diese Instrumente sind bei Raumtemperatur in der martensitischen Phase und können somit vorgebogen werden, um stark gekrümmte Wurzelkanalverläufe aufzubereiten. Die Reciproc Blue Feilen (VDW, Deutschland), die in dieser Studie verwendet wurden, bestehen aus diesem Material.

Die Einführung von Nickel-Titan-Legierungen in die Zahnheilkunde führte zu einem enormen Entwicklungsschub in der Endodontie. Walia und Mitarbeiter stellten 1988 erstmalig Nickel-Titan Wurzelkanalinstrumente vor. Durch die metallurgischen Eigenschaften der Nickel-Titan Legierung sollte die hohe Rate der Misserfolge in der Endodontie gesenkt werden (Walia, et

al., 1988). Viele Studien konnten belegen, dass Nickel-Titan Instrumente den Edelstahl-Instrumenten überlegen sind. Die Komplikationsrate im Sinne von Ledge-, Zip- oder Elbow-Formationen waren bei der Aufbereitung mit Nickel-Titan Instrumenten geringer als bei der Aufbereitung mit Stahlinstrumenten. Die Aufbereitung erfolgte zudem schneller und somit effizienter (Bishop and Dummer, 1997; Guelzow et al., 2005; Mikolajczyk, 2014; Stavileci et al., 2015; Thompson, 2000; Zmener and Balbachan, 1995). Dies bestätigte sich auch dann, wenn die Wurzelkanalbehandlung durch wenig erfahrene Behandler oder Studierende durchgeführt wurde (Mikolajczyk, 2014; Sonntag et al., 2003).

Die besonderen Eigenschaften der Nickel-Titan Legierung erweckten erneut das Interesse der Hersteller von maschinellen Aufbereitungssystemen. Somit konnte die Weiterentwicklung in diesem Bereich sehr schnell vorangetrieben werden (Hülsmann, 2002).

Die meisten maschinellen NiTi (Nickel-Titan) Systeme besitzen folgende gemeinsame Konstruktionsmerkmale nach Hülsmann (Hülsmann, 2002):

- Sie weisen eine nicht schneidende „Batt-Spitze“ auf, wodurch eine zentrale Positionierung der Feile im Wurzelkanal ermöglicht wird. Dies soll auch die Aufbereitungsfehler, die bis zur Perforation der Wurzelkanalwand führen können, reduzieren.
- Sie müssen passiv drucklos in den Kanal eingeführt werden, da sie schabend selbst den Wurzelkanal penetrieren.
- Eine koronalwärts steigende Konizität ist lediglich durch einen Wechsel zu einem größeren Taper möglich, da zirkumferentes Feilen kontraindiziert ist.
- Es muss die empfohlene Feilensequenz und die Umdrehungszahl jedes Systems strikt eingehalten werden, um eine Frakturgefahr bei den Instrumenten zu vermeiden. Außerdem wird empfohlen, mit speziellen Endodontiemotoren, die eine Drehmomentkontrolle ermöglichen, zu arbeiten.
- Es werden variierende Konizitäten (Taper) von 2-12% angeboten;
- Die steigende Konizität geht mit einer Verkürzung des Arbeitsteils einher.

Die Entwicklung der maschinellen Wurzelaufbereitungssysteme hatte vor allem das Ziel, effizienter zu arbeiten und den zeitlichen Aufwand und die Gefahr der Komplikationen insbesondere bei der Aufbereitung gekrümmter Kanäle zu verringern (Azar and Mokhtare, 2011; Bishop and Dummer, 1997; Glossen et al., 1995; Guelzow et al., 2005). Des Weiteren wurde eine Feilenzahlreduktion angestrebt, wodurch einerseits eine Vereinfachung der Anwendung und andererseits eine Kostenreduktion erzielt wurden.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Bewegungsmuster bei der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung: Permanent-vollrotierende und alternierend-reziproke Bewegung. Bei den vollrotierenden Systemen führen die Instrumente eine kontinuierliche 360 Grad Rotation mit je nach System 150-350 Umdrehungen pro Minute durch. Die alternierend-reziproke Bewegung beruht dagegen auf der „balanced force Technik“ nach Roane, die einen Wechsel zwischen der Rotation im Uhrzeigersinn und gegen den Uhrzeigersinn vollzieht; entwickelt insbesondere für die Aufbereitung gekrümmter Kanäle (Roane, et al., 1985).

Yared und Mitarbeiter stellten 2008 erstmalig das neue alternierend-reziproke Konzept unter Verwendung einer F2 Pro Taper Feile und einem ATR Vision Motor (ATR, Pistola, Italy) vor. Nach initialer Instrumentierung mit einer ISO 8 Handfeile (Durchmesser an der Instrumentenspitze von 0,08mm) zwecks Erstellung eines Gleitpfads, bereiteten sie den gesamten Wurzelkanal nur mit einer Feile auf (Yared, 2008). Der Vorteil des alternierend-reziproken Bewegungsmusters ist, dass die Drehwinkel des Wurzelkanalinstruments stets kleiner sind als der spezifische Frakturwinkel und der kontinuierliche Richtungswechsel die Frakturgefahr verringert (Burklein et al., 2012; Kiefner et al., 2014; Perez-Higueras et al., 2013). Einige Studien haben alternierend-reziproke Systeme mit permanent rotierenden Systemen verglichen, in Hinblick auf die Effektivität der Aufbereitung, Zeitaufwand und Keimeliminierung, und keine eindeutige Überlegenheit eines Systems gegenüber dem anderen festgestellt.

Parque und Mitarbeiter verglichen die Effektivität der Aufbereitung mit dem reziproken F2 Protaper Ein-Feilen System und dem vollrotierenden Pro Taper Feilen an den mesiobuccalen Kanälen von 25 humanen Unterkiefermolaren. Beide Systeme zeigten vergleichbar gute Aufbereitungsergebnisse; das Ein-Feilen-System war dabei zeitsparender (Paque, et al., 2011). Ebenso haben Marthinho und Mitarbeiter in Bezug auf die Desinfektion des Wurzelkanals keinen signifikanten Unterschied zwischen dem rotierendem Pro Taper universal, dem reziproken Wave One und dem Reciproc Ein-Feilen Systemen festgestellt. Bei dieser Studie wurden 30 humane Zähne mit postendodontischer apikaler Parodontitis revidiert (Martinho et al., 2015). Bürklein und Mitarbeiter verglichen zwei rotierende maschinelle Systeme, Mtwo und Pro Taper, mit zwei reziproken Ein-Feilen Systemen, Reciproc und Wave One, mit Blick auf die Formgebung und Desinfektion von gekrümmten Kanälen. Dabei wurden 80 humane Zähne mit Kanalkrümmungen zwischen 25 und 39 Grad verwendet. Alle verwendeten Systeme gewährleisteten eine adäquate Formgebung unter Beibehaltung der Kanalgeometrie. Pro Taper und Wave One waren jedoch bei der

Keimeliminierung den anderen zwei Systemen überlegen (Burklein et al., 2012). Allerdings haben Bürklein und Mitarbeiter zwei Jahre später in einer neuen Studie festgestellt, dass permanent rotierende Systeme weniger Debris über den Apex hinaus transportieren als Ein-Feilen alternierend reziproke Systeme. Dabei wurden 80 humane zentrale Incisivi verwendet, die mit den Ein-Feilen rotierenden Systemen F360, One Shape, dem rotierenden Mehr-Feilen System Mtwo und dem reziproken Ein-Feilen System Reciproc instrumentiert wurden. Die Instrumentierung mit den Ein-Feilen Systemen ermöglichte im Vergleich mit dem Mehr-Feilen System kürzere Behandlungszeiten (Burklein et al., 2014).

Durch die Reduktion des Zeitaufwandes und das Versprechen weniger Feilenbrüche nahm die Popularität der Ein-Feilen Systeme zu. Diese haben auch den Vorteil der Vermeidung von Kreuzkontamination zwischen den behandelten Patienten. Schneider und Mitarbeiter wiesen nach, dass sich Prionen im humanen Pulpagewebe befinden können und dass trotz ordnungsgemäßer Aufbereitung und Sterilisation von Ni-Ti Feilen organisches Gewebe auf deren Oberflächen verbleibt (Schneider et al., 2007; Yared, 2008). Der Einmalgebrauch der Wurzelkanalinstrumente schließt darüber hinaus die Materialermüdung durch zu häufiges Sterilisieren aus und ist kostensparender als Mehrfeilen Systeme (Yared, 2008).

Mit der Markteinführung der self adjusting File (SAF, Re-Dent Nova, Israel) im Jahre 2013 kam eine neue Kategorie an maschinellen Wurzelkanalaufbereitungssystemen auf den Markt. Diese Feile besteht aus einem hohlen, aufgerauten Netz aus Nickel-Titan- Legierung und ist somit komprimierbar. So kann sie sich der Kanalanatomie anpassen und ermöglicht eine formkongruente, gleichmäßige Aufbereitung der kompletten Kanalinnenwand (Metzger et al., 2010b; Paqué and Peters, 2011; Peters and Paqué, 2011). Da die Feile sich den Unregelmäßigkeiten des Kanalquerschnittes anpasst, ist die Aufbereitung besonders schonend und verursacht im Vergleich zu anderen maschinellen Systemen fast keine Dentindefekte (Kim et al., 2013; Yoldas et al., 2012b). Sie hat am Schaft einen Anschluss für einen Schlauch, über den man durch eine Pumpe am Endodontiemotor Spülflüssigkeit zuführt. Somit arbeitet die Feile mit einer Hubbewegung unter ständiger Spülflüssigkeitszufuhr von 4ml/min und gewährleistet optimale Debrisentfernung und Desinfektion des Kanals (Metzger et al., 2010a; Siqueira et al., 2010; Siqueira et al., 2013). Dabei wird die Spülflüssigkeit druckfrei durch die Gitterstruktur der Feile eingebracht. Dies verhindert eine apikale Überpressung der Spüllösung. Es wird mit pickenden Bewegungen gearbeitet. Um eine zirkuläre Bearbeitung des Kanals zu ermöglichen, dreht sich die Feile bei Entlastung um 80 U/min. Der Hersteller empfiehlt eine Bearbeitungszeit von vier Minuten pro Kanal. Dabei erfolgt schon in den ersten zwei Minuten der fast vollständige Materialabtrag

und die weiteren zwei Minuten dienen der chemischen Reinigung. Da die Feile aus einem feinen Metallgitter besteht, ist nach Herstellerangabe ein kompletter Feilenbruch nicht möglich. Bei Überbelastung kommt es jedoch gelegentlich zu einem Aufbrechen der Gitterstrukturen, wobei sich die Bruchstücke problemlos aus dem Wurzelkanallumen herauspülen lassen. Die SAF Feile ist derzeit die einzige in ihrer Kategorie der sich selbst anpassenden Feilen. Sie ist speziell entwickelt worden, um unregelmäßige Kanalquerschnitte optimal aufzubereiten.

3.4 Literaturübersicht zur Frakturbildung im Dentin durch Wurzelkanalaufbereitung

Die große Herausforderung in der Endodontie liegt darin, genügend Materialabtrag an der Dentinwand für die adäquate Desinfektion des gesamten Wurzelkanals zu erreichen, ohne die Wurzel zu schwächen. Die finale apikale Aufbereitungsgröße hat einen großen Einfluss auf die Desinfektion des Wurzelkanals. Tan und Mitarbeiter haben die Sauberkeit der mesiobuccalen Kanäle von 30 humanen Unterkiefermolaren nach maschineller (Lightspeed, Kerr, USA) und manueller Aufbereitung verglichen. Es wurde festgestellt, dass breitere apikale Aufbereitung durch das maschinelle System eine bessere Desinfektion im apikalen Drittel erreicht (Tan and Messer, 2002). Allerdings finden sich in der Literatur keine eindeutigen Erkenntnisse, die auf eine apikale Mindestpräparationsgröße hindeuten.

Moshari und Mitarbeiter infizierten mesiobuccale Wurzelkanäle von 103 humanen Unterkiefermolaren mit *Enterococcus faecalis* und bereiteten mit unterschiedlichen Konizitäten auf unterschiedliche apikale Größen auf. Anschließend wurden die Proben durch die chemomechanische Aufbereitung auf die Reduktion von *Enterococcus faecalis* untersucht. Dies ergab eine effizientere Keimeliminierung, je größer die apikale Aufbereitung und je höher die Konizität der Instrumente war (Moshari, et al., 2015). Akhlaghi und Mitarbeiter führten die maschinelle Aufbereitung (Race, FKG Dentaire, Schweiz) mesiobuccaler Wurzeln von 89 humanen Unterkiefermolaren auf verschiedene apikale Größen mit verschiedenen Konizitäten durch. Anschließend wurden die apikalen Drittel der Wurzelkanäle auf bakterielle Besiedelung untersucht. Eine apikale Aufbereitung mit ISO 30 mit einem Taper von 06 wurde als Mindestpräparationsgröße angegeben, um eine adäquate Desinfektion im apikalen Drittel zu gewährleisten (Akhlaghi et al., 2014). Im Gegensatz dazu stellten Mohammadzadeh und Mitarbeiter fest, dass die finale apikale Präparation mit einer ISO 25 Feile mit einem Taper von 04 sich in Bezug auf die Keimeliminierung nicht signifikant von den Präparationen mit größeren Feilen und Tapern unterscheidet. Bei dieser Studie

wurden ebenfalls mesiobuccale Kanäle von 89 humanen Unterkiefermolaren mit dem gleichen maschinellen System (Race, FKG Dentaire, Schweiz) untersucht (Mohammadzadeh Akhlaghi et al., 2014).

Es lässt sich allerdings feststellen, dass die Wurzelkanalwand mit steigendem apikalem Querschnitt und größerer Konizität immer schwächer wird. Je größer der Aufbereitungsquerschnitt, desto anfälliger ist die verbleibende Dentinwand auf Frakturen (Wilcox et al., 1997). Die Aufbereitung des Wurzelkanals mit größeren Konizitäten und übermäßiger Vergrößerung der apikalen Konstruktion zwecks ausreichender Desinfektion übt wiederholte Belastungen auf das Wurzelkandentin aus, was die Entstehung von Dentindefekten und Defekten an der Wurzelkanalwand provoziert. Bier und Mitarbeiter haben vier rotierende Wurzelauflbereitungssysteme (Pro Taper, System GT, ProFile (Dentsply Maillefer, Schweiz) und S-Apex (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz)) in Bezug auf Frakturformationen verglichen. Nur in der Gruppe der nicht konischen bzw. parallelwandigen Aufbereitung (S-Apex) wurden keine Dentindefekte beobachtet (Bier et al., 2009). Als Schlussfolgerung daraus stand die konische Aufbereitung als potenzielle Ursache für die Entstehung von Dentindefekten unter Verdacht. Eine Studie von Sathorn und Mitarbeiter im Jahre 2005 bestätigte dies. Sie fanden heraus, dass Frakturformationen umso unwahrscheinlicher sind, je größer die Wurzelkanalaufbereitung ist (Sathorn et al., 2005). Diese Defekte im Dentin, im Sinne von Infrakturen oder Mikrofrakturen, können durch die anschließende Wurzelfüllung, restaurative Maßnahmen und die okklusalen Kräfte zu Wurzelfrakturen führen (Capar et al., 2015). Die vertikale Wurzelfraktur (vertical root fracture=VRF) ist ein häufiger Grund für den Misserfolg der Endodontie und die Extraktion des Zahnes (Tavanafar et al., 2015; Toure et al., 2011).

Die Formgebung des Wurzelkanals erfolgt durch den Kontakt des Instrumentes an der Dentinwand während der chemomechanischen Aufbereitung. Diese Kontakte erzeugen kurzzeitige Belastungskonzentrationen an der Dentinwand, die Dentindefekte und Haarrisse (craze lines) verursachen können (Blum et al., 1999; Jamleh et al., 2015). In diesem Zusammenhang haben einige Studien manuelle Aufbereitungstechniken mit maschinellen Aufbereitungssystemen verglichen. Dabei sollte festgestellt werden, ob die maschinellen Systeme aggressiver sind und das Wurzelkandentin zu sehr schwächen. Gao und Mitarbeiter führten eine retrospektive Analyse von 1702 endodontisch behandelten Zähnen durch. Davon waren 643 manuell durch Stahlinstrumente und 1059 durch vollrotierende maschinelle Ni-Ti Instrumente aufbereitet worden. Die Rate der postendodontischen vertikalen Wurzelfrakturen war bei der Gruppe der maschinell instrumentierten Zähne höher als bei der

Gruppe der manuell instrumentierten Zähne (Gao and Xu, 2012). Im Gegensatz dazu hatten Tavanafar und Mitarbeiter 2015 eine endodontische Behandlung von 120 Unterkiefer Prämolaren mit Ni-Ti Hand Feilen, rotierenden Bio Race Feilen und dem reziproken Ein-Feilen System Wave One durchgeführt und diese wurzelgefüllt. Anschließend wurden die Proben auf Frakturresistenz geprüft. Es fand sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Aufbereitungstechniken im Hinblick auf die Frakturresistenz (Tavanafar, et al., 2015). Liu und Mitarbeiter stellten fest, dass die Aufbereitung mit maschinellen, rotierenden Instrumenten mehr apikale Dentindefekte (apical cracks) verursachte als die manuelle Instrumentierung. Dabei wurden 240 Unterkieferinzisivi sowohl mit Handfeilen als auch mit rotierenden Feilen (K3, Kerr Dental, USA und Protaper, Dentsply, Deutschland) aufbereitet (Liu et al., 2013b). Bier und Mitarbeiter verglichen manuelle und rotierende Systeme zur Wurzelkanalaufbereitung an 260 Unterkieferprämolaren und fanden heraus, dass die Handinstrumentierung keine Dentindefekte verursachte (Bier, et al., 2009). Auch Ashwinkumar und Mitarbeiter führten eine Vergleichsstudie durch, bei der sie Handinstrumentierung sowohl mit reziproken als auch mit rotierenden Systemen verglichen und keine Dentindefekte bei der Handinstrumentierung feststellten. Hierbei wurden 150 gekrümmte, mesiale Wurzeln von ersten Unterkiefermolaren verwendet (Ashwinkumar et al., 2014).

Mehrere Autoren verglichen die maschinellen Systeme untereinander. So haben Jamleh und Mitarbeiter Oberflächenspannung an der Wurzel während der Wurzelkanalaufbereitung und ihren Einfluss auf die Entstehung von Mikrofrakturen gemessen. Dabei wurden 25 Unterkieferprämolaren und die Systeme Protaper (Dentsply, Deutschland; rotierend) und Wave One (VDW, Deutschland; reziprok) miteinander verglichen. Mikrofrakturen nach der Aufbereitung wurden durch ein CT Scan mit Kontrastmittel untersucht. Beide Systeme verursachten Dentindefekte und ähnliche Werte der erhöhten Oberflächenspannung, allerdings gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen ihnen (Jamleh et al., 2015). Genauso stellten auch De Deus und Mitarbeiter keinen signifikanten Unterschied zwischen reziproken und rotierenden Systemen fest. Diese Studie wurde an gekrümmten Kanälen von Unterkiefermolaren durchgeführt und die Mikrofrakturen wurden anhand eines hochauflösenden CT Scans untersucht (De-Deus, et al., 2014). Mit der gleichen Methode verglichen De Deus und Mitarbeiter im Jahre die zwei Systeme Pro Taper Next (Dentsply, Deutschland; rotierend) und Twisted Adaptive File (Kerr, USA; teils rotierend, teils reziprok) und stellten ebenfalls keinen Unterschied bei Vorhandensein der Dentindefekte fest (De-Deus et al., 2015b). Kansal und Mitarbeiter kamen dagegen bei ihrer Gegenüberstellung von

rotierenden und reziproken Aufbereitungen an Unterkieferprämolaren zu dem Ergebnis, dass die reziproke Bewegung eine schonendere Aufbereitung gewährleistet (Kansal, et al., 2014). Im Gegensatz dazu behaupteten Burklein und Mitarbeiter, dass die reziproke Bewegung mehr Dentindefekte verursacht als die rotierende Bewegung. Hierbei wurden die Systeme Reciproc (reziprok, VDW, Deutschland), Wave One (reziprok, Dentsply, Deutschland), Mtwo (rotierend, VDW, Deutschland) und Pro Taper (rotierend, Dentsply, Deutschland) bei der Aufbereitung von Unterkiefer Incisivi verglichen. Die meisten durchgehenden Frakturen (durchgehend von Kanalinnenwand zur Kanalaußenwand) wurden bei dem System Reciproc beobachtet (Burklein, et al., 2013). Auch Gergi und Mitarbeiter fanden im Jahre bei dem System Reciproc (reziprok, VDW, Deutschland), im Vergleich zu den anderen verglichenen Systemen (Wave One (reziprok) und Twisted Files Adaptive (alternierend), die meisten durchgehenden Frakturen (Gergi et al., 2015). Priya und Mitarbeiter verglichen rotierende und reziproke Aufbereitung sowohl mit Full-Sequence Systemen als auch mit Ein-Feilen Systemen an Unterkiefer Incisivi. Sie stellten fest, dass Full-Sequence Systeme schonender sind als die Ein-Feilen Systeme. Allerdings verursachten die Full-Sequence Systeme mit der reziproken Aufbereitung weniger Dentindefekte als die Systeme mit rotierender Aufbereitung (Priya, et al., 2014). Topcuoglu und Mitarbeiter verglichen im Jahre das rotierende Pro Taper Next System (Dentsply, Deutschland) mit den reziproken Ein-Feilen Systemen Wave One (Dentsply, Deutschland) und Reciproc (VDW, Deutschland). Die Wurzeln, die mit den reziproken Ein-Feilen Systemen auf ISO 40 aufbereitet wurden, wiesen mehr Dentindefekte auf als die aus der Pro Taper Next Gruppe (Topcuoglu et al., 2016).

In der Literatur findet man zudem Hinweise darauf, dass auch die Arbeitslänge der Aufbereitung bei der Entstehung von Dentindefekten eine Rolle spielt. Liu und Mitarbeiter bereiteten 240 Unterkieferinzisivi auf unterschiedliche Arbeitslängen auf. Nur die Wurzeln, bei denen die Aufbereitung 2mm vor dem apikalen Foramen endete, zeigten keine Dentindefekte (Liu et al., 2013b).

3.4.1 Methoden zur Darstellung von Mikrofrakturen

Die meisten Autoren verwendeten zur Untersuchung der Mikrofrakturen die Methode der Schnittdarstellung. Bei dieser Methode werden alle aufbereiteten Wurzeln und Kontrollgruppe ohne Aufbereitung jeweils 3, 6 und 9 mm von dem Apex entfernt mit einer Diamantsäge unter Wasserkühlung in sektioniert. Diese 3 mm Schnitte werden mithilfe eines Lichtmikroskops unter 25-60-facher Vergrößerung auf Dentindefekte untersucht (Burklein, et al., 2013, Gergi, et al., 2015, Kansal, et al., 2014, Karatas, et al., 2015a, Karatas, et al., 2015b, Li, et al., 2015,

Priya, et al., 2014). Bei den jüngeren Studien findet sich dazu auch die Methode des hochauflösenden Mikro-Computer-Tomografie Scans. Hierbei werden alle Proben vor und nach der Aufbereitung per Mikro CT mit einer Auflösung von 14 - 18 µm gescannt. Anschließend werden die Aufnahmen auf der gleichen Ebene miteinander auf Dentindefekte verglichen (Ceyhanli et al., 2015; De-Deus et al., 2015b; De-Deus et al., 2014). Die Autoren der letzteren Methode sind der Meinung, damit den destruktiven Einfluss der Schnittdarstellung auf die Proben zu eliminieren.

3.5 Fragestellung

Folgende Nullhypothesen wurden aufgestellt:

- 1. Zwischen nicht aufbereiteten und aufbereiteten Wurzeln besteht hinsichtlich der Frakturen kein Unterschied.*
- 2. Zwischen Handaufbereitung und maschinellen Systemen besteht bei der Frakturbildung kein Unterschied*
- 3. Zwischen den maschinellen Aufbereitungstechniken ist kein Unterschied in Bezug zur Frakturbildung zu finden.*

4 Material und Methode

4.1 Vorversuchsreihe

Um Fehler in der Methodik zu erkennen und den Ablauf des experimentellen Abschnittes dieser Studie optimieren zu können, wurden Vorversuche mit 18 humanen Inzisivi durchgeführt. Alle Wurzelkanäle wurden mit einer C Pilot Feile der ISO Größe 10 (VDW, Deutschland) auf Durchgängigkeit geprüft. Die Wurzeln hatten ausschließlich ein apikales Foramen. Nach Befreiung der Wurzeloberflächen von Gewebsresten und Konkrementen wurden die Zahnkronen mit einem groben Separierdiamanten unter Wasserkühlung entfernt (Komet Nr.859204010, Deutschland). Vor der Aufbereitung wurden die Proben mit einer dünnen Schicht dünn-fließenden Silikonabformmaterials (Coltex extrafine, Coltene, Deutschland) beschickt und in Alabastergips (Octabaster, Heraus-Kulzer, Deutschland) eingebettet. Die gesamte Aufbereitung der Wurzeln fand im eingebetteten Zustand statt.

Die Proben wurden in drei Gruppen zu jeweils sechs Wurzeln aufgeteilt und mit Handinstrumenten mittels Step Back Technik, dem vollrotierenden maschinellen System F6 Komet Sky Taper und dem reziproken maschinellen System Reciproc aufbereitet. Die finale Konizität bei den maschinellen Systemen lag bei 6%. Um dieser nahe zu kommen, wurde mit Handinstrumenten bis ISO 120/0.02 aufbereitet. Die finale Konizität lag bei 5%. Es wurden pro Wurzel 2ml 17%iger EDTA- und 6%iger NaOCl Lösung zur Desinfektion des Wurzelkanalsystems und 15%iges EDTA-Gel als Gleitmedium verwendet. Sowohl vor als auch nach der Wurzelaufbereitung wurden die Proben mit 2%igem Methylenblau angefärbt und auf der gesamten Wurzeloberfläche mit dem 3D Lichtmikroskop (VHX 5000, Keyence, Japan) unter 200-facher Vergrößerung aufgenommen. Die Aufnahmen vor und nach der Aufbereitung wurden verglichen und nach der Aufbereitung neu entstandene oder erweiterte Dentindefekte wurden dokumentiert.

Von allen Proben wurden nach der Aufbereitung Röntgenaufnahmen angefertigt (Heliodent, Sirona, Deutschland). Insgesamt sieben Proben, die lichtmikroskopisch besonders viele Frakturen aufwiesen, wurden unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

4.2 Probenmaterial

Als Probematerial dienten 80 humane Unterkiefer-Inzisivi mit geradem Wurzelverlauf. Die Zähne wurden nach der Extraktion von den Patienten zurückgelassen. Die Herkunft wurde nicht dokumentiert, d.h. die Proben waren vollanonymisiert. Alle Wurzelkanäle wurden mit

einer C Pilot Feile der ISO Größe 10 (VDW, Deutschland) auf Durchgängigkeit geprüft. Die Wurzeln hatten ausschließlich ein apikales Foramen. Das Probematerial wurde während der Studie zum Schutz vor Austrocknung und zur Vorbeugung bakterieller Besiedlung in einer 0,1%igen Tymollösung (Apotheke des Universitätsklinikums des Saarlandes, Homburg, Deutschland) gelagert. Alle Zähne wurden mit Handscalern und mit rotierenden Bürsten von Biofilmauflagerungen und Geweberesten befreit. Um einen geradlinigen Zugang der Wurzelkanalinstrumente in das Wurzelkanalsystem zu gewährleisten, wurden die Zahnkronen entfernt. Dies erfolgte mit einem groben Separierdiamanten unter Wasserkühlung (Komet Nr.859204010, Komet, Deutschland).

4.3 Wurzelkanalaufbereitung und Vorbereitung für die Frakturanalyse

Das Probematerial wurde in fünf Versuchsgruppen zu je 16 Zähnen eingeteilt:

Gruppe U (unaufbereitet = Kontrollgruppe): Hier wurde keine Aufbereitung vorgenommen.

Gruppe H (Handaufbereitung): Es wurde die klassische Handaufbereitung mit Step Back Technik bis zu einem apikalen Aufbereitungsquerschnitt von ISO 40 durchgeführt. Mit der Step Back Technik wurde die Richtung koronal bis ISO 55 erweitert. Die Feilen bestehen aus plastischer Edelstahllegierung.

Gruppe K (Komet F6 Sky Taper): Die maschinelle permanent rotierende Aufbereitung erfolgte mit dem System F6 Sky Taper (Komet, Deutschland) mit den Instrumenten ISO 30 / 0.06 und ISO 40 / 0.06. Die finale Konizität (Taper) ist durch beide Instrumente vorgegeben und beträgt 6%. Die Feilen bestehen aus elastischer Nickel-Titan-Legierung.

Gruppe R (Reciproc): Die Aufbereitung wurde maschinell alternierend mit dem System Reciproc (VDW, Deutschland) mit dem Instrument ISO 40 / 0.06 durchgeführt. Die finale Konizität (Taper) ist durch das Instrument vorgegeben und beträgt 6 %. Die Feilen bestehen aus elastischer Nickel-Titan-Legierung.

Gruppe B (Reciproc Blue): Die Aufbereitung erfolgte mit dem System Reciproc Blue mit dem Instrument ISO 40 / 0.06. Die finale Konizität ist durch das Instrument vorgegeben und beträgt 6 %. Die Feilen bestehen aus elastischer Nickel-Titan-Legierung. Diese Legierung wurde zusätzlich einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen, so dass die Elastizität und die zyklische Ermüdungsbruchresistenz höher sind als bei den klassischen Reciproc-Instrumenten.

Bei der Aufbereitung wurden die Proben mit feuchter Gaze in der Hand fixiert. Eine Überinstrumentierung konnte durch die Sichtkontrolle ausgeschlossen werden. Bei der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung wurde der Endodontiemotor VDW Gold Motor (VDW, Deutschland) benutzt. Zu den jeweiligen Systemen wurden die entsprechenden Einstellungen nach Herstellerangabe verwendet. Jeder Kanal wurde bei Instrumentenwechsel bzw. nach drei „pecking motions“ mit 17 %iger EDTA-Lösung (Speiko, Deutschland) und 5 %iger NaOCl-Lösung (Speiko, Deutschland) im Wechsel gespült und das Instrument wurde von Dentinspänen befreit. Insgesamt wurden pro Kanal 2ml EDTA- und 2ml NaOCl-Lösung verwendet. Somit wurde eine Blockade des Kanalsystems vermieden und durch das Stehenlassen der Spüllösung im Kanal während der Instrumentierung eine bessere Gleitfähigkeit des Instrumentes erzielt. Zusätzlich wurde bei allen Proben 15%iges EDTA Gleitgel (Filecare, VDW, Deutschland) verwendet.

Bei Gruppe H (Handaufbereitung) wurde zuerst durch eine K-Feile der ISO Größe 20 ein Gleitpfad erstellt. Danach wurden die Kanäle mit Hedströmfeilen bis ISO Größe 40 bis zur Arbeitslänge präpariert. Anschließend wurde mittels Step-back-Technik weiter aufbereitet. Jedes Instrument wurde jeweils 1mm von der Arbeitslänge zurückgezogen und auf eine ISO Größe breiter aufbereitet. Dies wurde wiederholt bis ISO 55.

Bei den Proben der Gruppe K (Komet F6 Sky Taper) wurde mit einer K Feile der ISO Größe 20 ein Gleitpfad erstellt. Danach wurde gemäß der Herstellerangabe mit der blauen (ISO 30 / 0.06) Feile in pickenden Bewegungen bis auf Arbeitslänge weiter instrumentiert. Im Anschluss wurde mit der finalen schwarzen Feile (ISO 40 / 0.06) die Aufbereitung abgeschlossen. Die Umdrehungszahl wurde für beide Feilen auf 300 rpm festgelegt. Das Drehmoment (Torque) bei der ersten rotierenden Feile betrug 2,2 Ncm und bei dem zweiten Instrument 2,8 Ncm.

Bei den Proben der Gruppe R (Reciproc) wurde die Kanalgröße mit einer K-Feile der ISO Größe 20 passiv bis auf Arbeitslänge überprüft. Die Feile R40 (ISO 40 / 0.06) wurde mit langsamen, pickenden Auf- und Ab-Bewegungen bis 2/3 der Arbeitslänge eingeführt. Dabei wurde das Instrument nach drei pickenden Bewegungen oder wenn ein Widerstand zu spüren war zur Säuberung des Spanraums aus dem Kanal entfernt. Nach Erreichen der 2/3 Arbeitslänge wurde die Durchgängigkeit bis auf volle Arbeitslänge mit einer K Feile der ISO Größe 20 erneut überprüft und der Kanal mehrmals mit Spüllösungen gespült. Im Anschluss wurde der Kanal bis auf die volle Arbeitslänge aufbereitet. Reciproc Instrumente arbeiteten mit 10 Zyklen pro Sekunde, was 300 rpm entspricht.

Bei den Proben der Gruppe B (Reciproc Blue) wurde die Kanalgröße mit einer K-Feile der ISO Größe 20 passiv bis auf Arbeitslänge überprüft. Danach wurde mit der Feile R 40 / 0.06 (Reciproc Blue) mit pickenden Auf- und Abbewegungen bis 2/3 der Arbeitslänge aufbereitet. Nach drei pickenden Bewegungen oder bei Widerstand wurde das Instrument herausgenommen und gesäubert sowie der Kanal gespült. Der Kanal wurde mit einer K Feile der ISO Größe 20 nochmals auf Verstopfungen überprüft und gesäubert. Anschließend wurde die Aufbereitung mit der Reciproc Feile bis aus Arbeitslänge fortgesetzt. Reciproc Instrumente arbeiteten mit 10 Zyklen pro Sekunde, was 300rpm entspricht.



Abbildung 3: Links oben: Maschinell alternierende Reciproc R40 Feile (ISO 40) mit einem Taper von 0.06, die in den Versuchen verwendet wurde. Rechts oben: Die in den Versuchsreihen verwendeten Feilen des maschinell rotierenden F6 Sky Taper Systems: links ISO 30 mit einem Taper von 0.06 und rechts ISO 40 mit einem Taper von 0.06. Links unten: Handinstrumentelle Feilen der Größe ISO 15 - 40 mit einem

Taper von 0.02, die bei der Handaufbereitung bis auf Arbeitslänge verwendet wurden. rechts unten: maschinell alternierende Reciproc Blue Feile R40 (ISO 40) mit einem Taper von 0.06.

Nach der Wurzelkanalaufbereitung wurden die Proben der Gruppen H, K, R und B mit einem grobkörnigen Diamanten unter maximaler Wasserkühlung in orovestibulärer Richtung bis zum Wurzelkanal abgeschliffen. So wurde der Wurzelkanal in Längsrichtung dargestellt. Dabei wurde als Orientierung in jeden Zahn die zuletzt verwendete Feile eingeführt. So wurde ein übermäßiger Abtrag vermieden (s. Abbildung 4). Anschließend wurde die beschliffene Oberfläche mit einem feinkörnigen Diamanten poliert. Die Überhänge zum Wurzelkanal wurden zur besseren Sicht in den Kanal geglättet. Die Proben der Kontrollgruppe (Gruppe U) wurden direkt nach Überprüfung der Durchgängigkeit wie oben erläutert präpariert. Dabei wurde zur Kontrolle der Schleifhöhe die C Pilot Feile der ISO Größe 10 eingeführt.

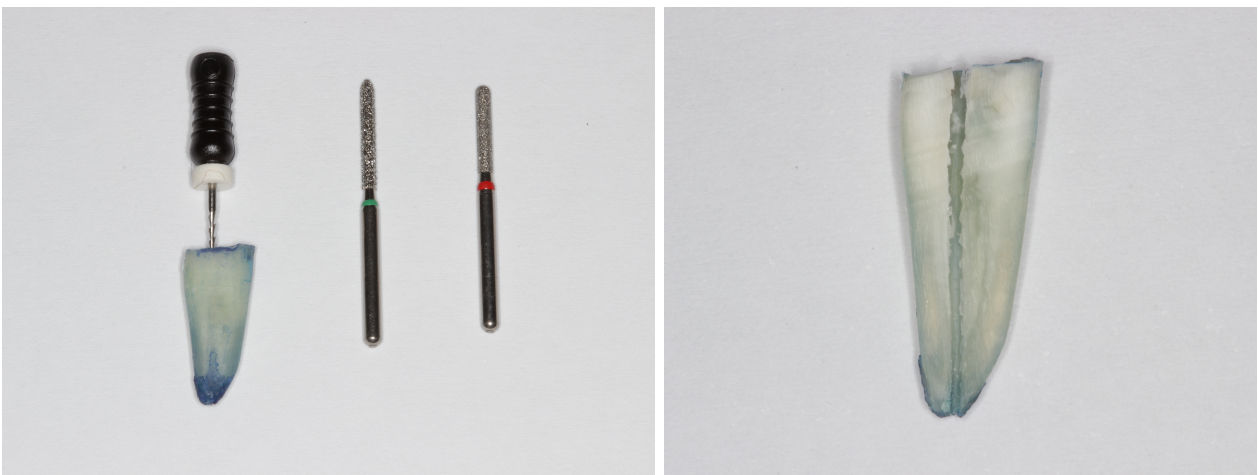


Abbildung 4: Links: Probe H2 mit der eingeführten finalen Feile mit den Diamantschleifern für die Längsabsplattung. Rechts: Probe H5 nach der Aufspaltung

Alle Proben wurden nach der Aufspaltung eine Minute lang in eine 17%ige EDTA Lösung eingelegt. Dies diente der abschließenden Säuberung von Verunreinigungen wie Debris und Gewebsresten. Danach wurden sie mit klarem Wasser ab gespült und zwei Minuten lang in eine 1%ige Methylenblaulösung eingelegt, um Frakturen sichtbar zu machen. Zum Schluss wurden sie noch einmal mit klarem Wasser ab gespült.

4.4 Analyse der Frakturbildung

4.4.1 Lichtmikroskopische Frakturanalyse:

Alle Proben wurden auf einen durchsichtigen Träger gebracht und mit Knetmasse so eingebettet, dass die Rückseite frei von Knetmasse war. Somit konnte die Mikroskopie mit Durchlicht erfolgen. Die beschliffene Seite jeder Probe wurde mit Auf- und Durchlicht bei 200-facher Vergrößerung mit einem 3D Lichtmikroskop aufgenommen (VHX 5000, Keyence, Japan, Epilicht: 255, Durchlicht: 25-110 je nach Dicke der Probe, s. Abbildung 5).



Abbildung 5: 3D Lichtmikroskop VHX 5000, Keyence, Japan.

Alle Strukturen, in die der Farbstoff Methyleneblau eingedrungen ist, wurden als Mikrofrakturen dokumentiert. Es wurden zum einen intrakanaläre Längsfrakturen und zum anderen von der Kanalwand ausgehende, radiäre Frakturen beobachtet und dokumentiert (s. Abbildung 6 und Abbildung 7). Unregelmäßigkeiten im Kanalverlauf oder an der geschliffenen Oberfläche, die Frakturen vortäuschen, wurden durch eine weitergehende Analyse der lichtmikroskopischen Aufnahmen im 3D-Modus ausgeschlossen. Bei jeder Probe wurde sowohl die Anzahl gezählt als auch die Gesamtfrakturenlänge in drei Segmenten

(koronales, mittleres und apikales Drittel) gemessen und errechnet. Die Bestimmung der Gesamtlängendimension erfolgte mit Hilfe von Software des Mikroskops.

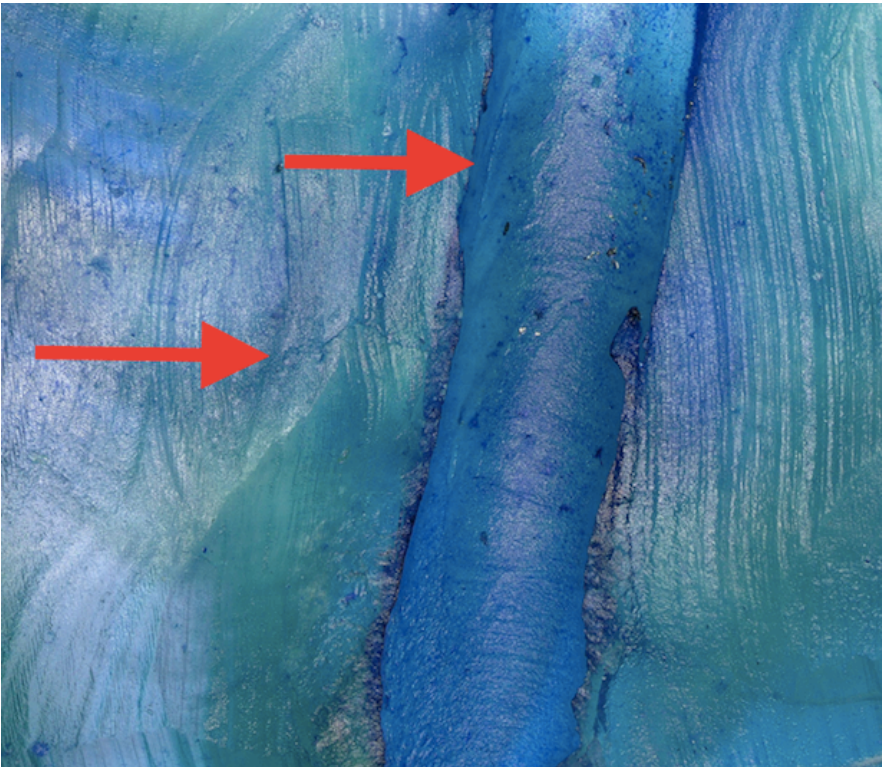


Abbildung 6: Beispiel für eine Längsfraktur und eine radiäre Fraktur. Der obere Pfeil zeigt auf eine intrakanaläre Längsfraktur. Der untere Pfeil zeigt auf eine radiäre Fraktur, die von der Kanalwand nach Peripher verläuft.

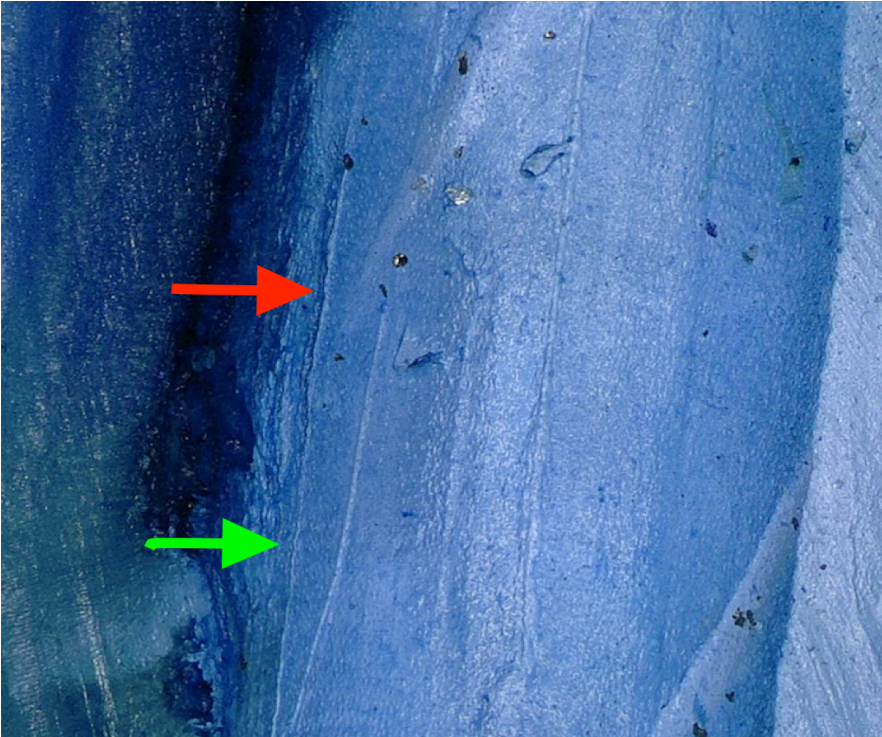


Abbildung 7: Fließender Übergang einer Infraktur (grüner Pfeil, Farbstoff Methylenblau nicht eingedrungen) in eine Längsfraktur (roter Pfeil, Methylenblau ist eingedrungen).

4.4.2 Frakturanalyse durch Mikro CT

Insgesamt vier Proben (U17, K14, B1, H15) wurden mittels Mikro-Computertomographie (μ CT) aufgenommen. Die Mikro CT Aufnahmen wurden auf Mikrofrakturen untersucht und die Befunde mit 3D lichtmikroskopischen Aufnahmen verglichen.

4.5 Statistische Auswertung

Sowohl für Anzahl der Mikrofrakturen als auch für deren Länge wurden Mittelwerte mit Standardabweichungen für die einzelnen Gruppen berechnet. Die Mittelwerte der Gruppen wurden unter Verwendung des Mann-Whitney-U-Tests auf Zugehörigkeit zur selben Grundgesamtheit geprüft. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ wurden die Werte als signifikant unterschiedlich bewertet.

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Vorversuchsreihe

Der Vergleich der lichtmikroskopischen Aufnahmen vor und nach der Aufbereitung hat gezeigt, dass alle Aufbereitungstechniken eine Zunahme der vorhandenen Infrakturen oder eine Neuentstehung von Infrakturen induzierten. (s. Abbildung 8) Ausgeprägte Frakturen konnten nicht festgestellt werden. Nach rasterelektronenmikroskopischer Analyse ausgewählter Proben hat sich zusätzlich herausgestellt, dass es sich bei den meisten beobachteten Defekten um Wurzelzementdefekte, und somit möglicherweise um Artefakte, handelte. (s. Abbildung 9) Im Ergebnis dieser Vorversuche wurden nachfolgend die Wurzelkanäle präparativ freigelegt, um Infrakturen im Inneren der Wurzel erkennen zu können.

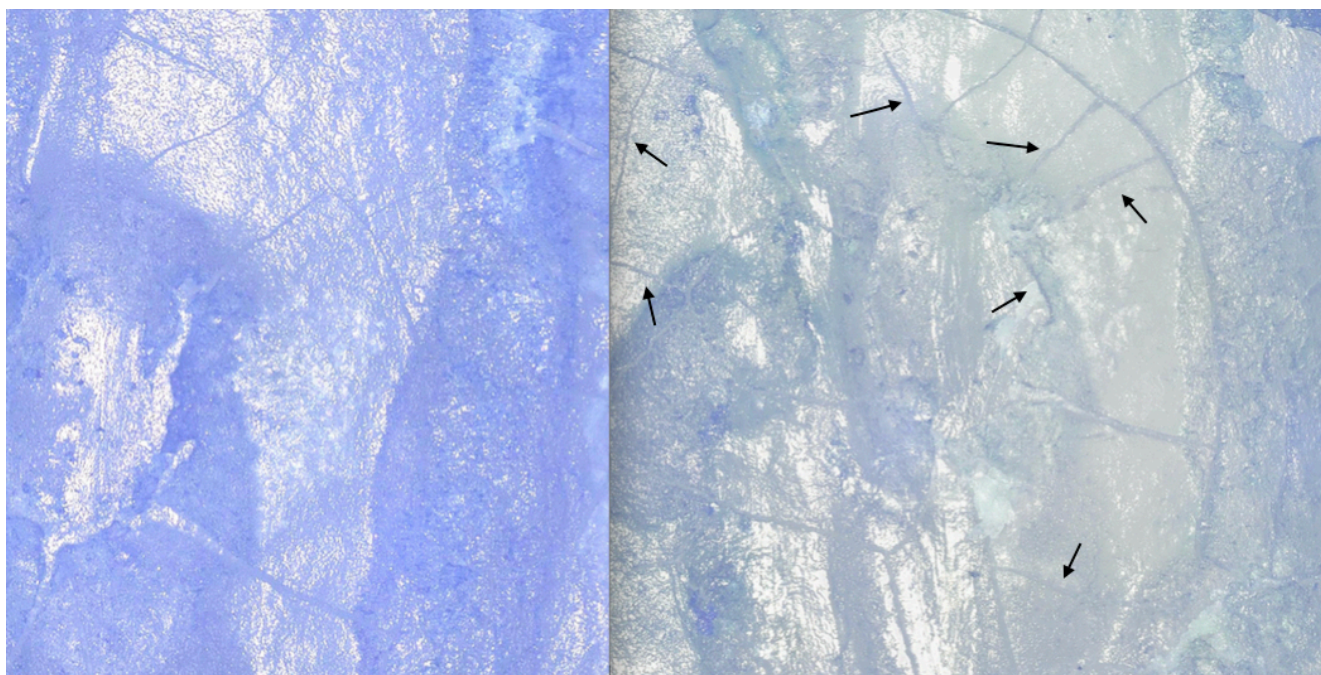


Abbildung 8: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Probe links vor und rechts nach der Aufbereitung. Die schwarzen Pfeile zeigen auf die erweiterten bzw. neuentstandenen Defekte.

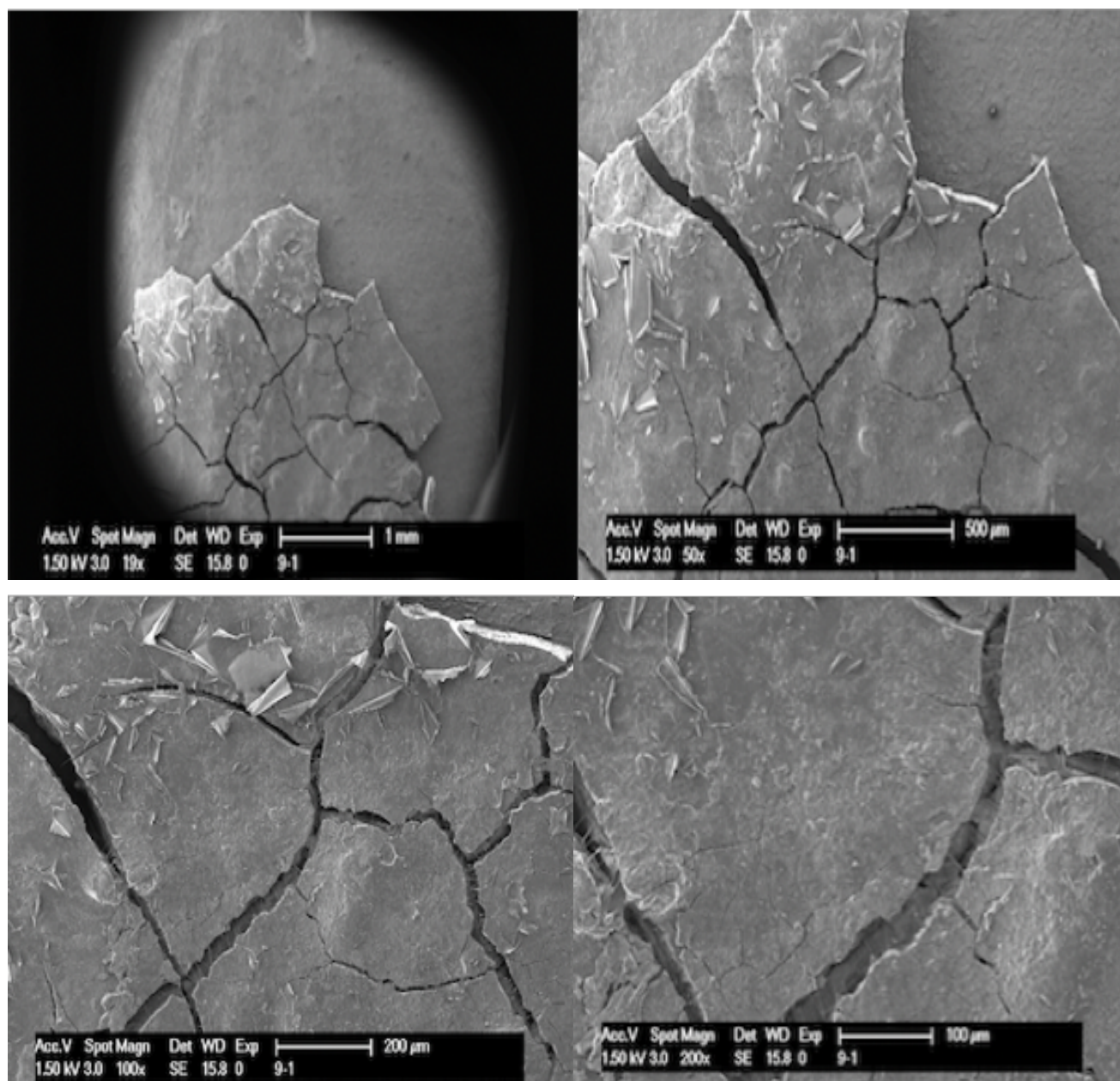


Abbildung 9: Rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Wurzeloberfläche einer Probe nach der Wurzelkanalaufbereitung. Die Aufnahmen zeigen denselben Bereich in verschiedenen Vergrößerungen. Die vorhandenen Frakturen verlaufen nur in der oberflächlichen, schollenförmig aufliegenden Zementschicht. Das sich darunter befindende Wurzelkollagen zeigt keine Defekte.

5.2 Die lichtmikroskopische Untersuchung

Im Rahmen dieser Studie wurden insgesamt 80 humane Unterkieferinzisivi untersucht; bei 64 Zähnen wurde eine Wurzelkanalaufbereitung durchgeführt. Es wurden fünf Gruppen zu jeweils 16 Zähnen gebildet. Eine Gruppe wurde als Kontrollgruppe verwendet und nicht aufbereitet (Gruppe U = unbehandelt). Eine Gruppe wurde manuell mit Edelstahl Hedströmfeilen mittels Step Back Technik instrumentiert (Gruppe H = Handaufbereitung, plastische Edelstahllegierung). Zwei Gruppen wurden maschinell alternierend (reziproke

Bewegung) mit Ein-Feilen-Systemen aufbereitet (Gruppe R = Reciproc, Gruppe B = Reciproc Blue, elastische Titanlegierung). Und zuletzt wurde eine Gruppe mit einem reduzierten Mehr-Feilen-System rotierend aufbereitet (Gruppe K = Komet F6 Sky Taper mit zwei Feilen, elastische Titanlegierung). Bei den Proben, die maschinell aufbereitet wurden (Gruppe K, R und B), war nach Aufbereitung in den Wurzelkanälen eine 6%ige Konizität präpariert worden (Taper 0.06). Die manuell aufbereiteten Proben (Gruppe H) wiesen einen apikalen Taper von 0.05 auf. Für die Analyse der Defektbildung wurde von jeder Probe mittels 3D Lichtmikroskop (VHX Keyence, Japan) eine Aufnahme unter 200-facher Vergrößerung angefertigt. Bei zwei Proben wurde eine deutliche Fraktur der Wurzel beobachtet (s. Abbildung 10). Bei allen anderen beobachteten Defekten handelt es sich um Mikrofrakturen.

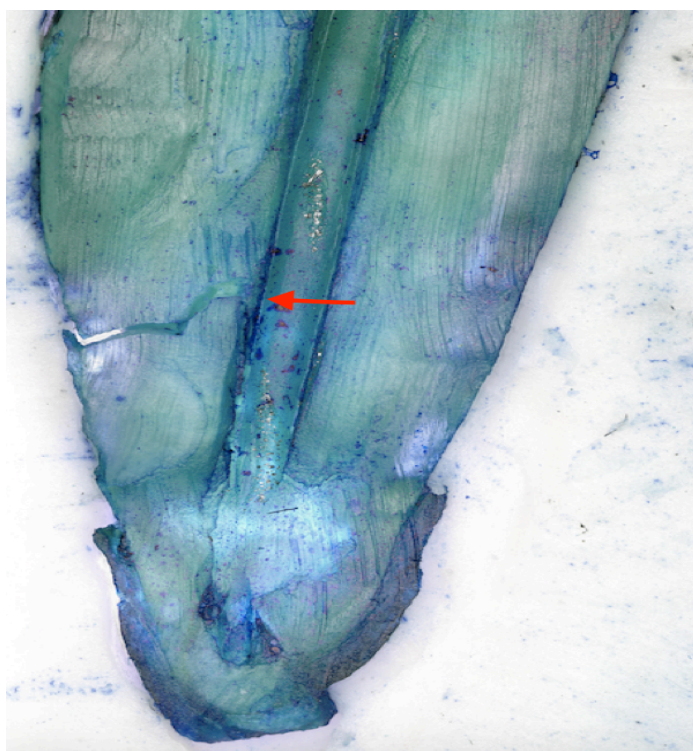


Abbildung 10: Fraktur an der linken Kanalwand der Probe K11 nach der Aufbereitung mit dem maschinell rotierendem System F6 Sky Taper. Die Frakturlinie verläuft quer von der Kanalinnenwand bis zur Wurzeloberfläche.

Bei der lichtmikroskopischen Untersuchung aller Gruppen fanden sich sowohl in der Kontrollgruppe als auch in den anderen Gruppen kleine horizontale Frakturen an der Wurzeloberfläche. Da die Proben der Kontrollgruppe nicht wurzelaufbereitet waren, wird angenommen, dass diese Frakturen während der Extraktion entstanden sind. Bei dieser Studie wurde zwischen axialen (parallel zur Zahnachse) und radialen (radial vom Wurzelkanal ausgehend) Frakturen unterschieden. Diese wurden nach deren Lage in drei Abschnitten dokumentiert: koronal, mittig und apikal (s. Abbildungen 23 - 27 im Anhang).

5.2.1 Anzahl der Mikrofrakturen

In der Kontrollgruppe (U) wurden keine Frakturen beobachtet. Insgesamt gab es in der Gruppe der Handaufbereitung (Gruppe H) fünf, in der Gruppe Komet F6 Sky Taper (Gruppe K) einen, in der Gruppe Reziprok (Gruppe R) fünf und in der Gruppe Reziprok Blue (Gruppe B) acht frakturfreie Zähne.

Folgende Abbildungen stellen die Verteilung von Anzahl der axialen und radialen Frakturen in den getesteten Gruppen in Form von Boxplot Diagrammen dar: (s. Abbildung 11 und Abbildung 12)

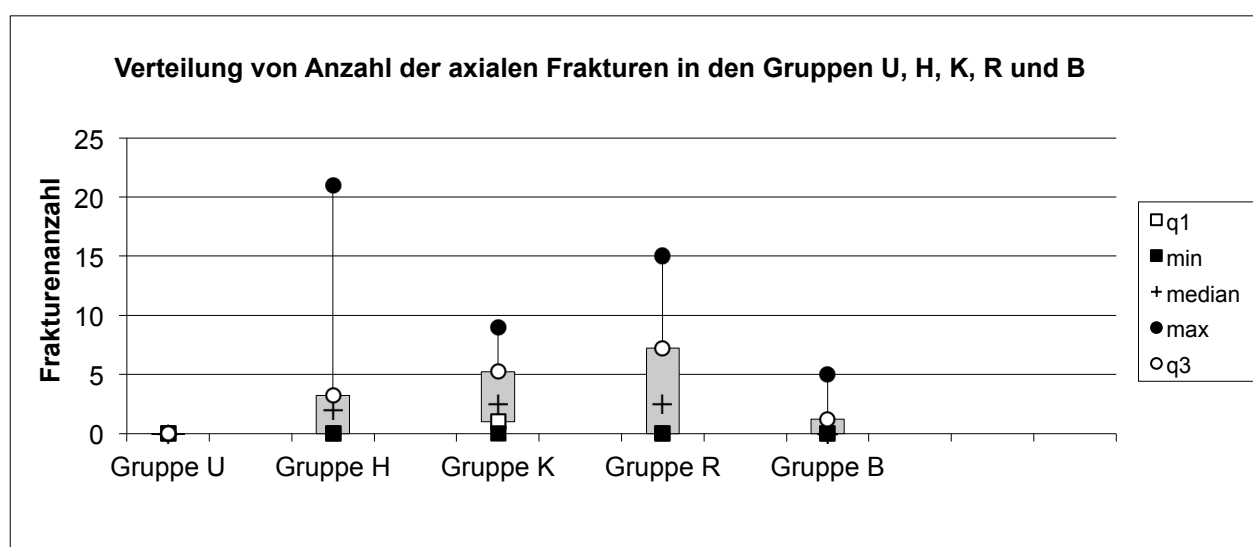


Abbildung 11: Verteilung der Anzahl der axialen Frakturen in den Gruppen U, H, K, R und B

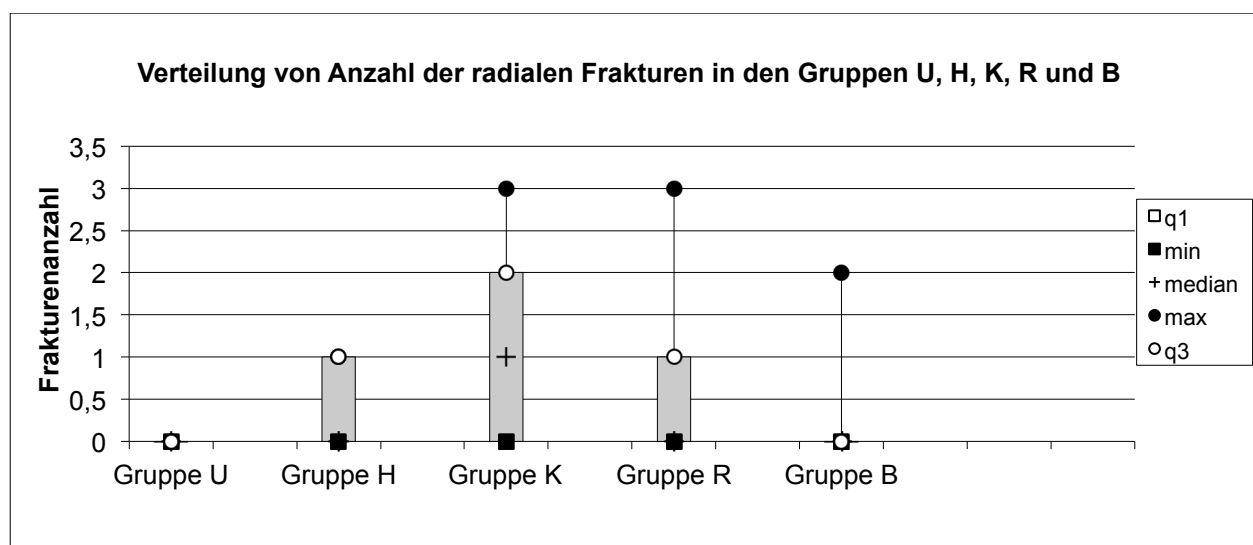


Abbildung 12: Verteilung der Anzahl der radialen Frakturen in den Gruppen U, H, K, R und B

Die größte Anzahl der axialen Frakturen wurde bei dem maschinell alternierendem Ein-Feilen-System Reciproc (Gruppe R) beobachtet. Die meisten radialen Frakturen an der

Kanalwand verursachte dagegen das maschinell rotierende Mehr-Feilen-System Komet F6 Sky Taper (Gruppe K). Insgesamt gab es die größte Anzahl an Frakturen und den größten Mittelwert in der Gruppe Reciproc (Gruppe R). Bei der Handaufbereitung fand sich die größte Standardabweichung. Alle Aufbereitungssysteme verursachten mehr axiale Frakturen als radiale Frakturen. Die kleinste Anzahl an Frakturen, der kleinste Mittelwert und die kleinste Standardabweichung wurde bei dem maschinell alternierendem Ein-Feilen-System Reciproc Blue (Gruppe B) beobachtet (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Verteilung der axialen und radialen Frakturen

	AXIAL	RADIAL	SUMME	MWERT	STAABW
GRUPPE U	0	0	0	0	0
GRUPPE H	53	5	58	3,62	5,43
GRUPPE K	49	16	65	4,31	2,79
GRUPPE R	62	10	72	4,5	4,95
GRUPPE B	16	4	20	1,25	1,77

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

SUMME: Summe aller beobachteten Frakturen

MWERT: Mittelwert von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

STAABW: Standardabweichung von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

GRUPPE U: Kontrollgruppe

GRUPPE H: Handaufbereitung

GRUPPE K: Aufbereitung mit dem System Komet F6 Sky Taper

GRUPPE R: Aufbereitung mit dem System Reciproc

GRUPPE B: Aufbereitung mit dem System Reciproc Blue

Koronal und apikal verursachte das maschinell alternierende Ein-Feilen-System Reciproc die größte Anzahl an Frakturen. Im mittleren Drittel lag es die größte Anzahl an Frakturen bei dem maschinell rotierendem Mehr-Feilen-System Komet F6 Sky Taper (Gruppe K). Die Proben der Handaufbereitung und des Reciproc Systems wiesen die meisten apikalen Frakturen auf. Die Proben des Komet F6 Sky Taper (Gruppe K) und des maschinell alternierendem Ein-Feilen-System Reciproc Blue (Gruppe B) wiesen die meisten Frakturen im mittleren Drittel auf. Insgesamt gab es die kleinste Anzahl an Frakturen bei der Aufbereitung mit dem Reciproc Blue System (Gruppe B) (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Verteilung der Anzahl von Frakturen im koronalen, mittleren und apikalen Drittel.

	K	M	A
GRUPPE U	0	0	0
GRUPPE H	6	25	27
GRUPPE K	9	40	19
GRUPPE R	20	23	34
GRUPPE B	3	10	7

K: Frakturen im koronalen Segment

M: Frakturen im mittleren Segment

A: Frakturen im apikalen Segment

GRUPPE U: Kontrollgruppe

GRUPPE H: Handaufbereitung

GRUPPE K: Aufbereitung mit dem System Kommet F6 Sky Taper

GRUPPE R: Aufbereitung mit dem System Reciproc

GRUPPE B: Aufbereitung mit dem System Reciproc Blue

5.2.2 Gesamtfrakturenlänge

Es wurde die Gesamtfrakturenlänge der axialen Frakturen und der radialen Frakturen im koronalen, mittleren und apikalen Drittel errechnet.

Folgende Abbildungen zeigen die Dokumentation der Frakturbildung anhand jeweils einer Beispielaufnahme pro Versuchsgruppe: (s. Abbildung 13-16)

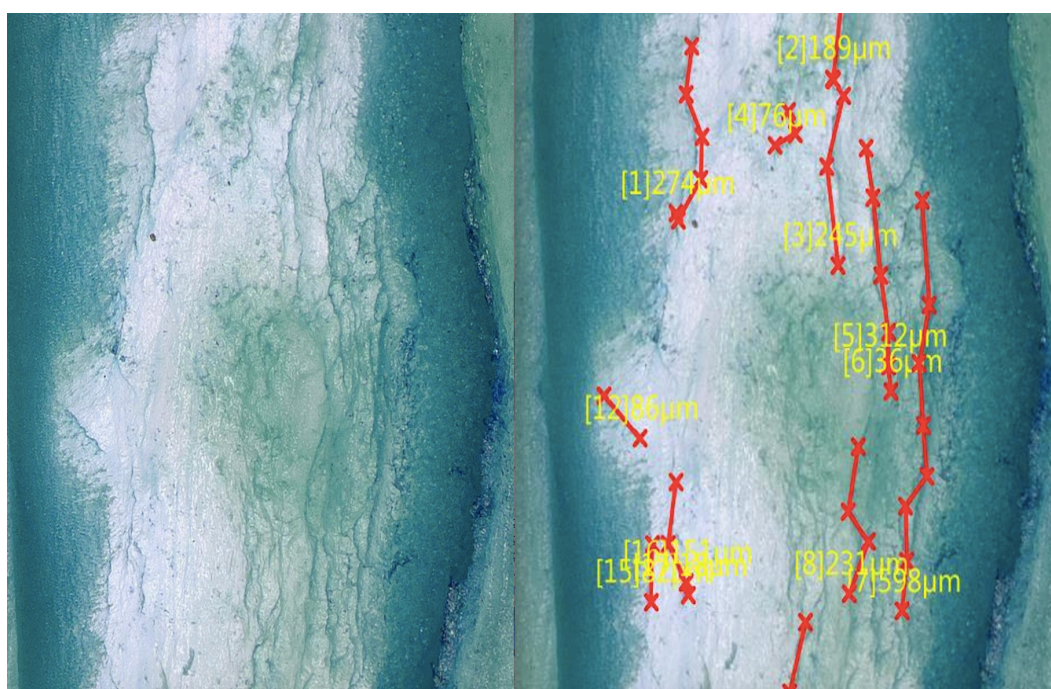


Abbildung 13: Vergrößert dargestellte Längsfrakturen im Kanal nach der Handaufbereitung der Probe H15 (links) und deren Messung in Mikrometer (rechts).

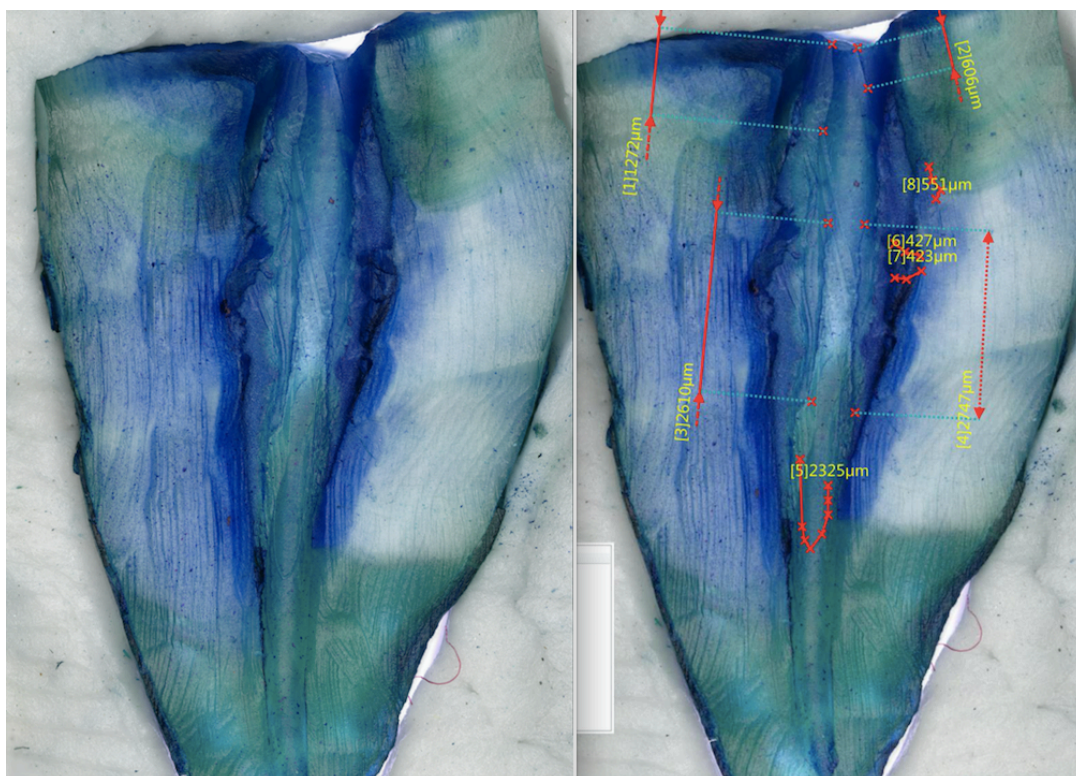


Abbildung 14: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe K14 nach der Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper (links) und Messung der Längsfrakturen in Mikrometer (rechts).

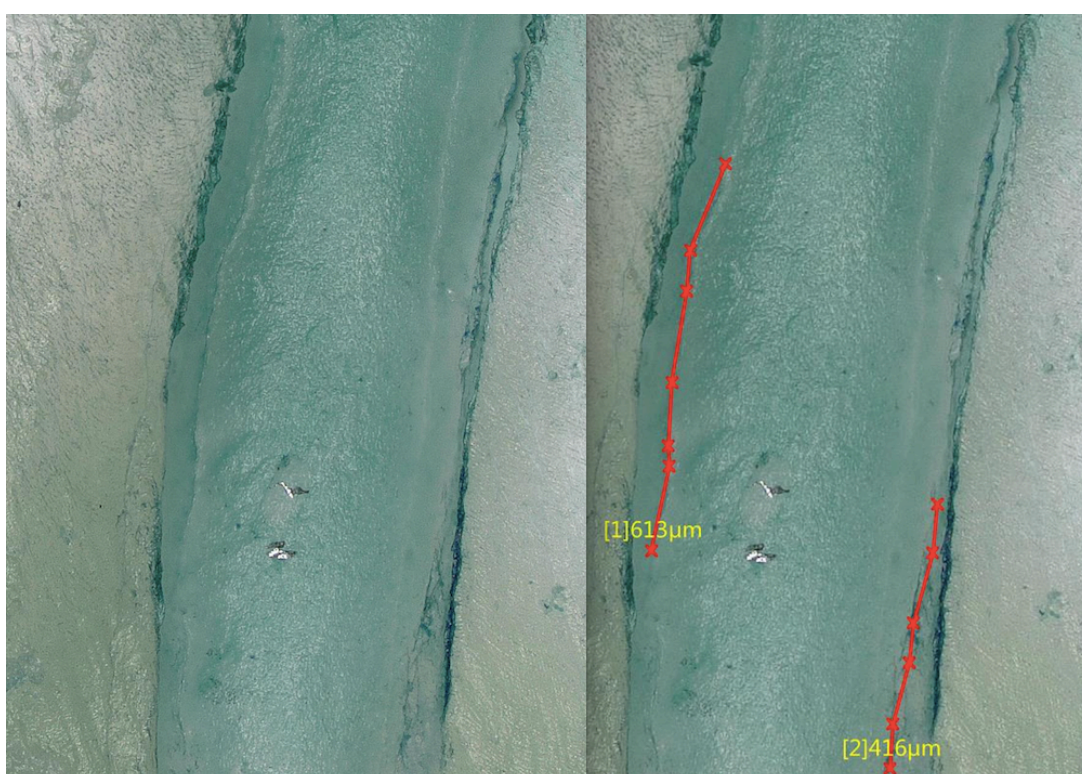


Abbildung 15: Vergrößerte Darstellung der axialen Mikrofrakturen an der Kanalwand der Probe B9 nach der Aufbereitung mit Reciproc Blue (links) und deren Messung in Mikrometer (rechts).

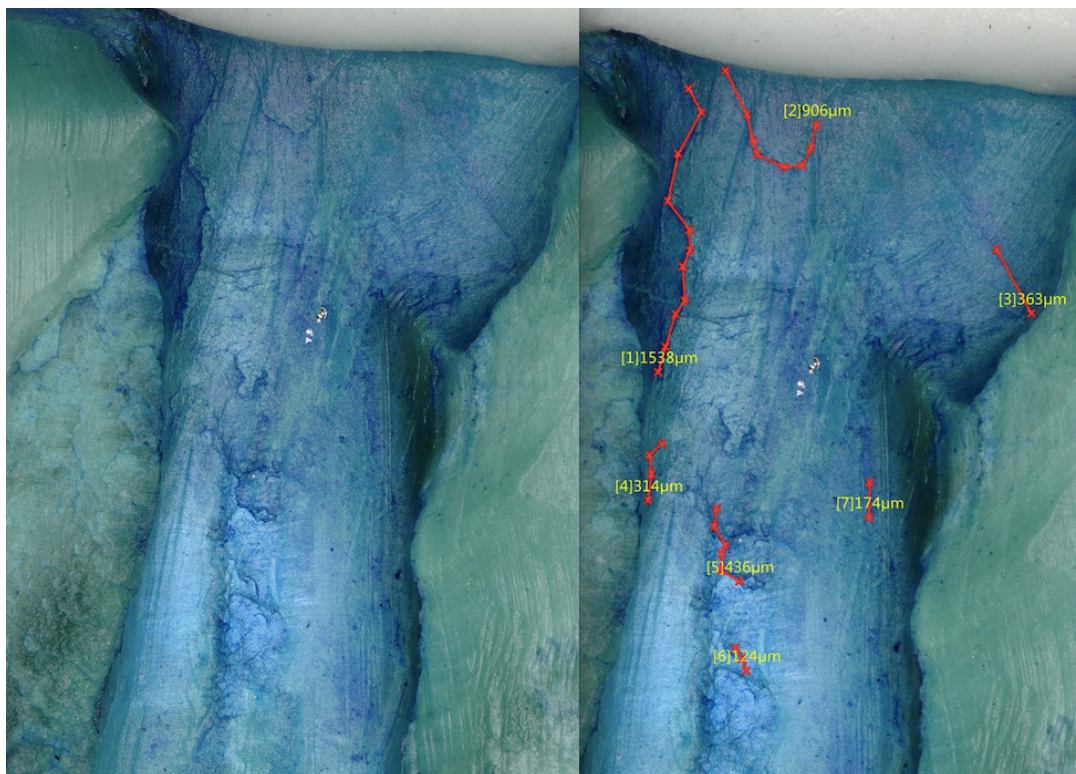


Abbildung 16: Vergrößerte Darstellung der axialen Mikrofrakturen an der Kanalwand der Probe R14 nach Aufbereitung mit dem Reciproc (links) und deren Messung in Mikrometern (rechts).

Folgende Abbildungen stellen die Verteilung der axialen und radialen Gesamfrakturlänge in Form von Boxplotdiagrammen dar: (s. Abbildung 17 und Abbildung 18)

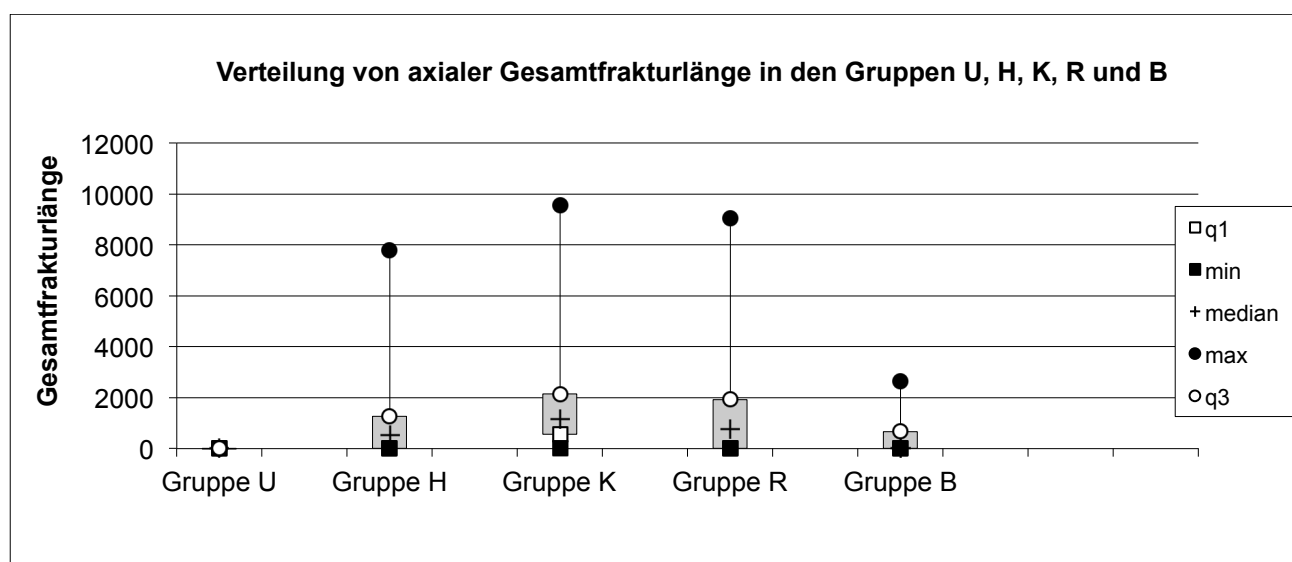


Abbildung 17: Verteilung von axialer Gesamfrakturlänge in μm in den Gruppen U, H, K, R und B

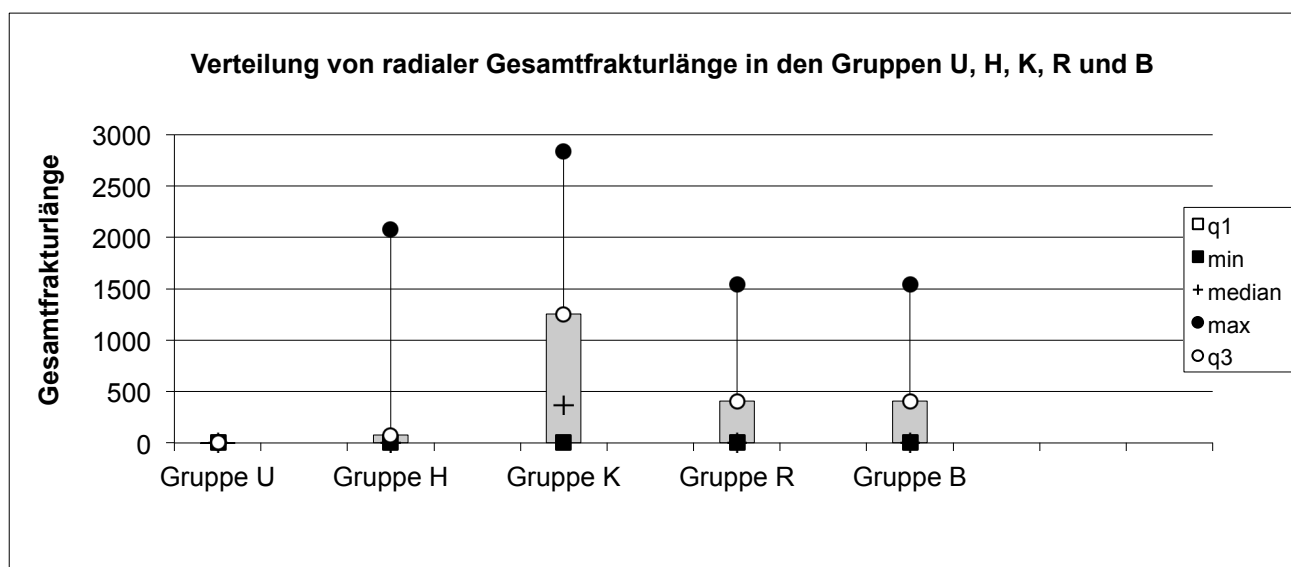


Abbildung 18: Verteilung von radialer Gesamfrakturlänge in μm in den Gruppen U, H, K, R und B

Die größte Gesamfrakturlänge war sowohl axial als auch radial bei dem maschinell rotierenden Mehr-Feilen-System Komet F6 Sky Taper (Gruppe K) festzustellen. Die größte mittlere Längsfrakturlänge gab es bei dem maschinell rotierenden System Komet F6 Sky Taper (Gruppe K). Die größte mittlere Frakturlänge der radiären Frakturen wurde bei der Gruppe der Handaufbereitung beobachtet (Gruppe H). Insgesamt gab es bei dem maschinell rotierenden Aufbereitungssystem (F6 Sky Taper, Gruppe K) die größte mittlere Gesamfrakturlänge. (s. Tabelle 3)

Tabelle 3: Summen der Längsfrakturlänge (AXIAL) und Länge der radiären Frakturen (RADIAL) und Mittelwerte der Frakturlängen (in Klammern), gemessen in Mikrometer

	AXIAL	RADIAL	SUMME
GRUPPE U	0	0	0
GRUPPE H	17148 (323,54)	4014 (802,8)	21162 (364,86)
GRUPPE K	32076 (654,61)	11920 (745)	43996 (676,86)
GRUPPE R	29789 (480,46)	3947 (394,7)	33736 (468,55)
GRUPPE B	8157 (509,81)	1158 (289,5)	9315 (465,75)

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden

SUMME: Summe der Frakturlängen

GRUPPE U: Kontrollgruppe

GRUPPE H: Handaufbereitung

GRUPPE K: Aufbereitung mit dem System Komet F6 Sky Taper

GRUPPE R: Aufbereitung mit dem System Reciproc

GRUPPE B: Aufbereitung mit dem System Reciproc Blue

In Klammern: Mittlere Frakturlänge: Frakturlänge dividiert durch Frakturanzahl

Koronal fand sich die größte Gesamfrakturlänge mit 11785 Mikrometern bei dem maschinell alternierendem Ein-Feilen-System Reciproc (Gruppe R). Im mittleren und im apikalen Drittel gab es die größte Gesamfrakturlänge bei dem maschinell rotierendem Mehr-Feilen-System Komet F6 Sky Taper (Gruppe K). Die größten mittleren Frakturlängen wurden in allen drei Segmenten bei der maschinell rotierenden Aufbereitung beobachtet (F6 Sky Taper, Gruppe K) (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Verteilung der Frakturlänge und mittlere Frakturlängen (in Klammern) im koronalen, mittleren und apikalen Segment gemessen in Mikrometer

	K	M	A
GRUPPE U	0	0	0
GRUPPE H	4272 (712)	9356 (374,24)	7534 (279,03)
GRUPPE K	6526 (725,11)	28158 (703,95)	9312 (490,10)
GRUPPE R	11785 (589,25)	15361 (667,87)	6590 (193,82)
GRUPPE B	1402 (467)	5640 (564)	2273 (324,71)

K: Frakturen im koronalen Segment

M: Frakturen im mittleren Segment

A: Frakturen im apikalen Segment

GRUPPE U: Kontrollgruppe

GRUPPE H: Handaufbereitung

GRUPPE K: Aufbereitung mit dem System Komet F6 Sky Taper

GRUPPE R: Aufbereitung mit dem System Reciproc

GRUPPE B: Aufbereitung mit dem System Reciproc Blue

In Klammern: Mittlere Frakturlänge: Frakturlänge dividiert durch Frakturanzahl

5.2.3 Statistische Auswertung

In den nicht wurzelkanalbehandelten Zähnen wurden keine Frakturen gefunden. Demzufolge wiesen alle Gruppen wurzelkanalbehandelter Zähne signifikant mehr Frakturen auf.

Die handinstrumentelle Aufbereitung wurde mit der maschinellen Aufbereitung verglichen. Bei der Anzahl der Frakturen gab es keine signifikanten Unterschiede. Bei der Gesamfrakturlänge gab es nur einen geringen signifikanten Unterschied ($p=0,0455$) zwischen der Handinstrumentierung (Gruppe H) und der Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper (Gruppe K). Die Summe der Frakturlängen bei der Gruppe K war signifikant größer als die Summe bei der Gruppe H.

Bei den Subanalysen wurden die rotierende Aufbereitung und die reziproke Aufbereitung miteinander und die reziproken Systeme untereinander verglichen. Sowohl bei der Anzahl der Frakturen als auch bei der Gesamfrakturlänge gab es signifikante Unterschiede

zwischen der rotierenden Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper und der reziproken Aufbereitung Reciproc Blue ($p=0,0016$ und $p=0,0024$). Sowohl Anzahl der Frakturen als auch die Gesamtfrakturenlänge war bei der Gruppe K (Komet F6 Sky Taper) signifikant größer als bei der Gruppe B (Reciproc Blue). Zwischen den beiden reziproken Systemen Reciproc und Reciproc Blue gab es weder bei der Anzahl der Frakturen noch bei der Gesamtfrakturenlänge signifikante Unterschiede.

5.3 Mikro CT Untersuchung:

Insgesamt vier Proben (U17, H15, K14 und B1) wurden repräsentativ durch Mikro-CT untersucht: Zwei Proben, die bei der lichtmikroskopischen Untersuchung die meisten Frakturen zeigten (H15 und K14), und zwei Proben, bei denen keine Frakturen beobachtet wurden (U17 und B1). Die Mikro-CT Aufnahmen wurden mit den lichtmikroskopischen Aufnahmen verglichen. Es gab nur eine Mikrofraktur, die sich im Mikro-CT genauso darstellte wie auf der lichtmikroskopischen Aufnahme. Diese betraf die Probe K14 und befand sich direkt am Kanaleingang. Im Kanal wurden im Mikro-CT keine Längsfrakturen beobachtet. Es wurden radiäre Infrakturen dargestellt, die auf den lichtmikroskopischen Aufnahmen nicht sichtbar gewesen waren.

Bei der Probe H15 (Handaufbereitung) wurden insgesamt fünf radiale Infrakturen dargestellt. Davon war eine koronal und die anderen mittig (s. Abbildung 19).

Bei der Probe K14 (Komet F6 SkyTaper) wurden insgesamt zwei Infrakturen dargestellt. Davon war eine axial und befand sich im Kanal, die andere war eine radiale Fraktur. Beide waren koronal gelegen (s. Abbildung 20 und Abbildung 21).

Bei der Probe B1 (Reciproc Blue) wurden insgesamt drei Infrakturen beobachtet: Eine apikal radiale, eine koronal radiale und eine koronal axiale Fraktur (s. Abbildung 22).

Bei der Probe U17 (unaufbereitet, Kontrollgruppe) wurden keine Infrakturen beobachtet.

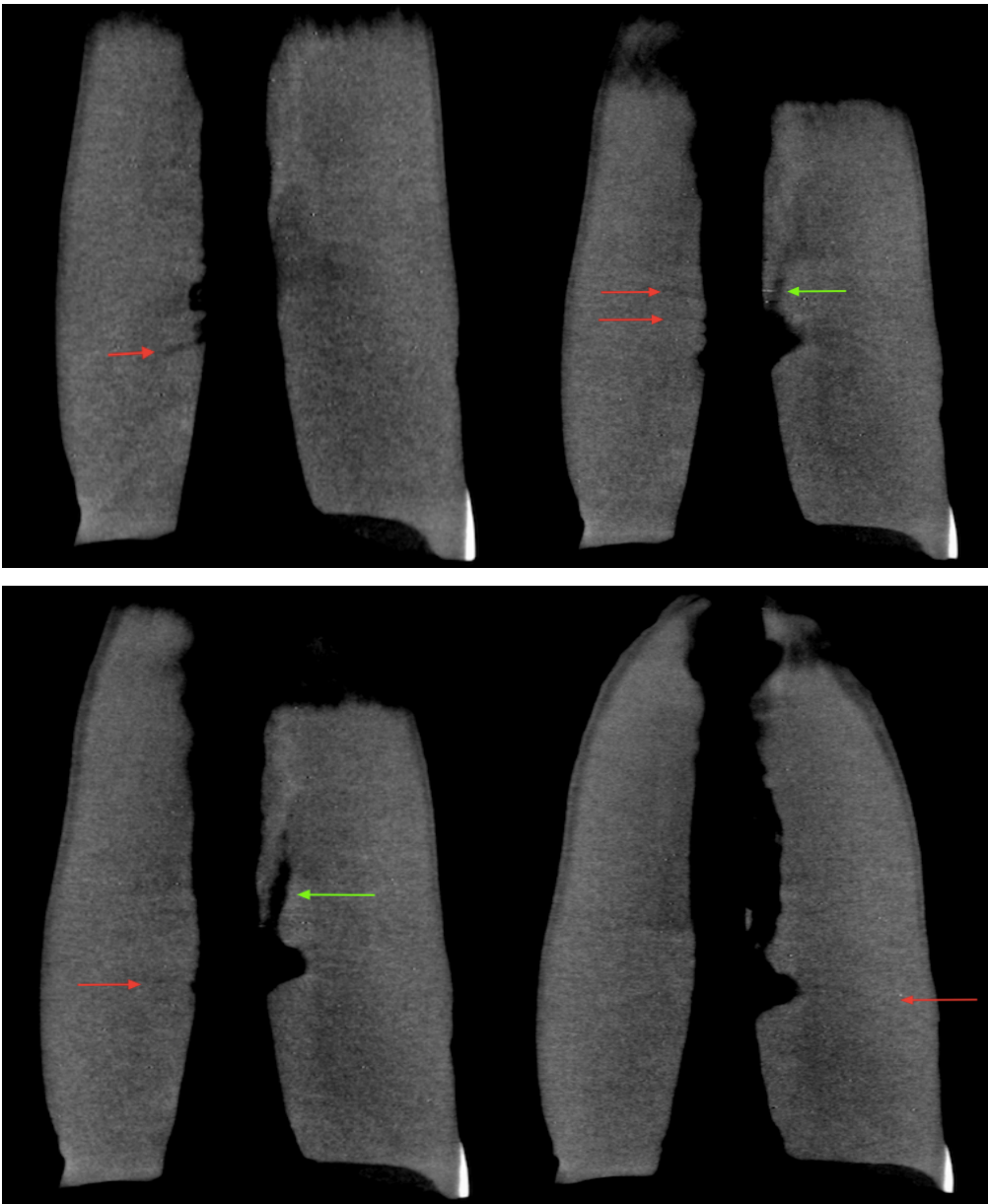


Abbildung 19: Mikro CT Aufnahmen von der Probe H15 aus der Handaufbereitungsgruppe: Rote Pfeile stellen die beobachteten Querfrakturen dar. Die grünen Pfeile zeigen auf den zweiten Kanal, der sich ab der Mitte des Hauptwurzelkanals abzweigt.

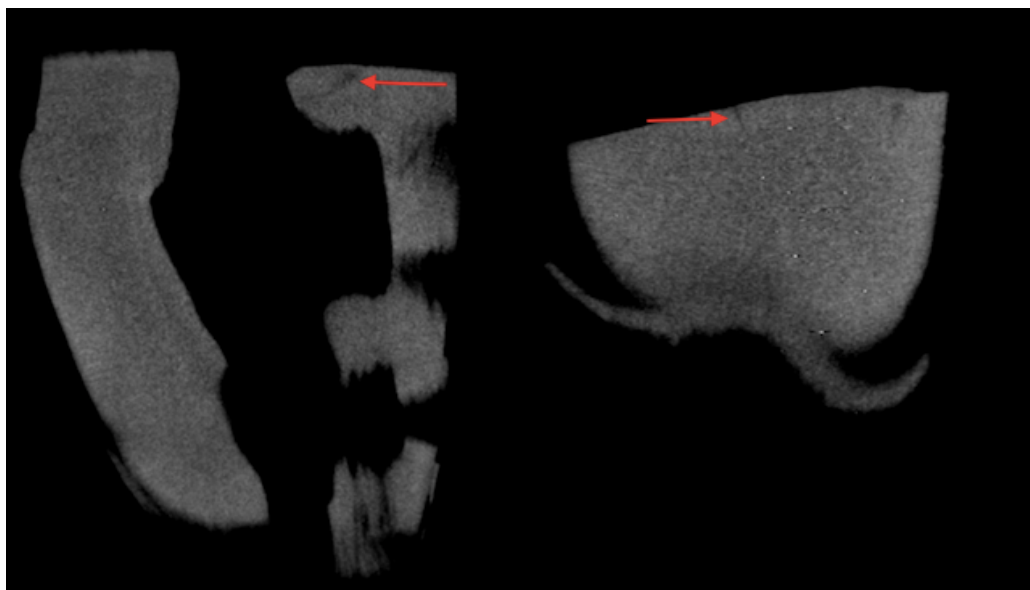


Abbildung 20: Mikro CT Aufnahmen von der Probe K14. Rote Pfeile zeigen auf beobachtete Infrakturen.

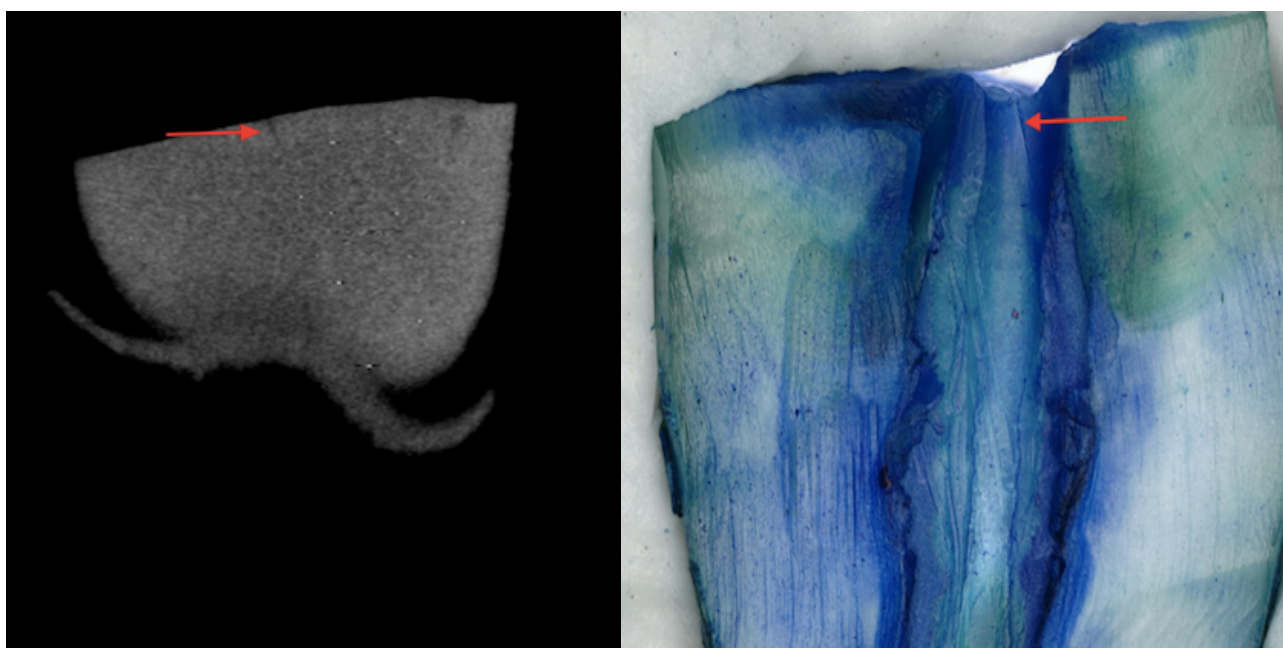


Abbildung 21: Vergleich der Mikro CT Aufnahme der Probe K14 mit der lichtmikroskopischen Aufnahme: Die einzige Mikrofraktur, die auf beiden Aufnahmen zugleich beobachtet wurde. Der Zahn wurde mit der beschliffenen Seite auf dem Träger aufgenommen. So zeigt sich die Fraktur spiegelverkehrt.

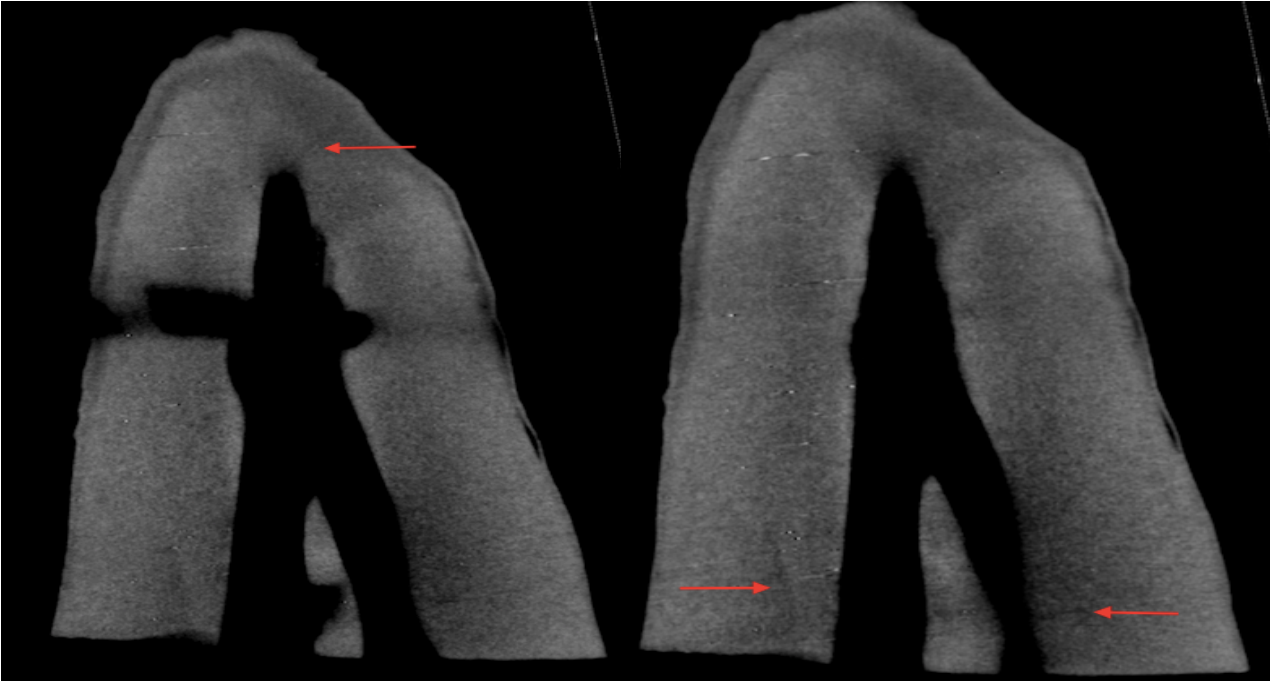


Abbildung 22: Mikro CT Aufnahmen von der Probe B1. Rote Pfeile zeigen auf beobachtete Infrakturen.

6 Diskussion

6.1 Die Schlussfolgerungen aus der Vorversuchsreihe

Die Vorversuchsreihe hatte das Ziel, die Methodik zu optimieren. Folgende Schlussfolgerungen wurden gezogen und für die vorliegende Studie umgesetzt:

1. Das Einbetten der Proben in Silikon und Alabastergips zur Simulation des Zahnhalteapparates hatte die Folge, dass es mit den maschinellen Systemen trotz vorher festgelegter Arbeitslänge fast immer zu einer Überinstrumentierung kam. Deswegen wurden die Proben nachfolgend während der Aufbereitung in der Hand fixiert. So war eine aktive Sichtkontrolle möglich und es kam nicht zu Überinstrumentierungen.
2. Die meisten lichtmikroskopisch beobachteten Defekte auf der Wurzeloberfläche waren Wurzelzementfrakturen, die sich im Wurzelentin nicht fortsetzten. Es wurde deshalb keine Analyse der Wurzeloberflächen vorgenommen. Die Wurzelkanäle wurden nachfolgend in der Längsrichtung schonend durch Schleifen geöffnet, um den Wurzelkanal in seiner gesamten Länge darzustellen und ihn auf Frakturen an der Wurzelkanalwand zu untersuchen.

6.2 Kritische Betrachtung der eigenen Untersuchung

Bei einer irreversiblen Schädigung der Pulpa ist die Wurzelkanalbehandlung die einzige Alternative zur Zahnextraktion. Die Aufbereitung mit maschinellen Ni-Ti-Systemen wird dabei wegen der besseren Effizienz der Behandlung immer populärer (Azar and Mokhtare, 2011; Brkanic et al., 2005; Glossen et al., 1995). In der Absicht die maschinellen Systeme effizienter zu machen, hat die Industrie immer aggressivere Feilen auf den Markt gebracht. Es wurden Untersuchungen publiziert, die häufige Defektbildung in der geschwächten Dentinwand (Bier et al., 2009; Jamleh et al., 2015; Shemesh et al., 2009; Shemesh et al., 2011; Shemesh et al., 2010) oder Reinfektionen durch die bakterielle Besiedelung in den Defekten (Kahler et al., 2000) beschrieben. In dieser Studie wurde die Frakturentwicklung bei vier verschiedenen Aufbereitungsmethoden untersucht und miteinander verglichen. Dies waren die maschinell-alternierende Aufbereitung mit Reciproc sowie mit Reciproc Blue, die maschinell-vollrotierende Aufbereitung mit F6 Sky Taper und die Handaufbereitung mit Step-back Technik.

Die Methodik

In der Literatur sind endodontische Studien vorhanden, die sowohl mit künstlichen Wurzelkanälen als auch mit extrahierten, humanen Zähnen durchgeführt wurden. Bei den künstlichen Versuchsblöcken aus Acrylharz ist eine Standardisierung der Kanalanatomie wie Durchmesser, Länge und Krümmung möglich. Natürliche Zähne weisen unterschiedliche Kanalmorphologien auf und unterscheiden sich zum Teil auch in der Dentinhärte. Allerdings sind die Härte von Acrylharz und der Materialabtrag nicht identisch zum Dentin (Hülsmann et al., 2005). In dieser Studie wurde die Frakturbildung nach einer Wurzelkanalaufbereitung untersucht. Dafür eignen sich Kunststoffblöcke nicht, da die Härte und das Elastizitätsmodul nicht mit dem Wurzelentin übereinstimmen. Es wurden extrahierte humane Zähne verwendet, um möglichst praxisnahe Ergebnisse zu erhalten. Die Proben waren Unterkieferinzisivi. Sie besaßen grazile Wurzel und oval geformten Wurzelkanäle. Bei grazilen, dünnen Wurzeln sind eher Frakturen durch die Wurzelkanalaufbereitung zu erwarten. Zudem wird die ovale Form mit runden Instrumenten nicht optimal aufbereitet, womit übermäßig aufbereitete Wurzelkanalbereiche entstehen und mehr Dentindefekte in diesen Bereichen zu erwarten sind. Bei der Auswahl der Zähne wurde auf abgeschlossenes Wurzelwachstum, das Vorhandensein eines makroskopisch sichtbaren apikalen Foramen und die Durchgängigkeit geachtet. Bei vielen Studien wurden die Proben vor den Versuchen geröntgt, um Zähne mit mehreren Wurzelkanälen auszusortieren (Karatas, et al., 2015a, Karatas, et al., 2015b, Priya, et al., 2014). In dieser Studie wurden Zähne mit mehreren Wurzelkanälen jedoch nicht aussortiert. Es sollte eine größtmögliche Praxisnähe dargestellt werden, d.h., wenn der zweite Wurzelkanal nicht erreichbar war, wurde er nicht instrumentiert. Die zweiten Kanäle, die unter üblichen Praxisbedingungen gut erreichbar waren, wurden mit der gleichen Methodik aufbereitet.

An allen Zähnen wurden die Zahnkronen entfernt. Dies diente der Erleichterung des Kanalzugangs. Danach wurden die Zähne mit einem feuchten Gazetuch umwickelt, manuell fixiert und aufbereitet. Das feuchte Gazetuch beugte der Austrocknung der Wurzeln während der Aufbereitung vor, um mögliche Artefakte durch Austrocknung zu vermeiden. In der Literatur finden sich mehrere Studien, bei denen die Zähne mit dünnfließendem Silikon ummantelt und danach in Alabastergips eingebettet werden, um so den dentoalveolären Faserapparat zu simulieren (Ceyhanli, et al., 2015, De-Deus, et al., 2014, Karatas, et al., 2015a, Karatas, et al., 2015b). Diese Methode wurde hier bei einer Vorversuchsreihe durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass eine Überinstrumentierung nicht vermieden werden kann, da die Sichtkontrolle fehlt. Eine Überinstrumentierung bedeutet eine stärkere

Belastung im Bereich des Apex und verursacht vermehrt Dentindefekte (Zhou et al., 2015). In der Literatur wird die ideale Aufbereitungslänge als 0-2mm entfernt vom radiographischen Apex beschrieben (Gomes et al., 2015; Ng et al., 2007; Ricucci et al., 2011). Plotino und Mitarbeiter empfehlen die apikale Aufbereitung bis ISO 40, um eine effektive Entfernung von Debris und Smearlayer zu erreichen (Plotino, et al., 2014). Deswegen wurden in dieser Studie alle Proben apikal bis ISO 40 aufbereitet, jedoch alle möglichen Vorkehrungen getroffen, um ein Überinstrumentieren zu vermeiden. Während der Aufbereitung wurde jeder Kanal bei Instrumentenwechsel bzw. nach drei „pecking motions“ mit 17%iger EDTA-Lösung (Speiko, Deutschland) und 5%iger NaOCl-Lösung (Speiko, Deutschland) im Wechsel gespült und das Instrument von Dentinspänen befreit. Insgesamt wurden pro Kanal 2 ml EDTA- und 2 ml NaOCl-Lösung zur Keimeliminierung und Schmierschichtentfernung verwendet. Durch Stehenlassen der NaOCl-Lösung im Kanal während der Aufbereitung wurde eine Verblockung des Kanalsystems vermieden und NaOCl wurde zusätzlich als Transport- und Schmiermedium genutzt. Laut Stellungnahme der DGZMK ist die NaOCl-Spüllösung in der Konzentration zwischen 0,5%-5% das Mittel der Wahl (C. Bartel, 2006). Zusätzlich wurde bei allen Proben 15%iges EDTA Gleitgel (Filecare, VDW, Deutschland) verwendet. Wong und Mitarbeiter stellten 2014 fest, dass EDTA-haltige Gleitmittel gegenüber anderen Gleitmittel die besten antibakteriellen Eigenschaften im Wurzelkanal zeigen (Wong et al., 2014). Da EDTA als Chelator die Dentinhärte verringert, führt dieses Präparat zu einer gesteigerten Abtragleistung der Wurzelkanalinstrumente. Die Verwendung des EDTA Gleitmediums in der vorliegenden Studie erleichterte somit die Aufbereitung und verringerte zusätzlich das Risiko der Defektbildung im Wurzelentin.

Anschließend wurden alle Proben mit Hilfe eines grobkörnigen Diamanten in der Längsrichtung unter maximaler Wasserkühlung bis auf den Wurzelkanal abgeschliffen. Durch die Insertion der finalen Aufbereitungsfeile wurde ein übermäßiger Dentinabtrag vermieden. Danach wurde die Oberfläche mit Feinkorndiamanten poliert. Alle Proben wurden zur Säuberung von Gewebsresten und Debris im Kanal für eine Minute in 17%ige EDTA Lösung eingelegt und anschließend zwei Minuten lang mit 2%igem Methylenblau angefärbt. Um die Defektentstehung durch das Abschleifen der Zähne auszuschließen, wurde die Kontrollgruppe genauso auf Frakturen analysiert. Hier wurden in den untersuchten Bereichen (im Wurzelkanal und an der Wurzelkanalwand) keine Frakturen beobachtet. Allerdings wurden in der Kontrollgruppe häufiger Mikrofrakturen an der Wurzeloberfläche beobachtet, die auch die Proben der anderen Gruppen zeigten. Diese Defekte sind vermutlich während der Extraktion entstanden und wurden in dieser Untersuchung nicht weiter berücksichtigt. Die

in der Literatur vorhandenen Studien, die für die Frakturanalyse eine mikroskopische Untersuchung heranzogen, nutzten bisher eine 12 bis 60-fache Vergrößerung (Bier, et al., 2009, Burklein, et al., 2013, Gergi, et al., 2015, Kansal, et al., 2014, Priya, et al., 2014). In dieser Studie erfolgte die Frakturanalyse mit Hilfe eines 3D Lichtmikroskops (VHX Keyence, Japan) unter 200-facher Vergrößerung.

Die finale apikale Aufbereitungsgröße (Master apical file = MAF) wurde in dieser Studie als ISO 40 / 0.04 gewählt. Die Literaturrecherche ergab, dass dieses Thema kontrovers diskutiert wird. Plotino und Mitarbeiter hatten festgestellt, dass die Entfernung von Debris und der Smear layer mit der MAF 40 / 0.04 bessere Ergebnisse zeigte, als die Aufbereitung mit MAF 25 / 0.06 (Plotino et al., 2014). Mittal und Mitarbeiter fanden zudem heraus, dass eine breitere apikale Aufbereitung den Heilungsprozess der asymptomatischen periapikalen Parodontitis beschleunigt (Mittal et al., 2016). In der Studie von Paraskevopoulou und Mitarbeiter hatte die Wahl eines größeren Tapers zu einer höheren Bakterienelimination geführt. Dabei wurden Taper 0.04 mit 0.08 verglichen (Paraskevopoulou and Khabbaz, 2016). Im Gegensatz dazu stellten Moshari und Mitarbeiter keinen Vorteil von größerem MAF oder größerem Taper fest. Sie hatten Aufbereitungen mit MAF von 25 / 0.04, 25 / 0.06, 30 / 0.04, 30 / 0.06, 35 / 0.04, 35 / 0.06 und 40 / 0.06 miteinander verglichen. Da es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen in Bezug auf die Bakterien-, Debris- und Smear layer-Elimination gab, empfehlen sie eine apikale Aufbereitung von 25 / 0.04, um die Dentinwand nicht unnötig zu schwächen (Moshari et al., 2015). Hsieh und Mitarbeiter kamen zu dem Ergebnis, dass es bei einer finalen apikalen Aufbereitungsgröße von unter ISO 30 nicht möglich ist, die Spülflüssigkeit in den letzten apikalen Abschnitt zu befördern. Dies liegt daran, dass selbst die dünnste Spülkanüle (27 gauge) bei engen Kanälen nicht bis 3mm vor Apex vordringen kann. Zudem wird eine finale apikale Aufbereitungsgröße über ISO 50 nicht empfohlen, da es bei diesen Wurzelkanälen apikal zu einer Verwirbelung der Spülflüssigkeit kommt und die Entfaltung ihre Wirkung negativ beeinflusst (Hsieh et al., 2007). Prado und Mitarbeiter verglichen in einer Studie die vertikale Frakturanfälligkeit von Wurzeln, die entweder mit der Feile ISO 25 / 0.08 oder mit ISO 45 / 0.02 aufbereitet wurden. Es fand sich kein signifikanter Unterschied (Prado et al., 2015). Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Tabrizizadeh und Mitarbeiter. Kanäle, die apikal auf ISO 25 und ISO 40 aufbereitet wurden, zeigten in Bezug auf die Smear-layer-Entfernung keinen signifikanten Unterschied (Tabrizizadeh and Shareghi, 2015). In einer anderen Studie bewiesen Tabrizizadeh und Mitarbeiter, dass der koronal-apikale Microleakage mit größerer Aufbereitungsgröße befördert wird (Tabrizizadeh et al., 2014).

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die Aufbereitungslänge 1 mm entfernt vom anatomischen Apex gewählt. Dies wird in der Literatur empfohlen. So stellten Ng und Mitarbeiter in einem systematischen Review fest, dass der Therapieerfolg einer Endodontiebehandlung höher ist, wenn die Wurzelfüllung innerhalb der letzten 2 mm vor dem radiographischen Apex endet (Ng et al., 2008). Nach Machado und Mitarbeiter ist die mechanische apikale Durchgängigkeit nicht notwendig, um erfolgreiche Endodontie zu betreiben. Chemische Durchgängigkeit reicht für den Therapieerfolg aus (Machado, 2016). Zudem fanden Liu und Mitarbeiter heraus, dass es weniger apikale Dentindefekte gibt, wenn die Aufbereitungslänge kürzer als das apikale Foramen war (Liu et al., 2013b).

In der Literatur wurde oft die Methodik der horizontalen Fraktionierung verwendet. Hierbei werden die Proben nach der Wurzelkanalaufbereitung im Abstand von 3, 6 und 9 mm vom Apex horizontal mit Wasserkühlung gesägt. Diese Schnitte werden danach unter einem Mikroskop auf Mikrofrakturen untersucht (Bier, et al., 2009, Burklein, et al., 2013, Gergi, et al., 2015, Kansal, et al., 2014, Karatas, et al., 2015a, Karatas, et al., 2015b, Priya, et al., 2014). Somit kann man Frakturen in der kompletten Ausdehnung betrachten. Es lassen sich oberflächliche und tiefer fortlaufende Frakturen einfach voneinander unterscheiden. Allerdings können Haarrisse (craze lines) oder Infrakturen innerhalb der 3 mm Schichten eventuell übersehen werden. Weiterhin nachteilig ist es, dass bei der mehrfachen Teilung Artefakte häufiger zustande kommen können und Ergebnisse verfälscht werden. Bei diesen Studien wurde zwischen 12- und 60-facher Vergrößerung mikroskopiert. Mit 200-facher Vergrößerung bietet unsere Studie die genauere Frakturanalyse.

Die Rasterelektronenmikroskopie bietet eine weitere Möglichkeit der Frakturanalyse. Hierbei ist es vor allem nachteilig, dass die Proben vor der Mikroskopie getrocknet werden müssen, wodurch Artefakte und falsche Ergebnisse entstehen.

Vosen und Mitarbeiter haben in einer ähnlichen endodontischen Studie non-destruktiv gearbeitet. Die Mikrofrakturdarstellung erfolgte hierbei nicht mit Anfärbung sondern Transillumination. Die Proben wurden mit einer Kaltlichtquelle durchleuchtet und anschließend unter dem Mikroskop auf Dentindefekte untersucht. Mithilfe einer speziellen Software wurde die Gesamtfrakturenlänge gemessen und davon die gemessene Frakturenlänge vor der Aufbereitung abgezogen (Vosen, 2013). Der Vorteil dieser Methode ist die schonende Behandlung der Proben, um iatrogene Artefakte zu vermeiden. Nachteilig hierbei ist jedoch, dass fortlaufende Frakturen, Infrakturen in tieferen Schichten oder Frakturen, die von der Kanalinnenwand ausgehen, nicht festgestellt werden können. Im Rahmen unserer

Vorversuchsreihen wurden ebenfalls Zähne aufbereitet und intakt gelassen. Die ganze Wurzeloberfläche wurde mittels 3D- Mikroskop (VHX Keyence, Japan) unter 200-facher Vergrößerung untersucht. Zusätzlich wurden die Zähne mittels Röntgen und Rasterelektronenmikroskopie auf Dentindefekte untersucht. Es zeigte sich, dass die dargestellten Frakturen Zementrisse sind. Wie weit sich diese im Dentin fortsetzten, lies sich mit dieser Methode nicht feststellen.

Die konventionelle Röntgenanalyse ist auch ein Mittel zur Frakturanalyse ohne Fraktionierung. Problematisch jedoch ist, dass ein Frakturspalt nur darstellbar ist, wenn er parallel zum Zentralstrahl oder in einem Winkel von 4 Grad zu jeder Seite liegt (Rud and Omnell, 1970). Außerdem können Haarrisse und Infrakturen durch diese Methode nicht erfasst werden. Eine andere in der Literatur beschriebene, non-destruktive Methode zur Frakturanalyse ist die Mikro Computertomographie (Mikro-CT). Hierbei werden die Proben vor und nach der Aufbereitung mit einer Mikro-CT aufgenommen und die Daten verglichen. Dies ermöglicht eine non-invasive dreidimensionale Darstellung der Frakturen im Dentin (Ceyhanli et al., 2015; De-Deus et al., 2015b; Jamleh et al., 2015). Youssefzadeh und Mitarbeiter haben die Überlegenheit der Computertomographie in der Frakturanalyse gegenüber der konventionellen Radiographie bewiesen (Youssefzadeh et al., 1999). Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden vier repräsentative Proben auch mit Mikro CT aufgenommen. Nur eine Mikrofraktur war im Mikro CT sichtbar. Dafür waren andere Infrakturen zu erkennen. Abgesehen von einer einzigen Längsfraktur waren alle beobachteten Infrakturen radiär von der Kanalwand ausgehend. Dabei ist zu diskutieren, ob sich die drei dimensional aufgenommenen Frakturen nur an der Oberfläche befanden oder alternativ die Auflösung des Mikro CTs nicht hoch genug war, um die kleinsten Dentindefekte zu erfassen und zugleich die Probleme der radiologischen Verstärkung und Auslöschung von Strukturen zu überwinden. 2005 prüften Hannig und Mitarbeiter ein neues FD-VCT (flat panel volume detector computer tomograph) auf die Darstellung der vertikalen Wurzelfrakturen und Mikrofrakturen im Dentin. Wurzelfrakturen und Frakturlinien konnten mit einer räumlichen Auflösung von 140 Mikrometer deutlich dargestellt werden. Edlund und Mitarbeiter beschrieben die Cone beam computed tomography (CBCT) als Mittel der Wahl bei Wurzellängsfrakturen (vertical root fracture= VRF) (Edlund et al., 2011). Hassan und Mitarbeiter verglichen CBCT und konventionelles Röntgenverfahren bei der Befundung der VRFs und stellten fest, dass CBCT dem Röntgenverfahren überlegen ist. Durch die dreidimensionale Darstellung der Frakturlinien aus mehreren Winkeln hat die CBCT eine höhere Sensitivität bei der Detektion von VRFs (Hassan et al., 2009).

6.3 Prüfung der Hypothesen und Vergleich der lichtmikroskopischen Ergebnisse mit der Literatur

1. Zwischen den nicht aufbereiteten und aufbereiteten Wurzeln besteht hinsichtlich der Frakturen kein Unterschied. Diese Aussage konnte nicht bestätigt werden.

Im Rahmen dieser Studie hat sich herausgestellt, dass alle vier Aufbereitungstechniken Dentindefekte verursachten. Es gibt zahlreiche Studien, die voll rotierende Aufbereitungssysteme entweder mit anderen voll rotierenden Systemen oder mit reziproken Aufbereitungssystemen verglichen. So haben Burklein, Ceyhanli, Karatas, Capar, Jamleh und Mitarbeiter herausgefunden, dass alle getesteten maschinellen Systeme Dentindefekte hervorrufen (Burklein et al., 2013; Capar et al., 2014; Ceyhanli et al., 2015; Jamleh et al., 2015; Karatas et al., 2015a; Karatas et al., 2015b).

2. Zwischen Handaufbereitung und maschinellen Aufbereitungssystemen besteht bei der Frakturbildung kein Unterschied. Dies kann nur teilweise bestätigt werden.

Bei der Anzahl der Mikrofrakturen gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen der Handaufbereitung und der maschinellen Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper, Reciproc und Reciproc Blue. Bei der Gesamtfrakturenlänge bestand lediglich zwischen der Handaufbereitung (Gruppe H) und der vollrotierenden Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper (Gruppe K) ein signifikanter Unterschied ($p=0,0455$). So war die Gesamtfrakturenlänge bei der Gruppe K signifikant größer als bei der Gruppe H. Das heißt, die Handaufbereitung war von der Frakturenlänge, nicht aber von der Frakturanzahl her geringfügig schonender als die vollrotierende Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper.

Im Gegensatz zu diesem Ergebnis wurde die Handinstrumentierung in der Literatur bisher häufig als schonendste Methode dargestellt. Bier und Mitarbeiter haben Handinstrumentierung mit rotierenden Ni-Ti Systemen in Bezug auf apikale Frakturbildung verglichen. Dabei wurden Unterkiefer Prämolaren sowohl manuell als auch rotierend maschinell, mit den Systemen ProTaper (Dentsply, Deutschland), ProFile (Dentsply, Deutschland) und S-Apex (FKG Dentaire, Schweiz), aufbereitet. Die Frakturanalyse wurde durch horizontale Fraktionierung und mikroskopische Untersuchung durchgeführt. Die Handaufbereitung verursachte im Gegensatz zu den maschinellen Systemen Pro Taper und ProFile keine apikalen Defekte (Bier, et al., 2009). Ebenso haben Ashwinkumar und Mitarbeiter festgestellt, dass die manuelle Aufbereitung im Vergleich zu den untersuchten maschinellen Systemen ProTaper (rotierend) und WaveOne (reziprok) keine apikalen Defekte induziert. Dabei wurden beide Kanäle der mesialen Wurzeln von ersten

Unterkiefermolaren aufbereitet. Die Frakturanalyse erfolgte durch horizontale Fraktionierung und anschließende Observierung unter Rasterelektronenmikroskop (Ashwinkumar et al., 2014). Yoldas und Mitarbeiter haben bei einer ähnlichen Studie auch die mesialen Wurzeln von Unterkiefermolaren aufbereitet. In dieser Studie wurden die maschinellen Systeme HERO Shaper (Micro-Mega, Frankreich), Revo S (Micro-Mega, Frankreich), Twisted File (Sybron Endo, USA), ProTaper (Dentsply, Deutschland) und Self Adjusting File (SAF) (ReDent Nova, Israel) mit Handaufbereitung durch Ni-Ti Feilen verglichen. Die Untersuchung auf Dentindefekte wurde durch horizontale Fraktionierung und mikroskopische Analyse durchgeführt. Die Handaufbereitung und Aufbereitung mit SAF zeigten im Gegensatz zu den anderen untersuchten maschinellen Systemen keine Mikrofrakturen (Yoldas et al., 2012a). Gao und Mitarbeiter führten eine retrospektive Studie über vertikale Wurzelfrakturen durch. Dabei verglichen sie Zähne, die manuelle Wurzelkanalaufbereitung mit Edelstahl K-Feilen erfahren haben, mit Zähnen, die mit rotierender Ni-Ti Systemen aufbereitet wurden. Die Zähne, die manuell aufbereitet wurden, erfuhren signifikant seltener eine vertikale Wurzelfraktur (Gao and Xu, 2012). Liu und Mitarbeiter verglichen rotierende Aufbereitungssysteme mit Handaufbereitung in Bezug auf apikale Frakturbildung. In dieser Studie wurden Unterkieferinzisivi sowohl manuell mit Ni-Ti K Flex-Feilen als auch maschinell mit den Systemen K3 (Sybron Endo, USA) und ProTaper (Dentsply, Deutschland) aufbereitet. Es wurden Aufnahmen von der apikalen Region vor und nach Instrumentierung mit jedem Instrument angefertigt. Die Frakturanalyse erfolgte non-destruktiv durch Vergleich dieser Aufnahmen. Die maschinell aufbereiteten Wurzeln zeigten mehr apikale Defekte als die manuell aufbereiteten Wurzeln (Liu et al., 2013b). Im Gegensatz dazu verglichen Fleming und Mitarbeiter die traditionelle Endodontiebehandlung mit Edelstahl-Handinstrumenten mit der modernen Aufbereitung mit den maschinellen Ni-Ti Systemen bezüglich des Therapieerfolges. Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen (Fleming et al., 2010). Dies kann man entweder so interpretieren, dass die bei schonender Aufbereitung entstehenden Mikrofrakturen keine Rolle in der klinischen Realität spielen. Es ist aber auch die Interpretation denkbar, dass nicht detektierte Mikrofrakturen sich über die klinische Gebrauchsperiode vergrößern und schließlich zur Gesamtfehlerrate entsprechend beitragen.

Die Verwendung von manuellen Wurzelkanalinstrumenten hat den Vorteil der Taktilität (Guelzow et al., 2005). Das heißt, der Behandler kann mögliche Abweichungen und Irregularitäten im Wurzelkanalverlauf während der Instrumentierung spüren und entsprechen reagieren. Bei einem maschinellen Aufbereitungssystem, bei dem keine zusätzlichen

handinstrumentellen Techniken verwendet werden, wird meistens das ursprüngliche Kanallumen nicht vollständig mechanisch aufbereitet. Dies kommt bei Wurzelkanälen mit einem nicht runden Querschnitt vor. Mithilfe einer Mikro CT Rekonstruktion verglichen De Deus und Mitarbeiter im Jahre 2015 drei maschinelle Systeme (zwei alternierende Ein-Feilen Systeme (Reciproc und Wave One)) mit einem vollrotierenden Mehr-Feilen System (Bio Race) in Bezug auf unaufbereitete Wurzelkanalbereiche bei mesialen Wurzeln von Oberkiefermolaren. Dabei zeigte sich, dass die Systeme sich bei der Aufbereitungssuffizienz nicht signifikant unterscheiden. Allerdings wiesen alle drei Systeme zwischen 27,68 und 60,77 % unaufbereitetes Wurzelkanallumen auf (De-Deus et al., 2015a). Die runde Aufbereitung eines beispielweise ovalen Wurzelkanals presst Mikroorganismen und Debris in die nicht aufbereiteten Wurzelkanalabschnitte und macht diese Bereiche auch für die chemische Reinigung sehr schwer zugänglich. Hinzu kommt der übermäßige Materialabtrag an den dünnen Dentinwänden in mesio-distaler Richtung, die eine Defektentstehung an diesen Stellen begünstigt. Eine nicht drucklose Obturationstechnik und eventuelle postendodontische Maßnahmen zur Restauration des Zahnes könnten eine Fraktur der Wurzel hervorrufen (Wilcox et al., 1997). Gao und Mitarbeiter fanden eine signifikant höhere Frakturnrate bei maschinell rotierend aufbereiteten Zähnen als bei manuell aufbereiteten Zähnen (Gao und Xu, 2012). Je breiter die Wurzelkanalaufbereitung und je steifer das Wurzelkanalinstrument (zum Beispiel wegen größerem Taper oder steifer Legierung), desto höher ist das Frakturrisiko bei der Prozedur der Wurzelkanalfüllung (Kim et al., 2010; Wilcox et al., 1997). Diese Erkenntnisse stellen die Notwendigkeit einer konischen Wurzelkanalpräparation mit einem breiteren apikalen Querschnitt in Frage. Andererseits gibt es desto weniger unaufbereitete Bereiche, je größer die finale apikale Präparation erfolgt (De-Deus et al., 2015a).

Diese Problematik könnten neuartige, selbst zentrierende maschinelle Feilensysteme lösen, die die ursprüngliche Kanalmorphologie beibehalten. Diese Systeme bestehen aus einer ebenso neuartigen hitzebehandelten Nickel-Titan Legierung, die bis zu 40% flexibler ist als herkömmliche Nickel-Titan Instrumente. Ein Beispiel ist das System XP Endo Shaper und Finisher (FKG Dentaire, Schweiz). Dieses Instrument befindet sich bei Raumtemperatur in der martensitischen (plastischen) Phase, wird bei Körpertemperatur zunehmend S-förmig und geht in die austenitische (elastische) Phase über. So kann sie den Wurzelkanal dreidimensional aufbereiten, ohne die ursprüngliche Kanalanatomie zu verändern. Eine andere Entwicklung in der Aufbereitung unregelmäßig geformter Wurzelkanäle ist das SAF-System (self adjusting file, Re Dent Nova, Israel). Dieses Instrument besteht aus einem

rauen, hohlen Nickel-Titan Gitter, das sich je nach Kanalanatomie entweder komprimiert oder gegen die Kanalwände ausspreizt. Somit wird das Wurzelkanalsystem formkongruent aufbereitet. Dieses System ermöglicht zudem die gleichzeitige Spülung des Wurzelkanalsystems mit einem an das Instrument angeschlossenen Schlauch.

Diese Techniken der Wurzelaufbereitung könnte man mit Ultraschall-aktivierter Spüldesinfektion und einer drucklosen Wurzelobturationstechnik kombinieren, um auch mechanisch nicht erreichbare Wurzelkanalabschnitte dicht gegen eine Reinfektion zu verschließen. Dies wäre entweder mit warmer Kondensationstechnik oder mit einem biokeramischen Sealer in Kombination mit biokeramisch beschichteten Guttapercha Stiften möglich.

3. Zwischen den maschinellen Aufbereitungstechniken ist kein Unterschied in Bezug auf Frakturbildung zu finden. Diese Hypothese kann teilweise angenommen werden.

Der Vergleich der maschinellen Aufbereitungssysteme untereinander hat ergeben, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen K und B gibt. Die reziproke Aufbereitung mit Reciproc Blue hat sowohl bei der Anzahl der Frakturen als auch bei der Gesamtrakturlänge signifikant weniger Dentindefekte verursacht, als die vollrotierende Aufbereitung mit F6 Sky Taper. Allerdings gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen der Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper und Reciproc sowie zwischen den beiden reziprok arbeitenden maschinellen Systeme Reciproc und Reciproc Blue.

Es gibt in der Literatur zahlreiche Studien, die reziproke Wurzelaufbereitungssysteme mit rotierenden Systemen vergleichen. Die folgenden Studien wiesen ein ähnliches Ergebnis zu der vorliegenden Studie auf:

Kansal und Mitarbeiter verglichen zwei reziproke Ein-Feilen-Aufbereitungssysteme (Wave One und single F2 Pro Taper, beide von Fa. Dentsply, Deutschland) mit einem rotierenden Mehr-Feilen-System (F2 Pro Taper, Dentsply, Deutschland) in Bezug auf die Defektbildung im Wurzeldentin von Unterkiefer Prämolaren. Die Frakturanalyse wurde durch vertikale Fraktionierung in Abstand von 3mm und anschließende mikroskopische Analyse vorgenommen. Es zeigten sich bei den reziprok aufbereiteten Proben weniger Dentindefekte. Zwischen den reziprok aufbereiteten Gruppen untereinander gab es keinen signifikanten Unterschied (Kansal et al., 2014). Priya und Mitarbeiter setzten Mehr-Feilen Systeme sowohl reziprok als auch rotierend ein und fanden weniger Defekte bei den reziprok aufbereiteten Proben (Priya, et al., 2014). Liu und Mitarbeiter verglichen bei der Aufbereitung von Unterkieferinzisivi in Bezug auf Induktion von Dentindefekten vier maschinelle Systeme (Pro

Taper (Dentsply, Deutschland), OneShape (Micro-Mega, Frankreich), Reciproc (VDW, Deutschland) und Self Adjusting File (ReDent-Nova, Israel)) miteinander. Die Defektanalyse erfolgte durch horizontale Fraktionierung und anschließende mikroskopische Untersuchung. Self Adjusting File (SAF) und Reciproc zeigten weniger Defekte als die anderen Systeme (Liu et al., 2013a). Bei einer Studie von Burklein und Mitarbeiter hingegen zeigten sich bei der reziproken Aufbereitung mehr Infrakturen (inkomplette Frakturen) und mehr komplette (durchgehende) Frakturen in der apikalen Region als bei der rotierenden Aufbereitung. Dabei wurden die reziproken Ein-Feilen-Systeme WaveOne (Dentsply, Deutschland) und Reciproc (VDW, Deutschland) mit den rotierenden Mehr-Feilen-Systemen Mtwo (VDW, Deutschland) und Pro Taper (Dentsply, Deutschland) bei der Aufbereitung von Unterkieferinzisivi verglichen (Burklein, et al., 2013). Gergi und Mitarbeiter untersuchten die Aufbereitungssysteme Reciproc (VDW, Deutschland), WaveOne (Dentsply, Deutschland) (reziproke Aufbereitung) und Twisted Adaptive File (Sybron Endo, USA) (kombiniert reziproke Aufbereitung) auf Frakturentstehung bei der Aufbereitung von mesialen Wurzeln von Unterkiefermolaren. Die Frakturanalyse wurde durch horizontale Fraktionierung in 6 mm Abständen und anschließende mikroskopische Analyse durchgeführt. Das System Reciproc wies in dieser Studie die meisten kompletten Dentindefekte auf.

Es liegen auch Studien vor, die keinen signifikanten Unterschied zwischen der reziproken und der rotierenden Aufbereitung nachweisen konnten. De Deus und Mitarbeiter verglichen in einer Mikro CT Scan Studie die Aufbereitung der mesialen Wurzeln von Unterkiefermolaren mit zwei reziproken Systemen (Reciproc (VDW, Deutschland) und WaveOne (Dentsply, Deutschland)) und einem rotierenden System BioRace (FKG Dentaire, Schweiz). Es bestand keine kausale Beziehung zwischen der Aufbereitung mit den untersuchten Systemen und der Entstehung von Mikrofrakturen in Dentin (De-Deus et al., 2014). Paque und Mitarbeiter verglichen das konventionelle rotierende Mehr-Feilen-System Pro Taper (Dentsply, Deutschland) mit dem reziproken Ein-Feilen-System F2 Pro Taper bei mesialen Wurzeln der ersten Unterkiefermolaren. Die Frakturanalyse erfolgte durch Computertomographie. Bei beiden Gruppen gab es keinen Anhalt auf Aufbereitungsdefekte (Paque et al., 2011).

In der vorliegenden Studie wurde sowohl mit zwei Ein-Feilen- (Reciproc und Reciproc Blue) und einem Mehr-Feilen-System (Komet F6 Sky Taper) gearbeitet. Sowohl bei der Anzahl der Frakturen als auch bei der Gesamtfrakturenlänge gab es einen signifikanten Unterschied zwischen der vollrotierenden Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper und der reziproken Aufbereitung mit Reciproc Blue. Das Ein-Feilen-System Reciproc Blue verursachte signifikant

weniger Defekte als das Mehr-Feilen-System Komet F6 Sky Taper (in unserer Studie wurden zwei Feilen verwendet).

Es finden sich Studien in der Literatur, bei denen sich die Mehr-Feilen-Aufbereitungssysteme als schonender erwiesen als die Ein-Feilen-Systeme. Priya und Mitarbeiter verglichen die Aufbereitung von Unterkiefer-zentralen Inzisivi mit Mehr-Feilen-Systemen (Pro Taper und Pro Taper Next, Dentsply, Deutschland) und mit Ein-Feilen-Systemen (Reciproc (VDW, Deutschland) und OneShape (FKG Dentaire, Schweiz)). Die in dieser Studie untersuchten Mehr-Feilen-Systeme waren schonender als die untersuchten Ein-Feilen-Systeme. Interessant ist jedoch, dass es noch weniger Frakturbildung gab, wenn Mehr-Feilen-Systeme reziprok anstatt rotierend verwendet wurden (Priya et al., 2014). Gergi und Mitarbeiter bereiteten mesiale Wurzeln von Unterkiefermolaren mit zwei reziproken Ein-Feilen-Systemen (Reciproc (VDW, Deutschland) und WaveOne (Dentsply, Deutschland)) und einem kombiniert reziprokem Mehr-Feilen-System (Twisted Adaptive File=TFA (Sybron Endo, USA)) auf. Die Frakturanalyse erfolgte durch horizontale Fraktionierung in 6mm Abständen und anschließende mikroskopische Untersuchung. Die reziproken Ein-Feilen-Systeme verursachten signifikant mehr inkomplette Mikrofrakturen als das rotierende System mit einer vollen Feilensequenz. Im Gegensatz dazu verglichen Liu und Mitarbeiter die Aufbereitung mit drei Ein-Feilen-Systemen (OneShape (Micro-Mega, Frankreich), Self Adjusting File (ReDent-Nova, Israel) und Reciproc (VDW, Deutschland)) mit dem Mehr-Feilen-System ProTaper (Dentsply, Deutschland) auf Defektbildung im Dentin. Es wurden Unterkieferinzisivi aufbereitet und die Frakturanalyse erfolgte durch horizontale Fraktionierung und mikroskopische Untersuchung. Dabei zeigten sich die meisten Mikrofrakturen bei dem Mehr-Feilen-System ProTaper (Liu et al., 2013a). Es gibt jedoch auch Studien, die keinen signifikanten Unterschied zwischen Ein-Feilen und Mehr-Feilen-Systemen nachweisen konnten. Paque und Mitarbeiter verglichen das konventionelle rotierende Mehr-Feilen-System Pro Taper (Dentsply, Deutschland) mit dem reziproken Ein-Feilen-System F2 Pro Taper bei mesialen Wurzeln der ersten Unterkiefermolaren. Die Frakturanalyse erfolgte durch Computertomographie. Bei beiden Gruppen gab es keinen Anhalt auf Aufbereitungsdefekte (Paque et al., 2011). De Deus und Mitarbeiter untersuchten die Aufbereitung der mesialen Wurzeln von Unterkiefermolaren mit zwei reziproken Ein-Feilen-Systemen (Reciproc (VDW, Deutschland) und WaveOne (Dentsply, Deutschland)) und mit einem rotierenden Mehr-Feilen-System BioRace (FKG Dentaire, Schweiz). Die Frakturanalyse erfolgte durch Mikro-CT Scan. Es gab keinen Unterschied zwischen den

Aufnahmen vor und nach der Aufbereitung mit den untersuchten Systemen (De-Deus et al., 2014).

Es liegen in der Literatur noch keine Studien über die Frakturbildung mit dem System Reciproc Blue vor. Es gibt lediglich vergleichende Untersuchungen, die sich mit der zyklischen Ermüdungsfestigkeit der Reciproc Blue Instrumente beschäftigen. So verglichen De Deus und Mitarbeiter das Reciproc System mit dem Reciproc Blue System in Bezug auf Biegefestigkeit und zyklische Ermüdungsfestigkeit. Dabei wurden die Instrumente R25 (ISO 25 / 0.08) miteinander verglichen. Sie fanden heraus, dass durch die spezielle thermische Behandlung der Instrumente das Reciproc Blue System eine bessere Flexibilität, niedrigere Mikrofestigkeit und höhere Ermüdungsfestigkeit unter Beibehaltung der Oberflächen Beschaffenheit zeigt (De-Deus et al., 2017b). Keskin und Mitarbeiter verglichen die zyklische Ermüdungsresistenz von den reziproken Wurzelzubereitungssystemen Reciproc, Reciproc Blue (VDW, Deutschland) (R25 = ISO25 / 0.08) und WaveOne Gold Primary (Dentsply, Deutschland) (ISO 25 / 0.07) miteinander. Reciproc Blue Instrumente zeigten eine höhere zyklische Ermüdungsfestigkeit als Reciproc- und WaveOne Instrumente (Keskin et al., 2017). Gündogar und Mitarbeiter untersuchten die zyklische Ermüdungsfestigkeit von Reciproc Blue R25 (VDW, Deutschland) (ISO 25 / 0.08), HyFlex EDM (Coltene Whaledent, Schweiz, ISO 25), WaveOne Gold Primary (Dentsply, Deutschland, ISO 25 / 0.07) und OneShape (Micro Mega, Frankreich, ISO25 / 0.06). Die zyklische Biegefestigkeit des HyFlex EDM-Instruments war signifikant höher als die der anderen untersuchten Systeme. Die Anzahl der Zyklen bis zur Fraktur des Reciproc Blue Instruments war signifikant höher als die Anzahl der Zyklen bis zur Fraktur des WaveOne Instruments (Gundogar und Ozyurek, 2017).

6.4 Mikro CT Untersuchung

Vier Proben wurden zusätzlich durch Mikro CT aufgenommen und analysiert. Diese Analyse zeigte, dass mit Ausnahme einer einzigen Fraktur die Befunde der beiden Methoden nicht miteinander korrelierten. Bei der lichtmikroskopischen Untersuchung wurden vielmehr axiale Defekte in dem Wurzelkanal beobachtet, die bei den Mikro CT Aufnahmen nicht erkennbar waren. Die Analyse der Mikro CT Aufnahmen zeigten radiale Infrakturen, die sich meistens in den mittleren Schichten befanden und lichtmikroskopisch an der Oberfläche nicht zu erkennen waren.

Bei der lichtmikroskopischen Untersuchung ließen sich durch die hohe Auflösung der Aufnahmen mit einer 200-fachen Vergrößerung sehr feine Dentindefekte erkennen. Durch

die dreidimensionale Analyse konnte man zudem Oberflächenirregularitäten oder Kanalausbuchtungen sehr gut erkennen und von einem Dentindefekt unterscheiden. Allerdings ist es möglich, dass sich diese Defekte nur an der Oberfläche befanden und somit klinisch nicht von großer Bedeutung sind. Die Tiefe der Defekte lässt sich mit dieser Methode nicht feststellen und Infrakturen in der Tiefe nicht erkennen. Die Mikro CT Analyse bietet eine non-destruktive Möglichkeit der Schichtanalyse (Ceyhanli et al., 2015; Jamleh et al., 2015). So kann man Infrakturen und deren Ausdehnung in der gesamten Zahnwurzel erkennen. Durch diese Erkenntnisse lassen sich womöglich klinisch relevantere Einschätzung der Dentindefekte abgeben. Allerdings reicht sehr wahrscheinlich die Auflösung der verfügbaren Mikro CT Geräte nicht aus, um die kleinsten Haarrisse zu erkennen, die sich unter Belastung (z. B. nach der Kanalobturation, Stiftinsertion und verstärkten okklusalen Belastung nach Überkronung) erweitern und somit doch klinisch relevant werden können. Zudem besteht die Problematik der Artefakt-Entstehung, die eine Analyse der kleineren Defekte sehr erschwert oder gar unmöglich macht.

7 Klinische Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wurde festgestellt, dass alle Wurzelaufrbereitungstechniken Dentindefekte induzieren. Zu dieser Erkenntnis kamen auch andere Arbeitsgruppen, die verschiedene Wurzelaufrbereitungstechniken miteinander verglichen (Burklein et al., 2013; Capar et al., 2014; Li et al., 2015; Liu et al., 2013b; Shemesh et al., 2010).

Im Rahmen dieser Studie wurden die Proben bis 0,5 mm vor Apex mit einer finalen apikalen AufbereitungsgroÙe von ISO 40/0.4 aufbereitet. Nach den Erkenntnissen aus der ausgiebigen Literaturrecherche ist damit eine sehr gute Spüldesinfektion und Debrisentfernung gewährleistet, ohne die Wurzel unnötig zu schwächen. Die wurzelaufrbereiteten Proben werden in der Längsrichtung aufgespalten, um aufbereitungsbedingte Dentindefekte an der Kanalwand und im Wurzelkanal besser erkennen zu können. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Handinstrumentierung geringfügig schonender war als die maschinelle, vollrotierende Aufbereitung mit dem Komet F6 Sky Taper. Die Handinstrumentierung ist damit trotz der zahlreichen, teilweise sehr fortschrittlichen maschinellen Wurzelkanalaufbereitungssystemen weiterhin eine geeignete Aufbereitungstechnik. Bei den meisten maschinellen Systemen wird eine Gleitpfaderstellung vorausgesetzt, um maschinell instrumentieren zu können. Bei Wurzelkanälen mit gekrümmtem Verlauf ist die unterstützende Verwendung der Handinstrumente unabdingbar, um Aufbereitungsfehler wie z. B. Ledge-, Zip-, oder Elbowformationen zu vermeiden. Die Taktilität des Behandlers ist bei der Handaufbereitung ein großer Vorteil gegenüber den maschinellen Systemen. So kann der Behandler beispielsweise Kanalunregelmäßigkeiten, Abzweigungen akzessorischer Kanäle oder Engpässe frühzeitig erkennen und durch das Vorbiegen der Instrumente, vermehrte Spülvorgänge oder ähnliche Maßnahmen Fehlern vorbeugen (Guelzow et al., 2005; Mikolajczyk, 2014). Durch Einführung der Nickel-Titan Feilen ist die Handaufbereitung im Vergleich zu der Aufbereitung mit Edelstahlfeilen viel schonender und sicherer geworden. Bei den maschinellen Systemen wird der Behandlungsverlauf vorwiegend durch das Instrumentendesign bestimmt. Allerdings ist die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung in der modernen Endodontie nicht mehr wegzudenken, da die aktuellen Systeme eine erhebliche Zeitersparnis und gute Kanalausformung versprechen. Hinzu kommt die Anwenderfreundlichkeit, die die Endodontie auch für den unerfahrenen Behandler relativ sicher gestaltet (Mikolajczyk, 2014).

Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung wird ständig weiterentwickelt in Bezug auf Material, Instrumentendesign, Feilenbewegung und Feilenanzahl. Vor allem im vergangenen

Jahrzehnt haben die Hersteller die Eigenschaften der Nickel-Titanlegierung variiert, um diese noch flexibler zu gestalten. Durch verschiedene Wärme- und teilweise auch Kühlvorgänge konnte die zyklische Ermüdungsfestigkeit erhöht und das Elastizitätsmodul reduziert werden, um Instrumentenfrakturen weitestgehend zu vermeiden. Die in der vorliegenden Studie verwendeten maschinellen Systeme Komet F6 Sky Taper und Reciproc bestehen aus solch einer superelastischen Nickel-Titan Legierung (M-Wire). Seit zwei Jahren existieren Nickel-Titan Instrumente, die einem speziellen blue thermal treatment unterzogen wurden und sich dadurch bei Raumtemperatur in der martensitischen (plastischen) Phase befinden. Dies ermöglicht ein Vorbiegen der Instrumente und nach Herstellerangabe nochmals bis zu 300 % mehr Flexibilität. Die zyklische Ermüdungsfestigkeit wurde durch diese spezielle Behandlung noch weiter erhöht (De-Deus et al., 2017b). Das in der vorliegenden Studie verwendete maschinelle System Reciproc Blue besteht aus solch einer Nickel-Titan Legierung. Im Rahmen dieser Studie gab es zwischen dem klassischen Reciproc System und dem Reciproc Blue System jedoch keine signifikanten Unterschiede in Hinsicht auf die Defektenstehung. Im Vergleich zu Komet F6 Sky Taper hat sich Reciproc Blue allerdings sowohl bei der Anzahl der entstandenen Defekte als auch bei der Gesamtrakturlänge als signifikant schonender erwiesen. So entwickelt sich der Anspruch der Endodontie, zunehmend schonender zu arbeiten, mit gute Ergebnissen.

Die Herausforderungen in der Endodontie beschränken sich jedoch nicht nur auf die Vermeidung der Wurzelfraktur. Eine mindestens genauso große Problematik stellt die formkongruente Aufbereitung der unregelmäßigen Wurzelkanäle dar. Ein homogen geformter Wurzelkanal ohne akzessorische Kanalabgänge und mit einem runden Querschnitt ist leider eine Ausnahme. Die meisten konventionellen maschinellen Aufbereitungssysteme können nur einen runden Aufbereitungsquerschnitt erzeugen. So verbleiben einerseits unaufbereitete, infizierte Wurzelkanalabschnitte und andererseits wird die Wurzelkanalwand in anderen Abschnitten unnötig geschwächt. Man kann die unaufbereiteten Kanalabschnitte mit verstärkten Spülungen, optimalerweise unter Ultraschallaktivierung, desinfizieren und mit warmer Obturation oder durch Verwendung neuartiger, sehr fließfähiger biokeramischer Sealer, die eine Bindung mit dem Dentin eingehen, abdichten. Optimal ist diese Methode jedoch nicht, da sie keine Lösung gegen die Schwächung des Wurzeldentins bietet. Für diese Problematik wurden spezielle Instrumentendesigns entwickelt, die solche Wurzelkanäle formkongruent aufbereiten und einen dichten Verschluss gegen die Reinfektion gewährleisten können. Eines dieser Systeme ist das XP Endo System (FKG Dentaire, Schweiz). Dieses Instrument hat eine speziell gebogene Form von mehreren „S“ und weist

bei Raumtemperatur (martensitische Phase) die Größe ISO 30 / 0.1 auf. Bei Körpertemperatur (während der Aufbereitung) wechselt es in die austenitische Phase, wird flexibler und verwandelt seinen Taper von 1 % auf 4 %. Nach Angabe des Herstellers kann die Feile durch die dünne, aber geschlängelte Form die Kanalwände gut aufbereiten und bietet gleichzeitig einen sehr großen Spanraum, um Debris aus dem Kanal zu entfernen, sowie eine Verblockung zu vermeiden. Ein anderes System um unregelmäßige Wurzelkanäle aufzubereiten ist das SAF Feilensystem (self adjusting file, Re Dent Nova, Israel). Hier besteht das Instrument aus einem hohlen Nickel-Titan Gitternetz, das sich je nach Kanalabschnitt entweder komprimiert oder gegen die Kanalwände expandiert. Bei diesem System wird während der ganzen Aufbereitung gleichzeitig durch einen Spülschlauch gespült, welcher an der Feile befestigt ist.

Die moderne Endodontie bleibt trotz der neuesten Entwicklungen eine Herausforderung. Die Forschung sollte weiterhin das Instrumentendesign optimieren, um eine schonende, formkongruente Aufbereitung und Obturation des komplexen Wurzelkanalsystems zu gewährleisten. Die Methoden zur Vermeidung von Instrumentenfrakturen, wie z. B. Verwendung eines Gleitmediums und Entwicklung flexiblerer Legierungen und Desinfektion des Wurzelkanalsystems, sollten untersucht und weiterentwickelt werden.

Literaturverzeichnis

1. Abou-Rass M, Jastrab RJ (1982) The use of rotary instruments as auxiliary aids to root canal preparation of molars. *Journal of endodontics* 8:78-82
2. Akhlaghi NM, Dadresanfar B, Darmiani S, Moshari A (2014) Effect of master apical file size and taper on irrigation and cleaning of the apical third of curved canals. *Journal of dentistry (Tehran, Iran)* 11:188-195
3. Andreasen G, Heilman H, Krell D (1985) Stiffness changes in thermodynamic Nitinol with increasing temperature. *The Angle orthodontist* 55:120-126
4. Ashwinkumar V, Krithikadatta J, Surendran S, Velmurugan N (2014) Effect of reciprocating file motion on microcrack formation in root canals: an SEM study. *Int Endod J* 47:622-627
5. Azar MR, Mokhtare M (2011) Rotary Mtwo system versus manual K-file instruments: efficacy in preparing primary and permanent molar root canals. *Indian journal of dental research : official publication of Indian Society for Dental Research* 22:363
6. Baumann MA, Rudolf Beer (2007) *Farbatlas der Endodontie*. Georg Thieme Verlag:416
7. Beer R, Eggerath, J. (2004) *Dynamisches Frakturverhalten maschineller Instrumente in gekrümmten Wurzelkanälen - Herrn Prof. Dr. Peter Gängler zur Verleihung des Dr. h. c. gewidmet*. *ZWR* 113:549-552
8. Bergmans L, Van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P (2001) Mechanical root canal preparation with NiTi rotary instruments: rationale, performance and safety. Status report for the American Journal of Dentistry. *American journal of dentistry* 14:324-333
9. Beun S, Bogaerts P, Van Nieuwenhuysen JP (2005) [Manual or rotary root canal preparation? Nickel-titanium or stainless steel? Review of the literature]. *Revue belge de medecine dentaire* 60:81-91
10. Bier CA, Shemesh H, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR, Wu MK (2009) The ability of different nickel-titanium rotary instruments to induce dentinal damage during canal preparation. *Journal of endodontics* 35:236-238
11. Bishop K, Dummer PM (1997) A comparison of stainless steel Flexofiles and nickel-titanium NiTiFlex files during the shaping of simulated canals. *Int Endod J* 30:25-34

12. Blum JY, Cohen A, Machtou P, Micallef JP (1999) Analysis of forces developed during mechanical preparation of extracted teeth using Profile NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 32:24-31
13. Braun A, Schüttlöffel M, Frentzen M (2003) Wurzelkanalbegradigung durch die Aufbereitung mit rotierenden NiTi-Systemen. *Dtsch Zahnarzt Z* 58:42-45
14. Brkanic T, Zivkovic S, Drobac M (2005) [Root canal preparation techniques using nickel-titanium rotary instruments]. *Medicinski preglod* 58:203-207
15. Brubacher (1913) Nervkanalbohrer-Nervnadeln. *Dtsch Mschr Zahnheilk* 31:339-345
16. Burklein S, Benten S, Schafer E (2014) Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J* 47:405-409
17. Burklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schafer E (2012) Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *Int Endod J* 45:449-461
18. Burklein S, Tsotsis P, Schafer E (2013) Incidence of dentinal defects after root canal preparation: reciprocating versus rotary instrumentation. *Journal of endodontics* 39:501-504
19. C. Bartel MG, E. Schäfer, A. Petschelt, S. Flachsenberg, T. Neuber, C. Kockapan, R. Weiger, M. Hülsmann (2006) Gemeinsame Stellungnahme zum Thema Wurzelkanalspülungen.
20. Calberson FL, Deroose CA, Hommez GM, De Moor RJ (2004) Shaping ability of ProTaper nickel-titanium files in simulated resin root canals. *Int Endod J* 37:613-623
21. Capar ID, Arslan H, Akcay M, Uysal B (2014) Effects of ProTaper Universal, ProTaper Next, and HyFlex instruments on crack formation in dentin. *Journal of endodontics* 40:1482-1484
22. Capar ID, Uysal B, Ok E, Arslan H (2015) Effect of the size of the apical enlargement with rotary instruments, single-cone filling, post space preparation with drills, fiber post removal, and root canal filling removal on apical crack initiation and propagation. *Journal of endodontics* 41:253-256
23. Ceyhanli KT, Erdilek N, Tatar I, Celik D (2015) Comparison of ProTaper, RaCe and Safesider instruments in the induction of dentinal microcracks: a micro-CT study. *Int Endod J*
24. Chen JL, Messer HH (2002) A comparison of stainless steel hand and rotary nickel-titanium instrumentation using a silicone impression technique. *Aust Dent J* 47:12-20

25. De-Deus G, Belladonna FG, Silva EJ, Marins JR, Souza EM, Perez R, et al. (2015a) Micro-CT Evaluation of Non-instrumented Canal Areas with Different Enlargements Performed by NiTi Systems. *Brazilian dental journal* 26:624-629
26. De-Deus G, Belladonna FG, Souza EM, Silva EJ, Neves Ade A, Alves H, et al. (2015b) Micro-computed Tomographic Assessment on the Effect of ProTaper Next and Twisted File Adaptive Systems on Dentinal Cracks. *Journal of endodontics* 41:1116-1119
27. De-Deus G, César de Azevedo Carvalhal J, Belladonna FG, Silva EJNL, Lopes RT, Moreira Filho RE, et al. (2017a) Dentinal Microcrack Development after Canal Preparation: A Longitudinal in Situ Micro-computed Tomography Study Using a Cadaver Model. *Journal of endodontics* 43:1553-1558
28. De-Deus G, Silva EJ, Marins J, Souza E, Neves Ade A, Goncalves Belladonna F, et al. (2014) Lack of causal relationship between dentinal microcracks and root canal preparation with reciprocation systems. *Journal of endodontics* 40:1447-1450
29. De-Deus G, Silva EJ, Vieira VT, Belladonna FG, Elias CN, Plotino G, et al. (2017b) Blue Thermomechanical Treatment Optimizes Fatigue Resistance and Flexibility of the Reciproc Files. *Journal of endodontics* 43:462-466
30. Dietz DB, Di Fiore PM, Bahcall JK, Lautenschlager EP (2000) Effect of rotational speed on the breakage of nickel-titanium rotary files. *Journal of endodontics* 26:68-71
31. Edlund M, Nair MK, Nair UP (2011) Detection of vertical root fractures by using cone-beam computed tomography: a clinical study. *Journal of endodontics* 37:768-772
32. Elnaghy AM, Mandorah A, Elsaka SE (2017) Effectiveness of XP-endo Finisher, EndoActivator, and File agitation on debris and smear layer removal in curved root canals: a comparative study. *Odontology / the Society of the Nippon Dental University* 105:178-183
33. Esposito PT, Cunningham CJ (1995) A comparison of canal preparation with nickel-titanium and stainless steel instruments. *Journal of endodontics* 21:173-176
34. Fleming CH, Litaker MS, Alley LW, Eleazer PD (2010) Comparison of classic endodontic techniques versus contemporary techniques on endodontic treatment success. *Journal of endodontics* 36:414-418
35. Frank AL (1967) An evaluation of the Giromatic endodontic handpiece. *Oral surgery, oral medicine, and oral pathology* 24:419-421
36. Frick CP, Ortega AM, Tyber J, Maksound AEM, Maier HJ, Liu Y, et al. (2005) Thermal processing of polycrystalline NiTi shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A* 405:34-49

37. Gambarini G (2000) Rationale for the use of low-torque endodontic motors in root canal instrumentation. *Endodontics & dental traumatology* 16:95-100
38. Gao XJ, Xu WN (2012) [Analysis of vertical root fracture with two different techniques of root canal preparation]. *Shanghai kou qiang yi xue = Shanghai journal of stomatology* 21:321-324
39. Gergi RM, Osta NE, Naaman AS (2015) Dentinal crack formation during root canal preparations by the twisted file adaptive, Reciproc and WaveOne instruments. *Eur J Dent* 9:508-512
40. Glossen CR, Haller RH, Dove SB, del Rio CE (1995) A comparison of root canal preparations using Ni-Ti hand, Ni-Ti engine-driven, and K-Flex endodontic instruments. *Journal of endodontics* 21:146-151
41. Gomes AC, Nejaim Y, Silva AI, Haiter-Neto F, Cohenca N, Zaia AA, et al. (2015) Influence of Endodontic Treatment and Coronal Restoration on Status of Periapical Tissues: A Cone-beam Computed Tomographic Study. *Journal of endodontics* 41:1614-1618
42. Guelzow A, Stamm O, Martus P, Kielbassa AM (2005) Comparative study of six rotary nickel-titanium systems and hand instrumentation for root canal preparation. *Int Endod J* 38:743-752
43. Gundogar M, Ozyurek T (2017) Cyclic Fatigue Resistance of OneShape, HyFlex EDM, WaveOne Gold, and Reciproc Blue Nickel-titanium Instruments. *Journal of endodontics* 43:1192-1196
44. Haikel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C (1999) Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *Journal of endodontics* 25:434-440
45. Hassan B, Metska ME, Ozok AR, van der Stelt P, Wesselink PR (2009) Detection of vertical root fractures in endodontically treated teeth by a cone beam computed tomography scan. *Journal of endodontics* 35:719-722
46. Hayashi Y, Yoneyama T, Yahata Y, Miyai K, Hanawa T, Ebihara A, et al. (2007) Phase transformation behaviour and bending properties of hybrid nickel–titanium rotary endodontic instruments. *International Endodontic Journal* 40:247-253
47. Heidemann D. HM, Petschelt A., Raab W..H.M, Weiger R. (2005) Gemeinsame Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ) und der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK). *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift (DZZ)* 60
48. Hellwig EK, J.; Attin, T. (2013) Einführung in die Zahnerhaltung. 6. Auflage

49. Himel VT, Levitan ME (2003) Use of nickel titanium instruments for cleaning and shaping root canal systems. *Texas dental journal* 120:262-268
50. Hsieh Y, Gau C, Kung Wu S, Shen E, Hsu P, Fu E (2007) Dynamic recording of irrigating fluid distribution in root canals using thermal image analysis. *International Endodontic Journal* 40:11-17
51. Hülsmann M (2002) Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten–eine (vorläufige) Bilanz. *Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten–Ein Handbuch Quintessenz*, Berlin:11
52. Hülsmann M (2000) Entwicklung einer Methodik zur standardisierten Überprüfung verschiedener Aufbereitungsparameter und vergleichende In-vitro-Untersuchung unterschiedlicher Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. *Habilitationsschriften der Zahn-, Mund-, Kieferheilkunde Quintessenz Verlags-GmbH Berlin* 1. Auflage
53. Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH (2005) Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics* 10:30-76
54. Jamleh A, Komabayashi T, Ebihara A, Nassar M, Watanabe S, Yoshioka T, et al. (2015) Root surface strain during canal shaping and its influence on apical microcrack development: a preliminary investigation. *Int Endod J* 48:1103-1111
55. Kaack M (2002) *Elastische Eigenschaften von NiTi-Formgedächtnis-Legierungen*. Ruhr-Universität Bochum, Bochum
56. Kahler B, Moule A, Stenzel D (2000) Bacterial contamination of cracks in symptomatic vital teeth. *Australian endodontic journal : the journal of the Australian Society of Endodontology Inc* 26:115-118
57. Kansal R, Rajput A, Talwar S, Roongta R, Verma M (2014) Assessment of dentinal damage during canal preparation using reciprocating and rotary files. *Journal of endodontics* 40:1443-1446
58. Karatas E, Gunduz HA, Kirici DO, Arslan H (2015a) Incidence of dentinal cracks after root canal preparation with ProTaper Gold, Profile Vortex, F360, Reciproc and ProTaper Universal instruments. *Int Endod J*
59. Karatas E, Gunduz HA, Kirici DO, Arslan H, Topcu MC, Yeter KY (2015b) Dentinal crack formation during root canal preparations by the twisted file adaptive, ProTaper Next, ProTaper Universal, and WaveOne instruments. *Journal of endodontics* 41:261-264
60. Keskin C, Inan U, Demiral M, Keles A (2017) Cyclic Fatigue Resistance of Reciproc Blue, Reciproc, and WaveOne Gold Reciprocating Instruments. *Journal of endodontics* 43:1360-1363

61. Kiefner P, Ban M, De-Deus G (2014) Is the reciprocating movement per se able to improve the cyclic fatigue resistance of instruments? *Int Endod J* 47:430-436
62. Kim H-C, Sung SY, Ha J-H, Solomonov M, Lee J-M, Lee C-J, et al. (2013) Stress generation during self-adjusting file movement: minimally invasive instrumentation. *Journal of endodontics* 39:1572-1575
63. Kim HC, Lee MH, Yum J, Versluis A, Lee CJ, Kim BM (2010) Potential relationship between design of nickel-titanium rotary instruments and vertical root fracture. *Journal of endodontics* 36:1195-1199
64. Kroncke A (1981) [Root canal preparation as a prerequisite for applying filling material]. *Dtsch Zahnärztl Z* 36:201-207
65. Lang H, Raab W (2005) Auswirkung endodontisch-präparativer Maßnahmen auf die Stabilität von Frontzähnen. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 60:1
66. Lee JH, Park JB, Andreasen GF, Lakes RS (1988) Thermomechanical study of Ni-Ti alloys. *Journal of biomedical materials research* 22:573-588
67. Li SH, Lu Y, Song D, Zhou X, Zheng QH, Gao Y, et al. (2015) Occurrence of Dentinal Microcracks in Severely Curved Root Canals with ProTaper Universal, WaveOne, and ProTaper Next File Systems. *Journal of endodontics* 41:1875-1879
68. Liu R, Hou BX, Wesselink PR, Wu MK, Shemesh H (2013a) The incidence of root microcracks caused by 3 different single-file systems versus the ProTaper system. *Journal of endodontics* 39:1054-1056
69. Liu R, Kaiwar A, Shemesh H, Wesselink PR, Hou B, Wu MK (2013b) Incidence of apical root cracks and apical dentinal detachments after canal preparation with hand and rotary files at different instrumentation lengths. *Journal of endodontics* 39:129-132
70. Löst C (2006) Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *International Endodontic Journal* 39:921-930
71. Löst C, Wesselink, P. R., Winkler, R. (1992) Grundlagen und Prinzipien moderner Endodontie. *Endodontie*:7-18
72. Luiten DJ, Morgan LA, Baugartner JC, Marshall JG (1995) A comparison of four instrumentation techniques on apical canal transportation. *Journal of endodontics* 21:26-32
73. Machado RF, C. H.; Back E.; Comparin D.; Tomazinho L. F.; Vansan L. P. (2016) The Impact of Apical Patency in the Success of Endodontic Treatment of Necrotic Teeth with Apical Periodontitis: A Brief Review. *IEJ Iranian Endodontic Journal* 2016;11(1): 63-66

74. Martinho FC, Freitas LF, Nascimento GG, Fernandes AM, Leite FR, Gomes AP, et al. (2015) Endodontic retreatment: clinical comparison of reciprocating systems versus rotary system in disinfecting root canals. *Clinical oral investigations* 19:1411-1417
75. Metzger Z, Teperovich E, Cohen R, Zary R, Paqué F, Hülsmann M (2010a) The self-adjusting file (SAF). Part 3: removal of debris and smear layer—a scanning electron microscope study. *Journal of endodontics* 36:697-702
76. Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R (2010b) The self-adjusting file (SAF). Part 1: respecting the root canal anatomy—a new concept of endodontic files and its implementation. *Journal of endodontics* 36:679-690
77. Mikolajczyk C (2014) Eine In-Vitro-Studie zum Vergleich der Wurzelkanalaufbereitung mittels reziprozierender und manueller Instrumentation. Köln, Univ., Diss., 2014,
78. Mittal P, Logani A, Shah N, Pandey RM (2016) Effect of apical clearing technique on the treatment outcome of teeth with asymptomatic apical periodontitis: A randomized clinical trial. *Journal of conservative dentistry : JCD* 19:396-401
79. Mohammadzadeh Akhlaghi N, Rahimifard N, Moshari A, Vatanpour M, Darmiani S (2014) The Effect of Size and Taper of Apical Preparation in Reducing Intra-Canal Bacteria: A Quantitative SEM Study. *Iranian endodontic journal* 9:61-65
80. Molven O, Halse A (1988) Success rates for gutta-percha and Kloroperka N-0 root fillings made by undergraduate students: radiographic findings after 10-17 years. *Int Endod J* 21:243-250
81. Moshari AA, Akhlaghi NM, Rahimifard N, Darmiani S (2015) Reduction of *Enterococcus faecalis* in curved root canals after various sizes and tapers of canal preparation. *Journal of conservative dentistry : JCD* 18:306-309
82. Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2007) Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature - part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *Int Endod J* 40:921-939
83. Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2008) Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature -- Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J* 41:6-31
84. Ordinola-Zapata R, Martins JNR, Bramante CM, Villas-Boas MH, Duarte MH, Versiani MA (2017) Morphological evaluation of maxillary second molars with fused roots: a micro-CT study. *Int Endod J* 50:1192-1200

85. Paqué F, Peters OA (2011) Micro-computed tomography evaluation of the preparation of long oval root canals in mandibular molars with the self-adjusting file. *Journal of endodontics* 37:517-521
86. Paque F, Zehnder M, De-Deus G (2011) Microtomography-based comparison of reciprocating single-file F2 ProTaper technique versus rotary full sequence. *Journal of endodontics* 37:1394-1397
87. Paraskevopoulou MT, Khabbaz MG (2016) Influence of Taper of Root Canal Shape on the Intra canal Bacterial Reduction. *The open dentistry journal* 10:568-574
88. Perez-Higueras JJ, Arias A, de la Macorra JC (2013) Cyclic fatigue resistance of K3, K3XF, and twisted file nickel-titanium files under continuous rotation or reciprocating motion. *Journal of endodontics* 39:1585-1588
89. Peters OA (2004) Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *Journal of endodontics* 30:559-567
90. Peters OA, Paqué F (2011) Root canal preparation of maxillary molars with the self-adjusting file: a micro-computed tomography study. *Journal of endodontics* 37:53-57
91. Peters OA, Peters CI, Schonenberger K, Barbakow F (2003) ProTaper rotary root canal preparation: assessment of torque and force in relation to canal anatomy. *Int Endod J* 36:93-99
92. Pettiette MT, Metzger Z, Phillips C, Trope M (1999) Endodontic complications of root canal therapy performed by dental students with stainless-steel K-files and nickel-titanium hand files. *Journal of endodontics* 25:230-234
93. Plotino G, Grande NM, Tocci L, Testarelli L, Gambarini G (2014) Influence of Different Apical Preparations on Root Canal Cleanliness in Human Molars: a SEM Study. *J Oral Maxillofac Res* 5:e4
94. Prado M, de Lima NR, de Lima CO, Gusman H, Simao RA (2015) Resistance to vertical root fracture of root filled teeth using different conceptual approaches to canal preparation. *Int Endod J*
95. Priya NT, Chandrasekhar V, Anita S, Tummala M, Raj TB, Badami V, et al. (2014) "Dentinal microcracks after root canal preparation" a comparative evaluation with hand, rotary and reciprocating instrumentation. *Journal of clinical and diagnostic research : JCDR* 8:Zc70-72
96. Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL, Jr. (1997) Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *Journal of endodontics* 23:77-85

97. Ricucci D, Russo J, Rutberg M, Burleson JA, Spangberg LS (2011) A prospective cohort study of endodontic treatments of 1,369 root canals: results after 5 years. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 112:825-842
98. Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG, Jr. (1985) The "balanced force" concept for instrumentation of curved canals. *Journal of endodontics* 11:203-211
99. Royal JR, Donnelly JC (1995) A comparison of maintenance of canal curvature using balanced-force instrumentation with three different file types. *Journal of endodontics* 21:300-304
100. Rud J, Omnell KA (1970) Root fractures due to corrosion. Diagnostic aspects. *Scandinavian journal of dental research* 78:397-403
101. Sathorn C, Palamara JE, Messer HH (2005) A comparison of the effects of two canal preparation techniques on root fracture susceptibility and fracture pattern. *Journal of endodontics* 31:283-287
102. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH (2000) Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *Journal of endodontics* 26:161-165
103. Saunders EM, Saunders WP (1997) The challenge of preparing the curved root canal. *Dental update* 24:241-244, 246-247
104. Schäfer E (2002) Metallurgie und Eigenschaften von Nickel-Titan-Instrumenten zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. *Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten Ein Handbuch Berlin: Quintessenz*:35-46
105. Schäfer E (2000) Wurzelkanalaufbereitungen. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und der DGZ. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift (DZZ)* 55:719
106. Schafer E, Schlingemann R (2003) Efficiency of rotary nickel-titanium K3 instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 36:208-217
107. Schafer E, Vlassis M (2004) Comparative investigation of two rotary nickel-titanium instruments: ProTaper versus RaCe. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J* 37:229-238
108. Schilder H (1974) Cleaning and shaping the root canal. *Dental clinics of North America* 18:269-296
109. Schneider K, Korkmaz Y, Addicks K, Lang H, Raab WH (2007) Prion protein (PrP) in human teeth: an unprecedented pointer to PrP's function. *Journal of endodontics* 33:110-113
110. Shemesh H, Bier CA, Wu MK, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR (2009) The effects of canal preparation and filling on the incidence of dentinal defects. *Int Endod J* 42:208-213

111. Shemesh H, Roeleveld AC, Wesselink PR, Wu MK (2011) Damage to root dentin during retreatment procedures. *Journal of endodontics* 37:63-66
112. Shemesh H, Wesselink PR, Wu MK (2010) Incidence of dentinal defects after root canal filling procedures. *Int Endod J* 43:995-1000
113. Siqueira JF, Alves FR, Almeida BM, de Oliveira JCM, Rôças IN (2010) Ability of chemomechanical preparation with either rotary instruments or self-adjusting file to disinfect oval-shaped root canals. *Journal of endodontics* 36:1860-1865
114. Siqueira JF, Alves FR, Versiani MA, Rôças IN, Almeida BM, Neves MA, et al. (2013) Correlative bacteriologic and micro-computed tomographic analysis of mandibular molar mesial canals prepared by Self-Adjusting File, Reciproc, and Twisted File systems. *Journal of endodontics* 39:1044-1050
115. Song YL, Bian Z, Fan B, Fan MW, Gutmann JL, Peng B (2004) A comparison of instrument-centering ability within the root canal for three contemporary instrumentation techniques. *Int Endod J* 37:265-271
116. Sonntag D, Guntermann A, Kim SK, Stachniss V (2003) Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J* 36:246-255
117. Stavileci M, Hoxha V, Gorduysus O, Tatar I, Laperre K, Hostens J, et al. (2015) Evaluation of Root Canal Preparation Using Rotary System and Hand Instruments Assessed by Micro-Computed Tomography. *Medical science monitor basic research* 21:123-130
118. Stoeckel D, Yu W (1991) Superelastic Ni--Ti Wire. *Wire journal international* 24:45-50
119. Tabrizizadeh M, Kazemipoor M, Hekmati-Moghadam SH, Hakimian R (2014) Impact of root canal preparation size and taper on coronal-apical micro-leakage using glucose penetration method. *J Clin Exp Dent* 6:e344-349
120. Tabrizizadeh M, Shareghi A (2015) The Effect of Preparation Size on Efficacy of Smear Layer Removal; A Scanning Electron Microscopic Study. *Iranian endodontic journal* 10:169-173
121. Tan BT, Messer HH (2002) The quality of apical canal preparation using hand and rotary instruments with specific criteria for enlargement based on initial apical file size. *Journal of endodontics* 28:658-664
122. Tavanafar S, Karimpour A, Karimpour H, Mohammed Saleh A, Hamed Saeed M (2015) Effect of Different Instrumentation Techniques on Vertical Root Fracture Resistance of Endodontically Treated Teeth. *Journal of dentistry (Shiraz, Iran)* 16:50-55

123. Thompson SA (2000) An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J* 33:297-310
124. Topcuoglu HS, Duzgun S, Akpek F, Topcuoglu G (2016) Effect of glide path and apical preparation size on the incidence of apical crack during the canal preparation using Reciproc, WaveOne, and ProTaper Next systems in curved root canals: A stereomicroscope study. *Scanning*
125. Toure B, Faye B, Kane AW, Lo CM, Niang B, Boucher Y (2011) Analysis of reasons for extraction of endodontically treated teeth: a prospective study. *Journal of endodontics* 37:1512-1515
126. Turpin YL, Chagneau F, Vulcain JM (2000) Impact of two theoretical cross-sections on torsional and bending stresses of nickel-titanium root canal instrument models. *Journal of endodontics* 26:414-417
127. Versluis A, Messer HH, Pintado MR (2006) Changes in compaction stress distributions in roots resulting from canal preparation. *International Endodontic Journal* 39:931-939
128. Wagner MF, Nayan N, Ramamurty U (2008) Healing of fatigue damage in NiTi shape memory alloys. *Journal of Physics D: Applied Physics* 41:185408
129. Walia HM, Brantley WA, Gerstein H (1988) An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *Journal of endodontics* 14:346-351
130. Weigele E (1941) Wurzelkanalerweiterer für Hand- und Maschinenbetrieb. *Deutsche Zahnärztliche Wochenschrift* 44:517-518
131. Wilcox LR, Roskelley C, Sutton T (1997) The relationship of root canal enlargement to finger-spreader induced vertical root fracture. *Journal of endodontics* 23:533-534
132. Wong S, Mundy L, Chandler N, Upritchard J, Purton D, Tompkins G (2014) Antibacterial properties of root canal lubricants: a comparison with commonly used irrigants. *Australian endodontic journal : the journal of the Australian Society of Endodontology Inc* 40:111-115
133. Wu MK, Wesselink PR, Walton RE (2000) Apical terminus location of root canal treatment procedures. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 89:99-103
134. Yahata Y, Yoneyama T, Hayashi Y, Ebihara A, Doi H, Hanawa T, et al. (2009) Effect of heat treatment on transformation temperatures and bending properties of nickel–titanium endodontic instruments. *International endodontic journal* 42:621-626
135. Yared G (2008) Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J* 41:339-344

136. Yin X, Cheung GS, Zhang C, Masuda YM, Kimura Y, Matsumoto K (2010) Micro-computed tomographic comparison of nickel-titanium rotary versus traditional instruments in C-shaped root canal system. *Journal of endodontics* 36:708-712
137. Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z (2012a) Dentinal microcrack formation during root canal preparations by different NiTi rotary instruments and the self-adjusting file. *Journal of endodontics* 38:232-235
138. Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z (2012b) Dentinal microcrack formation during root canal preparations by different NiTi rotary instruments and the self-adjusting file. *Journal of endodontics* 38:232-235
139. Youssefzadeh S, Gahleitner A, Dorffner R, Bernhart T, Kainberger FM (1999) Dental vertical root fractures: value of CT in detection. *Radiology* 210:545-549
140. Yun HH, Kim SK (2003) A comparison of the shaping abilities of 4 nickel-titanium rotary instruments in simulated root canals. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 95:228-233
141. Zhou X, Jiang S, Wang X, Wang S, Zhu X, Zhang C (2015) Comparison of dentinal and apical crack formation caused by four different nickel-titanium rotary and reciprocating systems in large and small canals. *Dent Mater J* 34:903-909
142. Zmener O, Balbachan L (1995) Effectiveness of nickel-titanium files for preparing curved root canals. *Endodontics & dental traumatology* 11:121-123

Anhang

Tabelle 5: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Handaufbereitung (H)

	AXIAL	RADIAL
H1	2	1
H2	3	1
H3	0	0
H4	4	0
H5	3	0
H6	8	0
H7	2	0
H8	5	1
H9	0	0
H10	0	0
H11	2	1
H12	0	0
H13	1	0
H14	0	0
H15	21	1
H16	2	0
SUMME	53	5
MWERT	3,3125	0,3125
STAABW	5,19	0,48

H1-16: Die Proben der Gruppe H, von 1 bis 16 durchnummeriert.

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

SUMME: Summe der Anzahl von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

MWERT: Mittelwert von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

STAABW: Standardabweichung von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

Tabelle 6: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Komet F6 Sky Taper (K)

	AXIAL	RADIAL
K1	3	0
K2	4	1
K3	1	0
K4	0	0
K5	2	0
K6	2	2
K7	1	0
K8	6	2
K9	1	3
K10	2	1
K11	3	2
K12	9	1
K13	5	0
K14	6	3
K15	1	1
K16	7	0
SUMME	53	16
MWERT	3,3125	1
STAABW	2,6	1,09

K1-16: Die Proben der Gruppe K, von 1 bis 16 durchnummeriert.

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

SUMME: Summe der Anzahl von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

MWERT: Mittelwert von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

STAABW: Standardabweichung von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

Tabelle 7: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Reciproc (R)

	AXIAL	RADIAL
R1	0	0
R2	15	0
R3	0	0
R4	8	3
R5	0	0
R6	0	0
R7	0	0
R8	8	1
R9	3	0
R10	7	1
R11	10	2
R12	3	0
R13	0	2
R14	2	1
R15	1	0
R16	5	0
SUMME	62	10
MWERT	3,875	0,625
STAABW	4,5	0,95

R1-16: Die Proben der Gruppe R, von 1 bis 16 durchnummeriert.

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

SUMME: Summe der Anzahl von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

MWERT: Mittelwert von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

STAABW: Standardabweichung von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

Tabelle 8: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Reciproc Blue (B)

	AXIAL	RADIAL
B1	0	0
B2	0	0
B3	0	0
B4	0	0
B5	1	0
B6	0	1
B7	0	0
B8	4	0
B9	3	0
B10	0	0
B11	2	0
B12	5	1
B13	0	0
B14	1	0
B15	0	0
B16	0	2
SUMME	16	4
MWERT	1	0,25
STAABW	1,63	0,58

B1-16: Die Proben der Gruppe B, von 1 bis 16 durchnummeriert.

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

SUMME: Summe der Anzahl von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

MWERT: Mittelwert von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

STAABW: Standardabweichung von beobachteten Längs- oder Radiärfrakturen.

Tabelle 9: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Handaufbereitung (H) in Mikrometer

	AXIAL			RADIAL		
	K	M	A	K	M	A
H1	0	695	457	0	0	883
H2	0	1787	0	0	0	76
H3	0	0	0	0	0	0
H4	407	516	0	0	0	0
H5	0	0	325	0	0	0
H6	0	896	367	0	0	0
H7	93	0	308	0	0	0
H8	0	0	1314	0	0	90
H9	0	0	0	0	0	0
H10	0	0	0	0	0	0
H11	720	700	0	2075	0	0
H12	0	0	0	0	0	0
H13	87	0	0	0	0	0
H14	0	0	0	0	0	0
H15	0	4314	3472	890	0	0
H16	0	448	242	0	0	0
SUMME	1307	9356	6485	2965	0	1049
MW	81,7	584,7	405,3	185,3	0	65,6
STAABW	198,9	1112,8	885,3	550,6	0	219,8

SUMME: Summe der Frakturlängen

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

K: Frakturen im koronalen Segment.

M: Frakturen im mittleren Segment.

A: Frakturen im apikalen Segment.

MW: Mittelwert.

STABW: Standardabweichung.

Tabelle 10: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Komet F6 Sky Taper (K) in Mikrometer

	AXIAL			RADIAL		
	K	M	A	K	M	A
K1	586	4059	0	0	0	0
K2	0	1998	469	0	0	359
K3	0	0	237	0	0	0
K4	0	0	0	0	0	0
K5	0	0	624	0	0	0
K6	0	848	1200	0	0	2097
K7	446	0	0	0	0	0
K8	0	1682	0	560	0	359
K9	1764	0	0	0	675	1560
K10	0	900	0	0	0	399
K11	0	4283	0	741	2099	0
K12	0	929	181	0	0	379
K13	0	197	281	0	0	0
K14	1878	7682	0	551	974	0
K15	0	584	0	0	0	1167
K16	0	1248	0	0	0	0
SUMME	4674	24410	2992	1852	3748	6320
MWERT	292,1	1525,6	187	115,7	234,2	395
STAABW	622,6	2125,1	332,4	251,9	573,4	645,9

SUMME: Gesamtfrakturlänge

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

K: Frakturen im koronalen Segment.

M: Frakturen im mittleren Segment.

A: Frakturen im apikalen Segment.

MW: Mittelwert.

STAABW: Standardabweichung.

Tabelle 11: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Recipro (R) in Mikrometer

	AXIAL			RADIAL		
	K	M	A	K	M	A
R1	0	0	0	0	0	0
R2	0	488	660	0	0	0
R3	0	0	0	0	0	0
R4	3855	221	0	0	1544	0
R5	0	0	0	0	0	0
R6	0	0	0	0	0	0
R7	0	0	0	0	0	0
R8	0	0	1864	0	0	558
R9	0	1052	0	0	0	0
R10	4749	3091	730	0	0	416
R11	1550	6984	510	0	0	404
R12	782	0	0	0	0	0
R13	0	0	0	0	193	577
R14	410	322	0	0	0	255
R15	439	0	0	0	0	0
R16	0	1466	616	0	0	0
SUMME	11785	13624	4380	0	1737	2210
MWERT	736,6	851,5	273,7	0	108,6	138,1
STAABW	1463,1	1832,6	508,8	0	385,8	222,2

SUMME: Gesamtfrakturlänge

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

K: Frakturen im koronalen Segment.

M: Frakturen im mittleren Segment.

A: Frakturen im apikalen Segment.

MW: Mittelwert.

STABW: Standardabweichung.

Tabelle 12: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Recipro Blue (B) in Mikrometer

	AXIAL			RADIAL		
	K	M	A	K	M	A
B1	0	0	0	0	0	0
B2	0	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	0	0	0
B4	0	0	0	0	0	0
B5	1076	0	0	0	0	0
B6	0	0	0	0	0	105
B7	0	0	0	0	0	0
B8	0	726	377	0	0	0
B9	0	1595	1029	0	0	0
B10	0	0	0	0	0	0
B11	326	0	0	0	0	0
B12	0	1743	762	0	360	0
B13	0	0	0	0	0	0
B14	0	523	0	0	0	0
B15	0	0	0	0	0	0
B16	0	0	0	0	693	0
SUMME	1402	4587	2168	0	1053	105
MWERT	87,6	286,7	135,5	0	65,8	6,6
STAABW	275,8	581,2	314,9	0	189,8	26,2

SUMME: Gesamtfrakturlänge

AXIAL: vertikale Frakturen, die sich im Wurzelkanal befinden.

RADIAL: horizontale Frakturen, die sich in dem Bereich zwischen der Kanalwand und der Peripherie befinden.

K: Frakturen im koronalen Segment.

M: Frakturen im mittleren Segment.

A: Frakturen im apikalen Segment.

MW: Mittelwert.

STAABW: Standardabweichung.

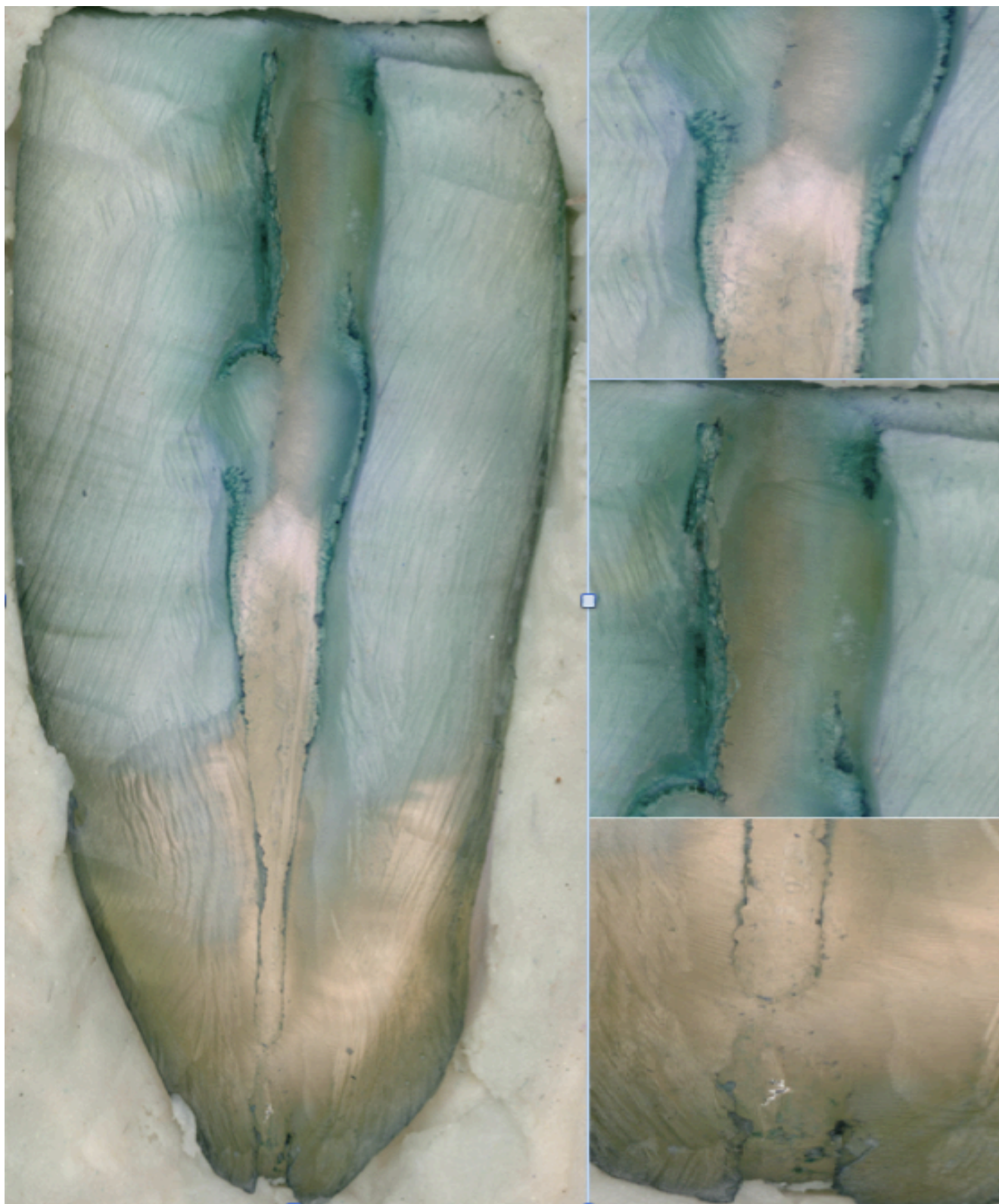


Abbildung 23: Links: Übersichtsaufnahme einer unaufbereiteten Wurzel aus der Kontrollgruppe (U). Rechts: Oben : Detailaufnahme im koronalen Drittel, Mitte: Detailaufnahme des mittleren Drittels und Unten: Detailaufnahme des apikalen Drittels von derselben Wurzel. Es ist ein nicht aufbereiteter Wurzelkanal dargestellt, der keine Defekte aufweist. An der Wurzelkanalwand ist organische Substanz an stärkerer Färbung durch Methylenblau zu erkennen. Auf der geschliffenen Oberfläche sind Schleifspuren zu sehen.

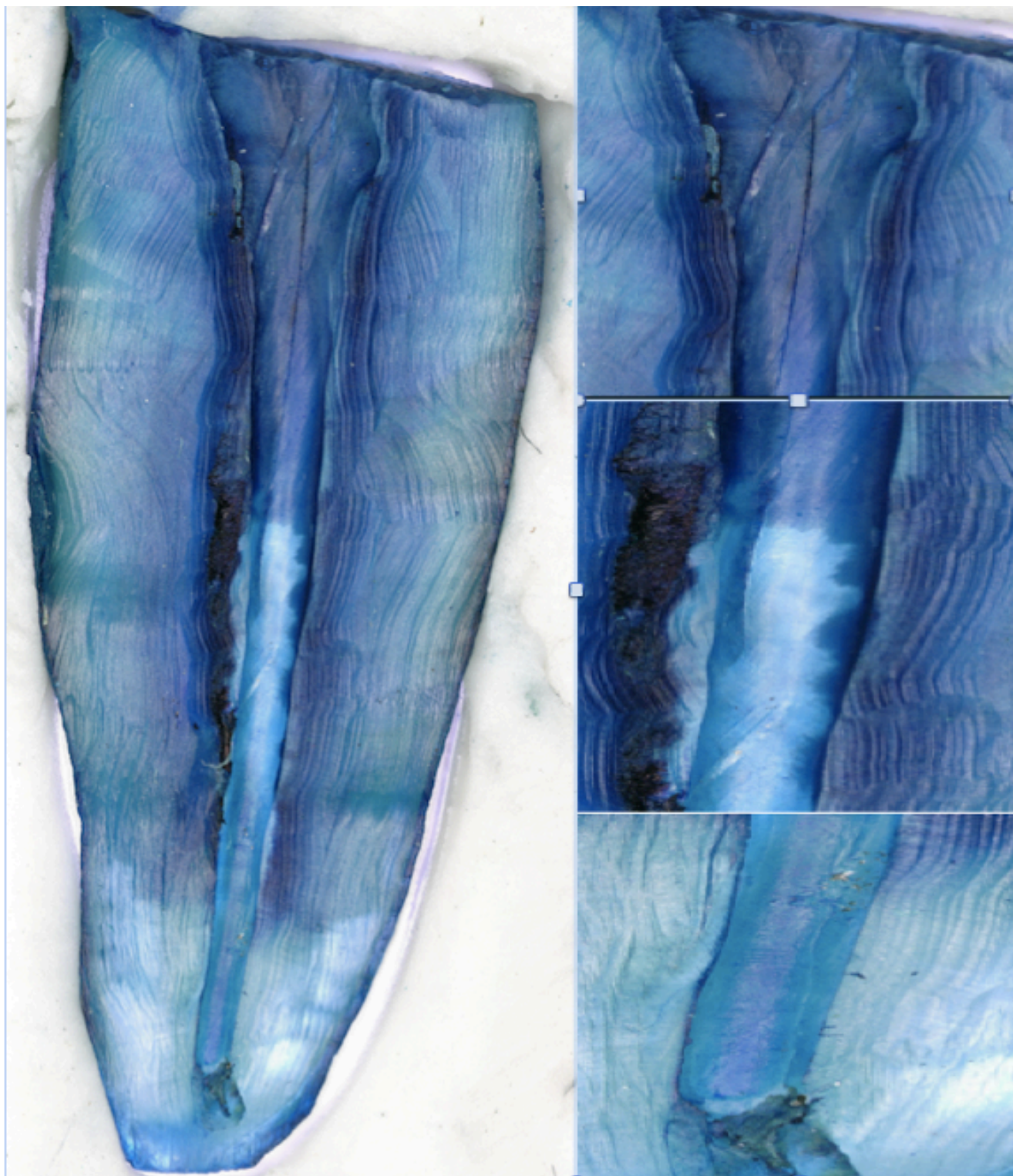


Abbildung 24: Links: Übersichtsaufnahme einer der Wurzel, die mit Handinstrumenten (H) aufbereitet wurde. Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel Oben: im koronalen, Mitte: im mittleren und Unten: im apikalen Drittel. Es ist ein vollständig aufbereiteter Wurzelkanal zu erkennen. Bearbeitungsspuren in der Wurzelkanalwand und Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind durch die Färbung mit Methyleneblau deutlich zu erkennen. Es sind Längsfrakturen im koronalen und mittleren Drittel zu erkennen.

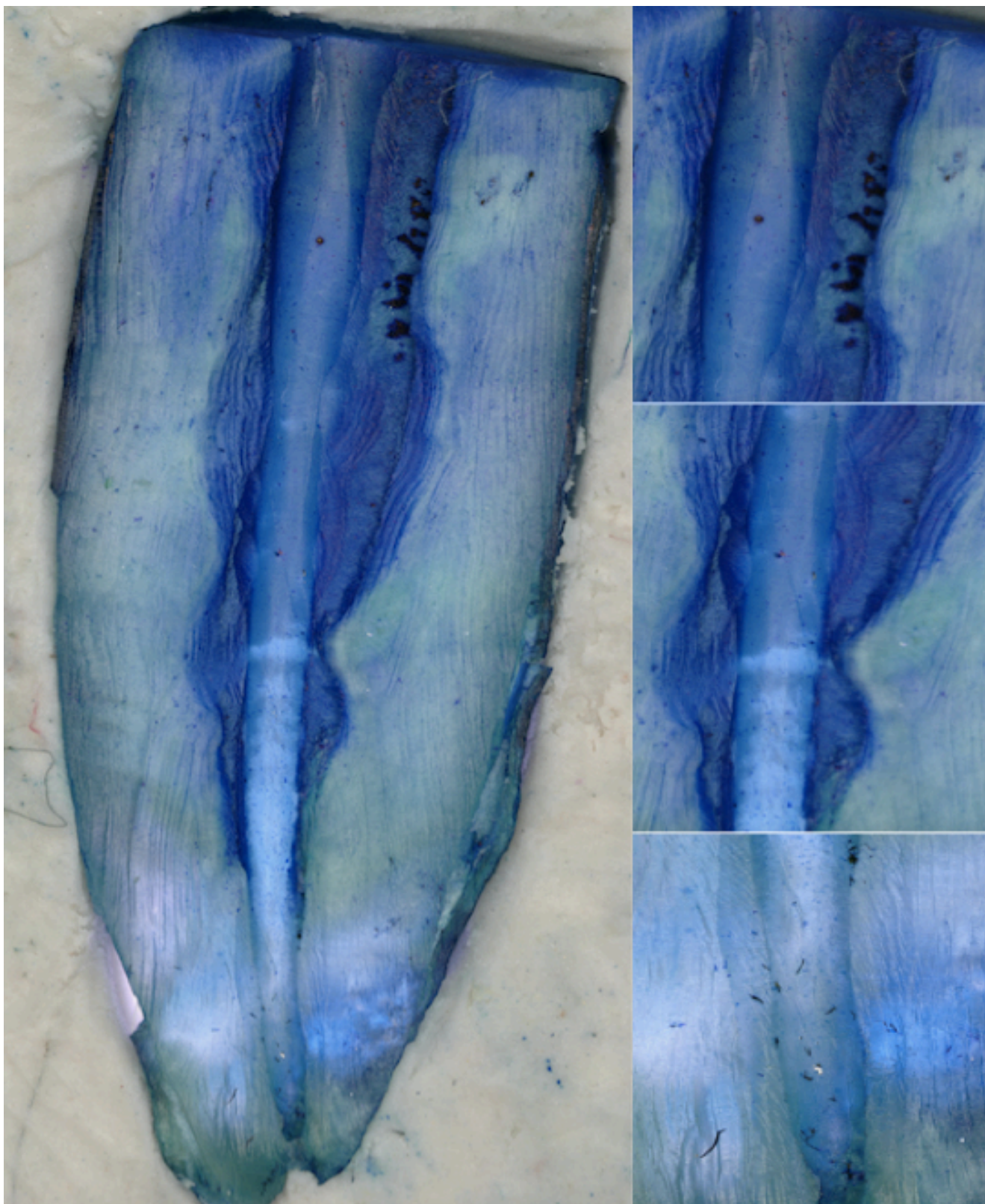


Abbildung 25: Links: Übersichtsaufnahme einer mit dem System Komet F6 Sky Taper aufbereiteten Wurzel (K). Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel; Oben : im koronalen, Mitte: im mittleren und Unten: im apikalen Drittel. Es ist ein vollständig aufbereiteter Wurzelkanal dargestellt. Bearbeitungsspuren in der Wurzelkanalwand sind durch die Färbung mit Methylenblau deutlich zu erkennen und Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind gut zu erkennen. Im mittleren Drittel zeigt der Wurzelkanal Ausbuchtungen. Im koronalen und mittleren Drittel ist rechts eine Kanalausbuchtung dargestellt.

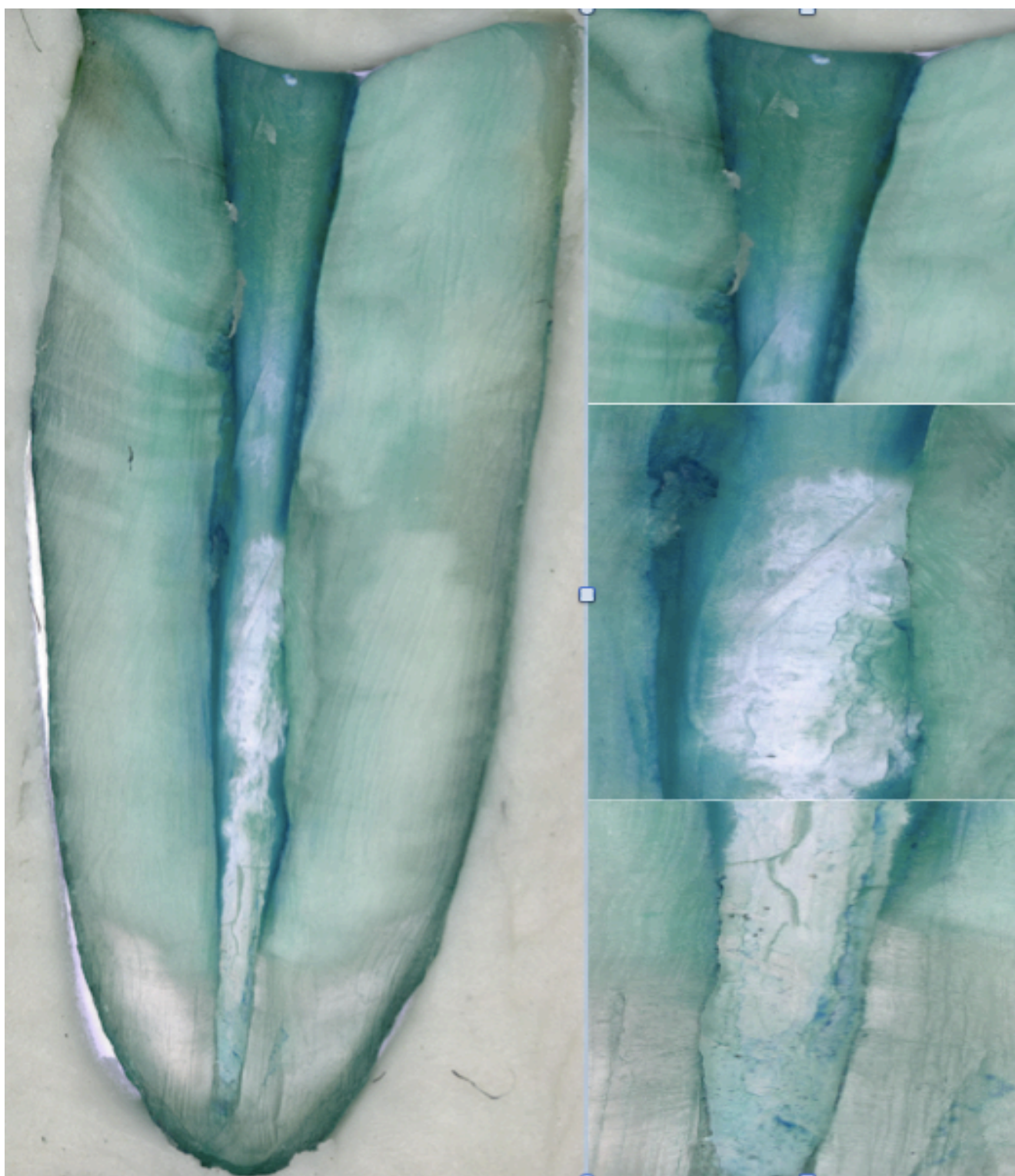


Abbildung 26: Links: Übersichtsaufnahme einer mit dem System Reciproc (R) aufbereiteten Wurzel. Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel: oben: koronales Drittel, Mitte: mittleres Drittel und unten: apikales Drittel. Es ist ein vollständig aufbereiteter Wurzelkanal zu erkennen. Bearbeitungsspuren in der Wurzelkanalwand durch die Aufbereitung sind durch die Färbung mit Methylenblau gut sichtbar, Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind zu erkennen. Koronal ist links eine radiäre Fraktur dargestellt. Im mittleren und apikalen Drittel sind im Kanalverlauf kleinere Längsfrakturen erkennbar.

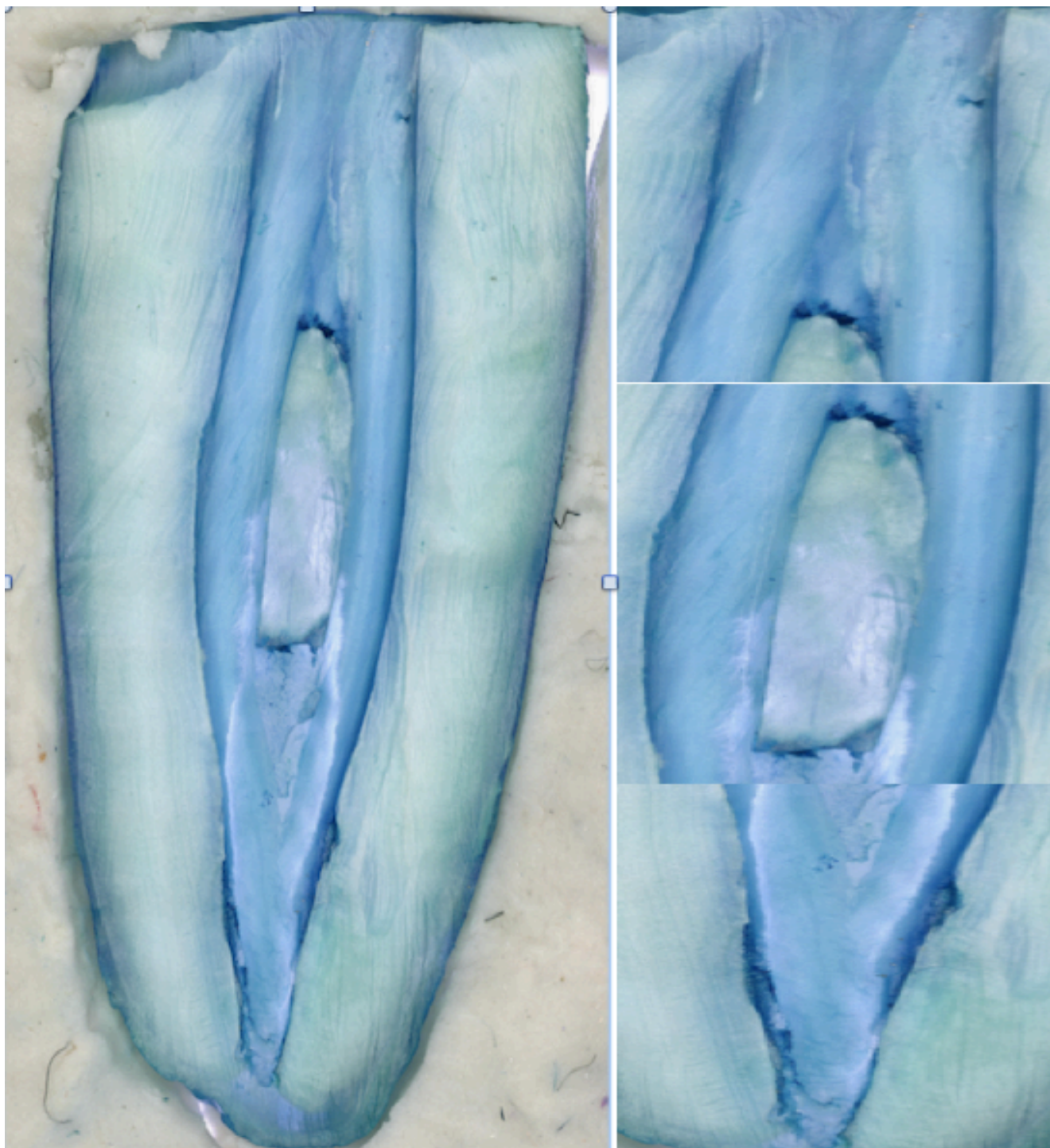


Abbildung 27: Links: Übersichtsaufnahme einer mit dem System Reciproc Blue (B) aufbereiteten Wurzel. Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel; Oben: koronales Drittel, Mitte: mittleres Drittel, Unten: apikales Drittel. Es sind zwei vollständig aufbereitete Wurzelkanäle dargestellt, die sich apikal vereinen. Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind deutlich zu erkennen. Die Wurzelkanäle zeigen keine Dentindefekte durch die Aufbereitung. Im mittleren und apikalen Drittel ist verbliebene organische Substanz an den Wurzelkanalwänden durch die Färbung mit Methyleneblau sichtbar.

License Number	4382080774339
License date	Jul 04, 2018
Licensed Content Publisher	John Wiley and Sons
Licensed Content Publication	International Endodontic Journal
Licensed Content Title	Morphological evaluation of maxillary second molars with fused roots: a micro-CT study
Licensed Content Author	R. Ordinola-Zapata, J. N. R. Martins, C. M. Bramante, et al
Licensed Content Date	Mar 10, 2017
Licensed Content Volume	50
Licensed Content Issue	12
Licensed Content Pages	9
Type of use	Dissertation/Thesis
Requestor type	University/Academic
Format	Print and electronic
Portion	Figure/table
Number of figures/tables	1
Original Wiley figure/table number(s)	Figure 4 Three-dimensional reconstructions (top row) of maxillary second molars with fused roots type 4 (a–q) and some representative axial cross sections of C-shaped canals (d–i).
Will you be translating?	Yes, without English rights
Number of languages	1
Languages	german
Title of your thesis / dissertation	Analyse von Mikrofrakturen von Unterkieferinzisiven bei handinstrumenteller und maschineller Wurzelkanalaufbereitung
Expected completion date	Oct 2018
Expected size (number of pages)	100
Requestor Location	Mrs. Lale Acanal-Lozankovski Gernsbacherstraße 11 Baden Baden, 76530 Germany Attn: Mrs. Lale Acanal-Lozankovski
Publisher Tax ID	EU826007151

License Number	4382090521624
License date	Jul 04, 2018
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	Journal of Endodontics
Licensed Content Title	Dentinal Microcrack Development after Canal Preparation: A Longitudinal in Situ Micro-computed Tomography Study Using a Cadaver Model
Licensed Content Author	Gustavo De-Deus, Júlio César de Azevedo Carvalhal, Felipe Gonçalves Belladonna, Emmanuel João Nogueira Leal Silva, Ricardo Tadeu Lopes, Renato Evando Moreira Filho, Erick Miranda Souza, José Claudio Provenzano, Marco Aurélio Versiani
Licensed Content Date	Sep 1, 2017
Licensed Content Volume	43
Licensed Content Issue	9
Licensed Content Pages	6
Start Page	1553
End Page	1558
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Intended publisher of new work	other
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Format	both print and electronic
Are you the author of this Elsevier article?	No
Will you be translating?	Yes, without English rights
Number of languages	1
Languages	german
Original figure numbers	Figure 2. Cross-sectional images of coronal (c), middle (m), and apical (a) thirds of roots of maxillary premolar teeth before and after root canal preparation with Reciproc system.
Title of your thesis/dissertation	Analyse von Mikrofrakturen von Unterkieferinzisiven bei handinstrumenteller und maschineller Wurzelkanalaufbereitung
Expected completion date	Oct 2018
Estimated size (number of pages)	100
Requestor Location	Mrs. Lale Acanal-Lozankovski Gernsbacherstraße 11 Baden Baden, 76530 Germany Attn: Mrs. Lale Acanal-Lozankovski

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Dreidimensionale Mikro CT Rekonstruktionen (mit einer Auflösung von 19,2 µm) von Wurzelkanalformationen eines zweiten Oberkiefermolaren. Dargestellt sind repräsentative Aufnahmen von fusionierenden Wurzelkanälen (a-t), im Querschnitt c-förmige Wurzelkanäle (d-i), buccale Kanäle, die in separate Foramina münden, aber Verbindung zum palatinalen Kanal besitzen (k-m), und komplett separate buccale Kanäle (n-q) (Ordinola-Zapata et al., 2017) (copyright 2018, mit Genehmigung von John Wiley and sons, s. Anhang) 5
- Abbildung 2: Mikro CT Darstellung von ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer jeweils vor und nach der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. Rot eingekreist und mit roten Pfeilen gekennzeichnete Bereiche wurden durch die maschinelle Aufbereitung nicht bearbeitet (De-Deus et al., 2017a). (copyright 2018, mit Genehmigung von Elsevier, s. Anhang) 9
- Abbildung 3: Links oben: Maschinell alternierende Reciproc R40 Feile (ISO 40) mit einem Taper von 0.06, die in den Versuchen verwendet wurde. Rechts oben: Die in den Versuchsreihen verwendeten Feilen des maschinell rotierenden F6 Sky Taper Systems: links ISO 30 mit einem Taper von 0.06 und rechts ISO 40 mit einem Taper von 0.06. Links unten: Handinstrumentelle Feilen der Größe ISO 15 - 40 mit einem Taper von 0.02, die bei der Handaufbereitung bis auf Arbeitslänge verwendet wurden. rechts unten: maschinell alternierende Reciproc Blue Feile R40 (ISO 40) mit einem Taper von 0.06. 29
- Abbildung 4: Links: Probe H2 mit der eingeführten finalen Feile mit den Diamantschleifern für die Längsabsplattung. Rechts: Probe H5 nach der Aufspaltung..... 30
- Abbildung 5: 3D Lichtmikroskop VHX 5000, Keyence, Japan..... 31
- Abbildung 6: Beispiel für eine Längsfraktur und eine radiäre Fraktur. Der obere Pfeil zeigt auf eine intrakanaläre Längsfraktur. Der untere Pfeil zeigt auf eine radiäre Fraktur, die von der Kanalwand nach Peripher verläuft. 32

Abbildung 7:	Fließender Übergang einer Infraktur (grüner Pfeil, Farbstoff Methylenblau nicht eingedrungen) in eine Längsfraktur (roter Pfeil, Methylenblau ist eingedrungen).	33
Abbildung 8:	Lichtmikroskopische Aufnahme einer Probe links vor und rechts nach der Aufbereitung. Die schwarzen Pfeile zeigen auf die erweiterten bzw. neuentstandenen Defekte.	34
Abbildung 9:	Rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Wurzeloberfläche einer Probe nach der Wurzelkanalaufbereitung. Die Aufnahmen zeigen denselben Bereich in verschiedenen Vergrößerungen. Die vorhandenen Frakturen verlaufen nur in der oberflächlichen, schollenförmig aufliegenden Zementschicht. Das sich darunter befindende Wurzelentin zeigt keine Defekte.	35
Abbildung 10:	Fraktur an der linken Kanalwand der Probe K11 nach der Aufbereitung mit dem maschinell rotierendem System F6 Sky Taper. Die Frakturlinie verläuft quer von der Kanalinnenwand bis zur Wurzeloberfläche.	36
Abbildung 11:	Verteilung der Anzahl der axialen Frakturen in den Gruppen U, H, K, R und B	37
Abbildung 12:	Verteilung der Anzahl der radialen Frakturen in den Gruppen U, H,K,R und B	37
Abbildung 13:	Vergrößert dargestellte Längsfrakturen im Kanal nach der Handaufbereitung der Probe H15 (links) und deren Messung in Mikrometer (rechts).	39
Abbildung 14:	Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe K14 nach der Aufbereitung mit Komet F6 Sky Taper (links) und Messung der Längsfrakturen in Mikrometer (rechts).	40
Abbildung 15:	Vergrößerte Darstellung der axialen Mikrofrakturen an der Kanalwand der Probe B9 nach der Aufbereitung mit Reciproc Blue (links) und deren Messung in Mikrometer (rechts).	40
Abbildung 16:	Vergrößerte Darstellung der axialen Mikrofrakturen an der Kanalwand der Probe R14 nach Aufbereitung mit dem Reciproc (links) und deren Messung in Mikrometer (rechts).	41

Abbildung 17:	Verteilung von axialer Gesamfrakturlänge in μm in den Gruppen U, H, K, R und B.....	41
Abbildung 18:	Verteilung von radialer Gesamfrakturlänge in μm in den Gruppen U, H, K, R und B.....	42
Abbildung 19:	Mikro CT Aufnahmen von der Probe H15 aus der Handaufbereitungsgruppe: Rote Pfeile stellen die beobachteten Querfrakturen dar. Die grünen Pfeile zeigen auf den zweiten Kanal, der sich ab der Mitte des Hauptwurzelkanals abzweigt.....	45
Abbildung 20:	Mikro CT Aufnahmen von der Probe K14. Rote Pfeile zeigen auf beobachtete Infrakturen.....	46
Abbildung 21:	Vergleich der Mikro CT Aufnahme der Probe K14 mit der lichtmikroskopischen Aufnahme: Die einzige Mikrofraktur, die auf beiden Aufnahmen zugleich beobachtet wurde. Der Zahn wurde mit der beschliffenen Seite auf dem Träger aufgenommen. So zeigt sich die Fraktur spiegelverkehrt.....	46
Abbildung 22:	Mikro CT Aufnahmen von der Probe B1. Rote Pfeile zeigen auf beobachtete Infrakturen.....	47
Abbildung 23:	Links: Übersichtsaufnahme einer unaufbereiteten Wurzel aus der Kontrollgruppe (U). Rechts: Oben : Detailaufnahme im koronalen Drittel, Mitte: Detailaufnahme des mittleren Drittels und Unten: Detailaufnahme des apikalen Drittels von derselben Wurzel. Es ist ein nicht aufbereiteter Wurzelkanal dargestellt, der keine Defekte aufweist. An der Wurzelkanalwand ist organische Substanz an stärkerer Färbung durch Methylenblau zu erkennen. Auf der geschliffenen Oberfläche sind Schleifspuren zu sehen.	85
Abbildung 24:	Links: Übersichtsaufnahme einer der Wurzel, die mit Handinstrumenten (H) aufbereitet wurde. Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel Oben: im koronalen, Mitte: im mittleren und Unten: im apikalen Drittel. Es ist ein vollständig aufbereiteter Wurzelkanal zu erkennen. Bearbeitungsspuren in der Wurzelkanalwand und Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind durch die Färbung mit Methylenblau deutlich zu	

erkennen. Es sind Längsfrakturen im koronalen und mittleren Drittel zu erkennen..... 86

Abbildung 25: Links: Übersichtsaufnahme einer mit dem System Komet F6 Sky Taper aufbereiteten Wurzel (K). Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel; Oben : im koronalen, Mitte: im mittleren und Unten: im apikalen Drittel. Es ist ein vollständig aufbereiteter Wurzelkanal dargestellt. Bearbeitungsspuren in der Wurzelkanalwand sind durch die Färbung mit Methylenblau deutlich zu erkennen und Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind gut zu erkennen. Im mittleren Drittel zeigt der Wurzelkanal Ausbuchtungen. Im koronalen und mittleren Drittel ist rechts eine Kanalausbuchtung dargestellt..... 87

Abbildung 26: Links: Übersichtsaufnahme einer mit dem System Reciproc (R) aufbereiteten Wurzel. Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel: oben: koronales Drittel, Mitte: mittleres Drittel und unten: apikales Drittel. Es ist ein vollständig aufbereiteter Wurzelkanal zu erkennen. Bearbeitungsspuren in der Wurzelkanalwand durch die Aufbereitung sind durch die Färbung mit Methylenblau gut sichtbar, Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind zu erkennen. Koronal ist links eine radiäre Fraktur dargestellt. Im mittleren und apikalen Drittel sind im Kanalverlauf kleinere Längsfrakturen erkennbar..... 88

Abbildung 27: Links: Übersichtsaufnahme einer mit dem System Reciproc Blue (B) aufbereiteten Wurzel. Rechts: Detailaufnahmen derselben Wurzel; Oben: koronales Drittel, Mitte: mittleres Drittel, Unten: apikales Drittel. Es sind zwei vollständig aufbereitete Wurzelkanäle dargestellt, die sich apikal vereinen. Schleifspuren auf der geschliffenen Oberfläche sind deutlich zu erkennen. Die Wurzelkanäle zeigen keine Dentindefekte durch die Aufbereitung. Im mittleren und apikalen Drittel ist verbliebene organische Substanz an den Wurzelkanalwänden durch die Färbung mit Methylenblau sichtbar..... 89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verteilung der axialen und radialen Frakturen.....	38
Tabelle 2: Verteilung der Anzahl von Frakturen im koronalen, mittleren und apikalen Drittel.	39
Tabelle 3: Summen der Längsfrakturlänge (AXIAL) und Länge der radiären Frakturen (RADIAL) und Mittelwerte der Frakturlängen (in Klammern), gemessen in Mikrometer.....	42
Tabelle 4: Verteilung der Frakturlänge und mittlere Frakturlängen (in Klammern) im koronalen, mittleren und apikalen Segment gemessen in Mikrometer.....	43
Tabelle 5: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Handaufbereitung (H)	77
Tabelle 6: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Komet F6 Sky Taper (K)	78
Tabelle 7: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Reciproc (R).....	79
Tabelle 8: Anzahl der Frakturen in der Gruppe Reciproc Blue (B).....	80
Tabelle 9: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Handaufbereitung (H) in Mikrometer.....	81
Tabelle 10: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Komet F6 Sky Taper (K) in Mikrometer.....	82
Tabelle 11: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Reciproc (R) in Mikrometer	83
Tabelle 12: Gesamtfrakturlängen von Proben der Gruppe Reciproc Blue (B) in Mikrometer.....	84

Danksagung

Ich danke Herrn Professor Stefan Rupf ganz herzlich für die tatkräftige Unterstützung, für Ideen, Ratschläge und die intensive Betreuung.

Der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde und ihrem Direktor, Prof. Dr. Matthias Hannig, danke ich für die Möglichkeit der Nutzung der Geräte, die für diese Untersuchung notwendig waren.

Frau Dr. med. vet. Christina Körbel aus dem Institut für Klinisch-Experimentelle Chirurgie Universität des Saarlandes danke ich für die Durchführung der Mikro CT Untersuchungen.

Ich danke meinem geliebten Ehemann Dr. Novica Lozankovski für die liebevolle Unterstützung und das unermüdliche Motivieren.