

AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND-
UND KIEFERHEILKUNDE

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Roland Frankenberger
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg
in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,
Standort Marburg, Abteilung für Zahnerhaltungskunde

**Lichtmikroskopische Analyse des Wurzelentins nach
Kanalinstrumentierung mittels vier verschiedener
maschineller Nickel-Titan-Feilensysteme**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Vera Elisabeth Vosen
aus Minden

Marburg 2013

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg
am: 11.07.2013

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereiches

Dekan: Prof. Dr. M. Rothmund

Referent: Prof. Dr. R. Frankenberger

Korreferent: Prof. Dr. R. Mengel

Für meine liebe Oma Koby

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| 1 Einleitung: Hintergrund und Problemstellung | 1 |
| 2 Literaturübersicht | 3 |
| 2.1 Indikationen für Endodontie | 3 |
| 2.2 Ziele der Wurzelkanalbehandlung/ Qualitätsrichtlinien | 3 |
| 2.3 Instrumentarium | 3 |
| 2.3.1 Edelstahl-Hand-Instrumente | 3 |
| 2.3.2 Edelstahlinstrumente mit erhöhter Flexibilität | 5 |
| 2.3.3 Nickel-Titan-Instrumente | 5 |
| 2.3.4 Maschinelle Aufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten | 6 |
| 2.3.5 Neue Entwicklungen in der Endodontie | 7 |
| 2.4 Aufbereitungstechniken | 11 |
| 2.4.1 Apikal-koronale Techniken | 11 |
| 2.4.2 Koronal-apikale Techniken | 12 |
| 2.5 Eigenschaften der Wurzelkanalsysteme | 14 |
| 2.5.1 Schneid- und Reinigungsleistung | 14 |
| 2.5.2 Drehmoment | 15 |
| 2.6 Wurzelkanalspüllösungen | 16 |
| 2.7 Zur Anatomie des Dentins | 19 |
| 2.7.1 Dentin | 19 |
| 2.7.2 Einfluss des Dentins auf die Rissbildung | 20 |
| 2.8 Mögliche Rissbildungen in der Zahnhartsubstanz | 20 |
| 2.8.1 Rissbildung durch Wurzelkanalbehandlung | 21 |
| 2.8.2 Einfluss der Wurzelkanalaufbereitung | 21 |
| 2.8.3 Einfluss der medikamentösen Einlage | 21 |
| 2.8.4 Einfluss der Wurzelkanalfüllung | 22 |
| 2.8.5 Einfluss von Revisionen | 22 |
| 2.8.6 Einfluss der Laser-Anwendung zur Reinigung des Wurzelkanals | 23 |
| 2.9 Vertikale Wurzelfrakturen | 23 |
| 2.9.1 Visualisieren von Rissen in der Zahnhartsubstanz | 25 |
| 2.9.2 Röntgen-Technik | 25 |
| 2.9.3 Computertomographie | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 2.9.4 Cone beam computed tomography (CBCT) | 25 |
| 2.9.5 Ultraschall-Analyse | 26 |
| 2.9.6 Transillumination | 26 |
| 3 Versuchsplanung und Zielsetzung | 27 |
| 3.1 Nullhypothesen | 29 |
| 4 Material und Methode | 30 |
| 4.1 Versuchsdesign | 30 |
| 4.2 Versuchsvorbereitung | 31 |
| 4.2.1 Auswahl der Versuchszähne | 31 |
| 4.2.2 Reinigung der Versuchszähne | 31 |
| 4.2.3 Vorbereitung der Versuchszähne | 31 |
| 4.2.4 Herstellung der Aufbereitungsblöckchen | 32 |
| 4.2.5 Herstellung der Silikonformen für die Fotodokumentation | 34 |
| 4.3 Maschinelle Aufbereitung der Versuchszähne | 35 |
| 4.3.1 Versuchsgruppe I: Aufbereitung mit dem <i>GT-Series X-</i> System | 36 |
| 4.3.2 Versuchsgruppe II: Aufbereitung mit dem <i>Mtwo-</i> System | 38 |
| 4.3.3 Versuchsgruppe III: Aufbereitung mit dem <i>Reciproc-</i> System | 39 |
| 4.3.4 Versuchsgruppe IV: Aufbereitung mit dem <i>S-ApeX-</i> System | 40 |
| 4.4 Auswertung des Bildmaterials | 41 |
| 4.5 Statistische Auswertung | 46 |
| 5 Ergebnisse | 47 |
| 5.1 Ergebnisse der 4 Aufbereitungssysteme im Vergleich | 47 |
| 5.1.1 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile - apikal | 48 |
| 5.1.2 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile - mitte | 49 |
| 5.1.3 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile - koronal | 50 |
| 5.1.4 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile - insgesamt | 51 |
| 5.2 Mikrorissanalysen der vier verschiedenen Systeme im Überblick | 53 |
| 5.2.1 Mikrorisslängen nach Aufbereitung mit dem <i>GT-Series X-</i> System | 53 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2.2 Mikrorisslängen nach Aufbereitung mit dem <i>Mtwo</i> -System | 54 |
| 5.2.3 Mikrorisslängen nach Aufbereitung mit dem <i>Reciproc</i> -System | 55 |
| 5.2.4 Mikrorisslängen nach Aufbereitung mit dem <i>S-ApeX</i> -System | 55 |
| 5.3 Aufbereitungszeiten | 57 |
| 6 Diskussion | 61 |
| 6.1 Diskussion der Problemstellung und Zielsetzung | 61 |
| 6.2 Diskussion der Methodik | 61 |
| 6.2.1 Anforderungen an Versuchszähne | 61 |
| 6.2.2 Kürzung der Versuchszähne | 62 |
| 6.2.3 Herstellung des simulierten Parodonts | 62 |
| 6.3 Die maschinelle Aufbereitung: Auswahl der untersuchten Feilen-Systeme | 63 |
| 6.3.1 <i>GT-Series X</i> -System | 63 |
| 6.3.2 <i>Mtwo</i> -System | 63 |
| 6.3.3 <i>Reciproc</i> -System | 64 |
| 6.3.4 <i>S-ApeX</i> -System | 65 |
| 6.4 Das Spülkonzept | 66 |
| 6.5 Mikrorissdarstellung | 66 |
| 6.6 Diskussion der Ergebnisse | 70 |
| 6.6.1 Prüfung der Nullhypothesen | 70 |
| 6.6.2 <i>GT-Series X</i> - System | 72 |
| 6.6.3 <i>Mtwo</i> -System | 73 |
| 6.6.4 <i>Reciproc</i> -System | 73 |
| 6.6.5 <i>S-ApeX</i> -System | 74 |
| 6.7 Aufbereitungszeiten der Feilensysteme | 75 |
| 7 Klinische Schlussfolgerung | 77 |
| 8 Englische Zusammenfassung | 79 |
| 9 Deutsche Zusammenfassung | 81 |

| | |
|---|------------|
| 10 Literaturverzeichnis | 83 |
| 11 Abkürzungsverzeichnis | 94 |
| 12 Materialliste | 96 |
| 13 Verzeichnis der akademischen Lehrer | 99 |
| 14 Danksagung | 100 |

1 Einleitung

Hintergrund und Problemstellung

Die Endodontie ist ein essentieller Bestandteil der Zahnerhaltung. Eine verbesserte Methodik von Wurzelkanalbehandlungen kann neben einem adäquaten Spülprotokoll und einer suffizienten Guttaperchafüllung zu einer längeren Verweildauer der Zähne im Patientenmunde führen. Die Gründe für die Notwendigkeit einer endodontischen Behandlung sind vielschichtig. So muss ein Zahn u.a. aus prothetischen Gründen, vor einer Wurzelspitzenresektion, einer Wurzelamputation oder einer Hemisektion oder bei irreversibler Schädigung der Pulpa endodontisch behandelt werden [21]. Auch ein Trauma kann eine Wurzelkanalbehandlung notwendig machen. Die Hauptursache pulpaler Erkrankungen ist mit 95% die Karies [38]. Daneben können aber auch mechanische, chemisch-toxische, osmotische oder thermische Faktoren eine Rolle spielen. Dringen die Toxine der Karies verursachenden Bakterien über die Dentinkanälchen zur Pulpa kann es zu einer akuten Entzündung der Pulpa kommen. Bei fehlender Beseitigung dieses Reizes wird die Pulpa irreversibel geschädigt und kann durch nachfolgende bakterielle Besiedelung der Pulpakammer nekrotisch werden [38]. Tritt dieser Fall ein ist eine Trepanation mit nachfolgender Wurzelkanalbehandlung unumgänglich. Das Ziel ist hierbei die Entfernung des nekrotischen oder vitalen Pulpagewebes, sowie das Erlangen einer Keimfreiheit des gesamten Wurzelkanalsystems. Bei der Wurzelkanalaufbereitung ist besonders darauf zu achten, dass der Behandler nicht von der physiologischen Wurzelkanalkonfiguration abweicht und ein von apikal nach koronal konischer Kanal zur Aufnahme der späteren Wurzelfüllung geformt wird. Die apikale Konstriktion sollte hierbei in jedem Falle erhalten werden, zugleich muss die endgültige Arbeitslänge mit der zuvor festgelegten Arbeitslänge übereinstimmen [21]. Grundsätzlich stehen dem Anwender manuelle oder maschinelle Systeme für die Aufbereitung der Wurzelkanäle zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit sollen maschinelle NiTi-Systeme auf ihre Tendenz, Mikrorisse im Dentin zu verursachen, hin untersucht werden. Trotz modernster Entwicklungen auf dem Gebiet der Endodontie kann es dennoch zum Scheitern einer Wurzelkanalbehandlung kommen. Als Gründe hierfür sind aufzuführen: Perforationen, die während der Aufbereitung auftreten, zurückgebliebene Mikroorganismen in nicht bearbeiteten Wurzelkanalabschnitten, frakturierte Instrumente, eine *Via falsa*, eine apikale oder koronale Leaka-

ge, insuffiziente, inhomogene Wurzelkanalfüllungen, apikal extrudiertes Wurzelkanalfüllmaterial, sowie möglicherweise durch Druck entstandene Risse im Wurzelentin und ggf. erst nach Jahren auftretende vertikale Wurzelfrakturen (VRFs). Speziell die Problematik der Mikrorissentstehung im Restentin mit der Gefahr der Entstehung von vertikalen Wurzelfrakturen soll in dieser Arbeit beleuchtet werden. Instrumente mit geringer Rissbildungstendenz im Dentin könnten die Erfolgchancen von endodontischen Behandlungen möglicherweise erheblich steigern. Zudem stellt sich die Frage wie substanzschonend neueste NiTi-Systeme bei der Instrumentierung des Wurzelkanals vorgehen und ab welcher Instrumentengröße und Konizität die Rissbildungstendenz zunimmt. Bisher gibt es nur wenige Studien zu diesem Thema und auch die Erkenntnisse über die tatsächlichen Folgen dieser Mikrorisse sind bisher unklar.

2 Literaturübersicht

2.1 Indikationen für eine endodontische Therapie

Die europäische Gesellschaft für Endodontie (European Society of Endodontology, ESE) sowie die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde (DGZMK) sehen als Indikationen für Wurzelkanalbehandlungen eine irreversibel geschädigte oder nekrotische Pulpa mit oder ohne klinische und/oder röntgenologische Hinweise auf eine apikale Parodontitis. Desweiteren wird die elektive Devitalisierung angegeben um z.B. Platz für eine Stiftverankerung zu schaffen, bei zweifelhaftem Zustand der Pulpa vor prothetischen Restaurationen, bei Eröffnung der Pulpa während der Präparation gekippt stehender Zähne oder vor einer Wurzelspitzenresektion (WSR) oder Hemisektion [21,25].

2.2 Ziele der Wurzelkanalbehandlung/ Qualitätsrichtlinien

Ziele der Wurzelkanalaufbereitung sind die Entfernung von verbliebenem Pulpagewebe, sowie die Elimination von Mikroorganismen und Debris. Der präparierte Kanal muss den originären Kanal beinhalten. Desweiteren soll die apikale Konstriktion erhalten bleiben, sodass der aufbereitete Kanal sich nach apikal verengt, d.h. von apikal nach koronal konischer wird. Wichtig ist zudem eine ausreichende Spülung des Wurzelkanals während der Aufbereitung. Die vor der Aufbereitung festgelegte Arbeitslänge sollte während der Behandlung nicht reduziert werden [25].

2.3 Instrumentarium

2.3.1 Edelstahl-Hand-Instrumente

Für die manuelle Aufbereitung werden am häufigsten drei Grundtypen von Edelstahlfeilen mit umlaufender Schneide und schraubenartigem Design verwendet, die nachfolgend aufgeführt werden.

Hedström-Feilen

Diese Feilen bestehen aus gefrästen Rundstählen, besitzen einen Scheidewinkel von 60-65° und haben eine umlaufende Schneidkante. Angewendet werden sie ausschließlich ziehend mit leichtem Druck an die Kanalwand und keinesfalls drehend. Diese lineare Arbeitsweise soll eine Fraktur, der durch ei-

nen kleinen Instrumentenkern sehr frakturgefährdeten Feilen verhindern [38]. Bezüglich des Materialabtrags im Wurzelkanal sind die Hedströmfeilen effizienter als die anderen Handinstrumente [62,77].

Reamer

Reamer bestehen zumeist aus verdrehten Vier- oder Dreikantstählen mit einem Schneidewinkel von 10-30°, weisen eine halbe bis ganze Verwindung pro Millimeter auf und sind sehr bruchsicher. Angewendet werden sie mit 90° bis 120° Drehungen, wobei sie drehend-schabend arbeiten [38].

K-Feilen

Auch diese Handinstrumente weisen einen dreieckigen oder viereckigen Querschnitt auf. Im Gegensatz zu den Reamern haben sie einen Schneidewinkel von 25-40° mit anderthalb bis zweieinhalb Verwindungen pro Millimeter. Sie sind durch eine erhöhte Bruchresistenz gekennzeichnet und werden drehend oder feilend verwendet [77]. Wie auch die Reamer haben K-Feilen eine relativ hohe Resistenz gegen Torsionsfrakturen [97]. Abbildung 1 stellt die Instrumentengrundform dar, Abbildung 2 zeigt die charakteristischen Querschnitte der Handfeilen.

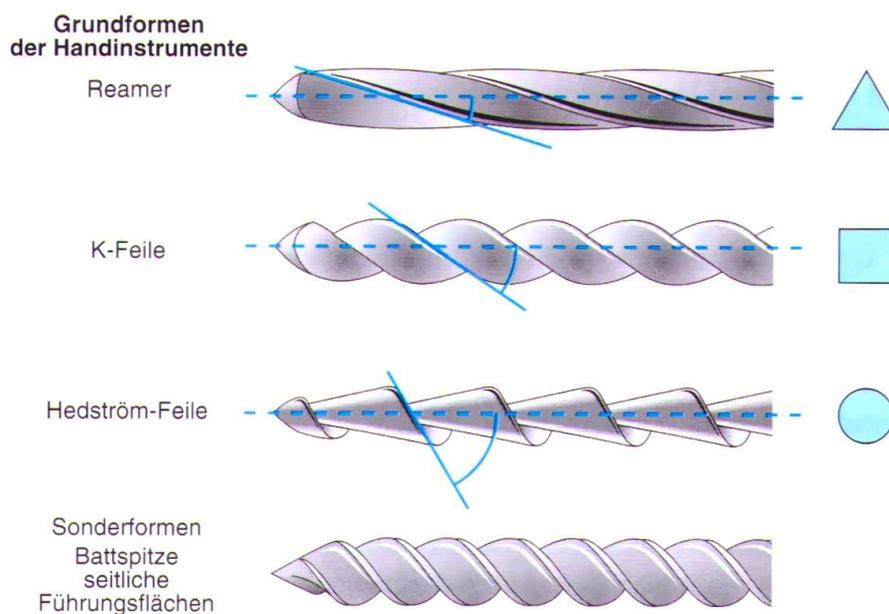


Abb. 1: Grundformen der Handinstrumente aus Lehmann E.: Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnerhaltung (2009)

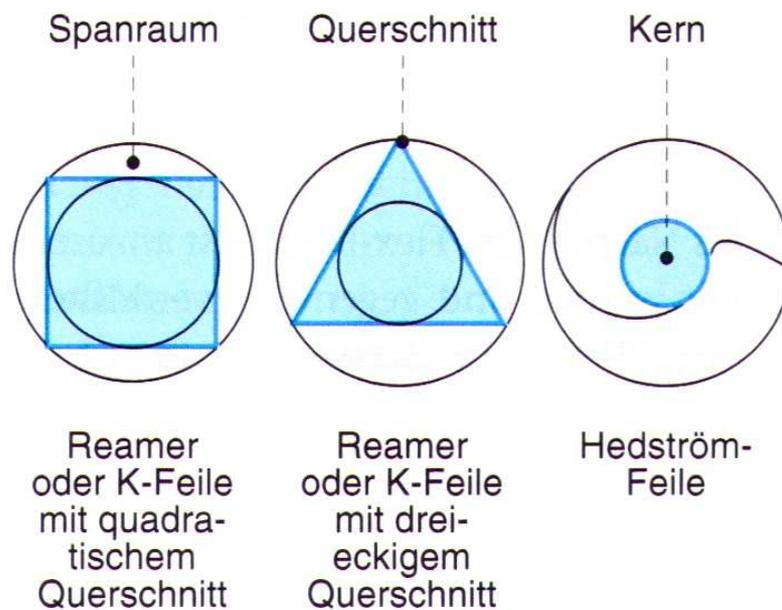


Abb. 2: Querschnitt, Spanraum und Kern der Handinstrumente aus Lehmann E: Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnerhaltung (2009)

2.3.2 Edelinstrumente mit erhöhter Flexibilität

Bei diesen Instrumenten sorgen rhombische oder dreieckige Durchmesser und der daraus resultierende geringere Kerndurchmesser für eine Erhöhung der Flexibilität sowie einen vergrößerten Spanraum. Ihre Bruchfestigkeit erreicht nicht ganz die der oben genannten Feilen, die Instrumente können allerdings speziell bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle zur Vermeidung von Kanalbegradigungen beitragen. Ein weiteres besonderes Merkmal ist die sog. Batt-Spitze, eine nicht-schneidende Instrumentenspitze, welche neben einem geringeren Perforationsrisiko ebenfalls durch selbstzentrierendes Arbeitsverhalten einer Kanalbegradigung vorbeugt (z.B. Flexicut-Feilen) [77].

2.3.3 Nickel-Titan-Instrumente

Neben den maschinellen Nickel-Titan-Feilen werden auch manuelle Feilen aus Nickel-Titan-Legierungen, einem Vertreter der Formgedächtnis-Legierungen hergestellt. Dieses neue Material wurde bereits 1958 vom Naval Ordnance Laboratory für die amerikanische Marine entwickelt. Der Ausdruck *NitiNOL* ist ein Akronym (Kurzwort) und steht für "**N**ickel **T**itanium **N**aval **O**rdnance **L**aboratory". Maschinelle Feilen werden zumeist aus 55-Nitinol hergestellt, welcher zu 55 m% aus Nickel und zu 45 m% aus Titan besteht [99]. Nickel-Titan-Legierungen besitzen im Vergleich zu herkömmlichen Edelinstrumenten ein fünffach

niedrigeres Elastizitätsmodul und sind pseudoelastisch [103]. Für die manuellen NiTi-Instrumente steht sowohl 55-Nitinol, als auch 60-Nitinol zur Verfügung, welcher zu 60 m% aus Nickel und zu 40 m% aus Titan hergestellt wird [77]. Nach *Walia et al.* zeichnen sich NiTi-Feilen im Vergleich zu den Edelstahlfeilen durch eine dreifach höhere Flexibilität [103] aus und haben eine höhere Frakturresistenz [97]. Im Gegensatz zu den verdrehten Edelstahlfeilen werden NiTi-Instrumente durch Fräsung hergestellt [81]. Besonderes Merkmal dieses Instrumententyps ist das Formgedächtnis (sog. "memory shape"), welches beschreibt, dass eine gebogene Feile nach Gebrauch wieder ihren Ausgangszustand annimmt [57]. Die Nutzung der Instrumente erzeugt jedoch Veränderungen der originalen Legierungseigenschaften, die Elastizität nimmt proportional mit der Häufigkeit des Gebrauchs ab [75]. Die flexiblen Instrumente eignen sich besonders für die Aufbereitung gekrümmter Kanäle [103]. Laut *Esposito et al.* ermöglichen Nickel-Titan-Feilen bei gekrümmten Kanälen eine größere apikale Erweiterung bei gleichzeitiger Bewahrung des originären Kanalverlaufs [24]. Nach *Garip et al.* verringert die Anwendung von Nickel-Titan-Instrumenten das Risiko von Strip-Perforationen und Gefahrenzonen in gekrümmten Kanälen [31].

2.3.4 Maschinelle Aufbereitung mit NiTi-Feilen

Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung ist der manuellen ebenbürtig [67]. Maschinelle Feilensysteme werden gerne verwendet, da der Anwender damit die Aufbereitungszeit reduzieren kann und es zudem zu weniger Verlagerungen des originären Kanalverlaufs kommt [89]. *Short et al.* gaben jedoch auch zu bedenken, dass die Verwendung rotierender Instrumente ein anderes taktiles Gefühl erfordert, als bei der Benutzung von Edelstahlhandinstrumenten. Die Aufbereitung mit rotierenden Systemen scheint dem Anwender weniger Feedback zu geben, als bei der manuellen Aufbereitung, besonders wenn es darum geht die Kanalkrümmung zu ertasten. Der Behandler sollte bei den maschinellen Systemen nur leichte und vorsichtige Bewegungen ausführen um weniger Kraft auf die Instrumente auszuüben und so die Gefahr einer Instrumentenfraktur zu minimieren [89]. Laut *Liu et al.* ruft die Aufbereitung mit rotierenden NiTi-Feilen mehr Dentindefekte hervor, als die Instrumentierung des Kanals mittels Handfeilen. Hierbei spielte jedoch auch die Arbeitslänge eine Rolle. Die Instrumentierung des Kanals bis kurz vor das apikale Foramen erzeugte signifikant weniger Risse im Wurzeldentin, als eine Überinstrument-

ierung oder die Aufbereitung bis direkt zum Foramen apikale [58]. Bei den NiTi-Instrumenten kann zwischen passiven und aktiven Systemen unterschieden werden.

Passive NiTi-Systeme

Gemeinsames Merkmal der Feilen passiver Systeme sind die kufenartigen Führungsflächen an den Schneidekanten der Instrumente (sog. Radial lands) [79]. Nach *Short et al.* sorgen diese für eine optimale Zentrierung der Feilen im Wurzelkanal [89]. Feilen dieser Generation führen bei gekrümmten Kanalverläufen verglichen mit konventionellen Stahlinstrumenten zu deutlich weniger Kanalverlagerungen [72]. Da die Instrumente über große Flächen Kontakt zur Wurzelkanalwand haben, führte man die Anwendung der Crown-down-Technik für die erste Generation der NiTi-Systeme ein. Vertreter dieser Feilengeneration sind z.B.: *ProFile*, der Vorgänger des in dieser Arbeit untersuchten GT-Series X-Systems: *System GT*, *Quantec* sowie das *Light-Speed*-System, eine Weiterentwicklung des *Canal-Master-U*-Systems [79].

Aktive NiTi-Systeme

Im Gegensatz zu den passiven NiTi-Feilen sind die Instrumente der aktiven NiTi-Systeme aktiv schneidend. Diese Instrumenteneigenschaft soll einer zu starken Friktion der Feile im Wurzelkanal entgegenwirken. Von Nachteil ist jedoch, dass die Instrumente aufgrund dessen die Tendenz haben, sich in den Kanal einzuschrauben wodurch es zu einer Dezentrierung kommen kann [79]. Um diesen Nachteil auszugleichen wurden die Instrumente mit alternierendem Schneidkantendesign und veränderten Schneidekantenwinkeln ausgestattet. Auch unterschiedliche Konizitäten in einer Feilensequenz, sowie variable Konizitäten innerhalb einer Feile sollen ein Einschrauben der Instrumente in den Kanal verhindern [79].

2.3.5 Neue Entwicklungen in der Endodontie

Self-adjusting-file (Redent-Nova)

Die *Self-adjusting-file (SAF)* wurde 2010 von der Firma Redent-Nova neu auf den Markt gebracht. Diese Feile zeichnet sich durch ein komplett neues Design aus. Die SAF hat die Form eines spitz zulaufenden Hohlzylinders und besteht

aus einem komprimierbaren, 120 µm dünnen leicht abrasiven Nickel-Titan-Gitter. Während des Einbringens in einen engen Kanal wird die *SAF* zunächst komprimiert, dehnt sich dann aber aufgrund des Dentinabtrags durch die Aufbereitung des Kanals wieder bis zu ihrem Originaldurchmesser aus und übt leichten Druck auf die Kanalwände aus. Dabei passt sie sich dreidimensional der Kanalform an und ermöglicht somit eine gezielte und gleichmäßige Ausformung aller Kanalanteile [64]. Bei der Instrumentierung C-förmiger Wurzelkanäle arbeitet die *SAF* beispielsweise effektiver als das voll-rotierende System *ProTaper* [91]. Für die gesamte Aufbereitung wird nur eine Feile benötigt [64]. Um die Reinigungsleistung des Instruments zu erhöhen ist das System mit einer permanenten Spülung (z.B. NaOCl) ausgestattet, welche an das Winkelstück angeschlossen werden kann (*VATEA*, *Redent-Nova*) und durch die Vibration der Feile aktiviert wird [64]. Mit der *SAF* wird eine größere Fläche des Wurzelkanals bearbeitet, als mit anderen NiTi-Feilen [70]. In einer Studie von *Yoldaz et al.* zeigten mit der *SAF* aufbereitete Zähne keine Mikrorisse im Wurzeldentin [110]. Die *SAF* produziert verglichen mit *Mtwo* und *ProTaper* tendenziell weniger Dentinrisse [39].

Reciproc-System (VDW)

VDW entwickelte ein neues System, das die Wurzelkanalbehandlung mit nur einem Instrument und reziproker Feilenbewegung ohne vorherige Erstellung eines Gleitpfades möglich machen soll [108]. In einer Studie von *Bürklein et al.* konnte gezeigt werden, dass die Aufbereitung von Wurzelkanälen mit dem *Reciproc*-System signifikant schneller war, als mit den anderen untersuchten Instrumenten und besonders im apikalen Drittel des Wurzelkanals mehr Debris entfernt werden konnte [13]. Nach *Yared* liegen die Vorteile der neuen *Reciproc*-Technik im kostengünstigen Einmalgebrauch nur einer Feile, der Verhinderung einer Prionen-Kreuzkontamination, sowie der geringeren zyklischen Ermüdung des Instruments [108]. Auch *Sonntag* und *Peters* empfehlen den Einmalgebrauch rotierender Instrumente um der Übertragung infektiöser Krankheiten, sowie der Gefahr von Korrosionen vorzubeugen [92]. Die Rissbildungstendenz im Wurzeldentin soll in dieser Studie untersucht werden. Sowohl das *Reciproc*-System, als auch das nachfolgend beschriebene *WaveOne*-System arbeiten mit einer oszillierender Antriebstechnik und einer modifizierten *Balanced-force*-Technik. Die Feilen werden mit 10 Zyklen rezi-

proker Bewegung pro Sekunde betrieben, was in etwa 300 U/Min. entspricht [109]. Hierbei sind die Winkel für die Rotation im und gegen den Uhrzeigersinn unterschiedlich. Mit einer großen Rotation in Schneidrichtung dringt die Feile vorsichtig in den Kanal ein, bei einer kleinen Rotation des Instrumentes in Gegenrichtung erfolgt die automatische Freigabe der *Reciproc*-Feile. Da sich das Instrument von alleine in den Kanal arbeitet ist bei der Aufbereitung nur geringer apikaler Druck notwendig [109]. Die im *VDW.Silver Reciproc*-Motor eingespeicherten Drehwinkel sind kleiner, als die spezifischen Frakturwinkel des Instruments, was die Frakturgefahr der Feilen herabsetzen soll [109].

WaveOne (Dentsply Maillefer)

Auch dieses System arbeitet im Gegensatz zu den vollrotierenden NiTi-Systemen mit einer reziproken Bewegung, d.h. das Instrument ändert während der Aufbereitung seine Drehbewegung. Eine große Drehung in Schneidrichtung gefolgt von einer kleinen Drehung in die Gegenrichtung. Auch hierbei steht für den Hersteller u.a. der verringerte Zeitfaktor für die Aufbereitung im Fokus, dieser sei im Vergleich zu anderen Instrumentensystemen um 40% geringer. Wie die *Reciproc*-Feilen bestehen auch die *WaveOne*-Feilen aus speziell wärmebehandeltem M-Wire-NiTi. Eine Studie von *Kim et al.* in der *Reciproc*-, *WaveOne*- und *ProTaper*-Feilen verglichen wurden zeigte, dass die *Reciproc*-Feilen zwar erst nach einer größeren Zahl von Zyklen frakturierten als *WaveOne*-Feilen, letztere sich jedoch im Gegensatz zu den anderen Feilen durch einen höheren Torsionswiderstand auszeichnen. *Reciproc*- und *WaveOne*-Instrumente scheinen bessere mechanische Eigenschaften zu besitzen [52].

Tabelle 1 listet aktuelle Instrumentensysteme auf.

Tab.1: Aktuelle Feilensysteme

| System (Anbieter) | Technik | Querschnitt | Feilen-zahl | Konizitäten | Besonderheiten |
|--|---------------|--|-------------|------------------------|--|
| <i>AlphaKite</i> (Brasseler) | Crown-down | vierkant | 6 | 2%,3%,4%,6%,8%,10 | <ul style="list-style-type: none"> • Drachenquerschnitt • TiN (Titan-Nitrid)-Beschichtung |
| <i>BioRaCe</i> (FKG) | Single-length | triangulär | 6 | 2%,4%,5%,6%,8% | <ul style="list-style-type: none"> • Battspitze, • alternierende Schneidekanten |
| <i>Easy Shape</i> (Brasseler) | Single-length | S-förmig | 6 | 4%,5%,6% | <ul style="list-style-type: none"> • Doppel-S-Querschnitt • Tin-Beschichtung |
| <i>GTX</i> (Dentsply Maillefer) | Crown-down | triangulär | 6 | 4%,6%,8% | <ul style="list-style-type: none"> • M-Wire-Technologie • breite Spannuten |
| <i>Hyflex CM</i> (Coltène/Whaledent) | Single-length | quadratisch, triangulär | 6 | 4%,6%,8% | <ul style="list-style-type: none"> • kontrollierter Rückstelleffekt (Controlled Memory) |
| Mtwo (VDW) | Single-length | S-förmig | 7 | 4%,5%,6%,7% | <ul style="list-style-type: none"> • Simultaneous Shaping |
| <i>ProTaper Universal</i> (Dentsply Maillefer) | Crown-down | triangulär, konvex ab F3 triangulär konkav | 7 | variabel (2-13%) | <ul style="list-style-type: none"> • Multiple Konizität |
| <i>Reciproc</i> (VDW) | Crown-down | S-förmig | 1 | 5%,6%,8% | <ul style="list-style-type: none"> • reziproke Arbeitsweise • M-Wire-Technologie |
| <i>S-ApeX</i> (FKG) | Single-length | dreieckig | 10 | Inverse Konizität | <ul style="list-style-type: none"> • inverse Konizität • Sollbruchstelle |
| <i>SAF Endo System</i> (ReDent Nova) | Crown-down | Stent-Design | 1 | Flexibler Hohlzylinder | <ul style="list-style-type: none"> • Flexible Hohlfeile • Anpassung an Kanalwand, • permanente Spülung integriert |
| <i>WaveOne</i> (Dentsply Maillefer) | Crown-down | triangulär, konvex | 1 | 6%,8% | <ul style="list-style-type: none"> • Reziproke Feilenbewegung • M-Wire-Technologie |

2.4 Aufbereitungstechniken

Im Allgemeinen kann zwischen apikal-koronalen und koronal-apikalen Methoden unterschieden werden. Beide Techniken sind sowohl mit manuellen, als auch mit maschinellen Systemen durchführbar und haben Vor- und Nachteile, die nachfolgend dargestellt werden sollen.

2.4.1 Apikal-koronale Techniken

Standardisierte Technik

Bei dieser Technik, welche 1961 von *Ingle* eingeführt wurde, wird jedes Instrument auf voller Arbeitslänge in den Kanal eingebracht. Schwierig wird die Anwendung dieser Technik bei engen und gekrümmten Kanälen [44]. Das *Mtwo*-System, welches in dieser Arbeit untersucht wird, verwendet mit der Single-length-Technik ebenfalls die standardisierte Technik.

Step-back Technik

Bei dieser Technik handelt es sich gewissermaßen um eine Weiterentwicklung der o.g. standardisierten Technik. Hierbei werden die Feilen zunächst auf volle Arbeitslänge gebracht um den Kanal zu erweitern. Ist die gewünschte apikale Aufbereitungsgröße erreicht (AMF=Apikale Master Feile), wird bei den nachfolgenden Instrumenten mit zunehmenden ISO-Größen die Arbeitslänge um jeweils 1 mm verkürzt, bis die abschließende Feile (FF= Final File) erreicht ist. Als Vorteil dieser Technik kann gesehen werden, dass das Risiko der Kanalbegradigung und Stufenbildung reduziert ist. Außerdem vereinfacht die resultierende konische Form des Wurzelkanals die spätere Wurzelkanalfüllung [38,77].

Balanced-force-Technik

Für diese Methode werden spezielle *Flex-R*-Feilen benötigt, die eine nicht-schneidende Instrumentenspitze aufweisen. Eingeführt wurde die *Balanced-force*-Technik 1985 von *Roane* und *Sabala*, welche sich besonders für die Aufbereitung gekrümmter Kanäle geeignet ist. Die Technik ähnelt dem klassischen Reaming, zunächst erfolgt eine Rotation im Uhrzeigersinn um das Instrument zu platzieren. Diese Drehung sollte nicht mehr als 180° betragen soll um eine Überinstrumentation zu vermeiden. Es folgt eine Schneidbewegung in Form einer Rotation in Gegenrichtung von 120° oder mehr. Diese Feilenbewegung gibt

das Instrument frei und soll den Kanal auf den Feilendurchmesser erweitern. Die beschriebene Folge der Rotationen im und gegen den Uhrzeigersinn wird so lange wiederholt bis die gewünschte Arbeitslänge erreicht ist [76].

2.4.2 Koronal-apikale Techniken

Step-down-Technik

Die Step-down-Technik beginnt mit der Präparation einer okklusalen Zugangskavität um einen geradlinigen Zugang zu den Kanälen zu schaffen. Es schließt sich die Instrumentierung der mittleren zwei Drittel des Wurzelkanals an, wofür zunächst Hedstroem-Feilen (#15,20,25) und nachfolgend Gates-Glidden-Bohrer genutzt werden. Die Hedstroem-Feilen werden auf eine Länge von 16-18 mm in den Kanal eingebracht, oder bis das Instrument im Kanal klemmt. Für die Aufbereitung wird nur leichter apikaler Druck aufgebracht. Von Vorteil ist, dass damit ein gerader Zugang zur Apikalregion geschaffen wird und das Pulpagewebe sowie Mikroorganismen vor der apikalen Instrumentierung entfernt werden um eine Keimverschleppung zu vermeiden. Desweiteren erlaubt die Technik ein tieferes Eindringen der Spüllösungen. Die Gefahr einer Stripperforation muss durch vorsichtiges Vorgehen beim Preflaring vermieden werden. Das apikale Wurzel Drittel wird abschließend mittels der Step-back-Technik aufbereitet [33].

Crown-down-pressureless-Technik

Zu Anfang dieser Methode wird der Kanal bis in das apikale Drittel mit feinen Instrumenten erweitert. Als nächster Schritt wird eine ISO-35-Feile so weit wie möglich in den Kanal eingebracht. Sobald die maximale Eindringtiefe erreicht ist, werden zwei 360°-Drehungen durchgeführt, wobei kein Druck nach apikal ausgeführt werden sollte. Nun probiert man mit feineren Instrumenten millimeterweise bis zur festgelegten Arbeitslänge vorzudringen. Danach wird der Kanal erneut mit einer ISO-40-Feile von koronal nach apikal erweitert. Diese Reihenfolge wird so lange wiederholt, bis die gewünschte apikale Aufbereitungsgröße erlangt ist [38]. Laut *Morgan* und *Montgomery* ist die Crown-down-pressureless-Technik eine effektive Methode, die zudem leicht zu erlernen ist. In ihrer Studie von 1984 in der die Technik mit der konventionellen Feil-Methode (*circumferential filing technique*) verglichen wurde, erreichte die CPDT signifikant mehr exzellente Bewertungen und schien auch schneller zu sein [66].

Double-Flare-Technik

Diese Technik ist gewissermaßen eine Kombination aus Step-down- und Step-back-Technik. Mit Instrumenten großer ISO-Größen wird der Kanal in abnehmender ISO-Sequenz (in 1mm-Schritten) in korono-apikaler Richtung erweitert, bis man mit einem dünnen Instrument die Arbeitslänge erreicht. Das apikale Kanaldrittel wird nachfolgend bis zur geplanten ISO-Größe erweitert, bevor sich ein Step-back anschließt [27].

Die Tabellen 2 und 3 fassen Charakteristik, Vor- und Nachteile der beschriebenen Techniken zusammen.

Tab. 2: Aufbereitungstechniken (apikal-koronal)

| Technik | Charakteristik | Vorteile | Nachteile |
|-------------------------|--|---|--|
| <i>Apikal-koronal</i> | | | |
| Standardisierte Technik | <ul style="list-style-type: none"> • Alle Feilen werden in aufsteigender ISO-Größe auf voller AL eingebracht | <ul style="list-style-type: none"> • einfaches Handling, da alle Feilen mit der gleichen Länge in den Kanal eingebracht werden | <ul style="list-style-type: none"> • Gefahr der Kanalbegradigung und der iatrogenen Keimverschleppung von koronal nach apikal |
| Step-back-Technik | <ul style="list-style-type: none"> • Aufbereitung der apikalen Region mit flexiblen Instrumenten auf voller AL, dann schrittweise kürzeres Einbringen der Instrumente bei zunehmender ISO-Größe | <ul style="list-style-type: none"> • größere Konizität, besser für laterale Kondensations-technik geeignet • reduziertes Risiko von Kanalbergradigungen und Stufenbildung | <ul style="list-style-type: none"> • Hoher Zeitaufwand |
| Balanced-force-Technik | <ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von flexiblen K-Feilen • Platzieren der Feile mit 180°-Drehung im Uhrzeigersinn • Schneidbewegung mit 120°-Drehung gegen Uhrzeigersinn | <ul style="list-style-type: none"> • besonders für gekrümmte Kanäle geeignet • beugt Abweichungen vom Kanalverlauf vor | <ul style="list-style-type: none"> • Gefahr der Instrumentenfraktur • schwierige Technik • spezielle, flexible Instrumente erforderlich |

Tab. 3: Aufbereitungstechniken (koronal-apikal)

| Technik | Charakteristik | Vorteile | Nachteile |
|---------------------------------|---|--|---|
| <i>Koronal-apikal</i> | | | |
| Step-down-Technik | <ul style="list-style-type: none"> • 1. Erweiterung des koronalen und mittleren Kanaldrittels • 2. Einbringen der Feilen auf volle AL | <ul style="list-style-type: none"> • geringere Gefahr der Kanalbegradigung und Keimverschleppung | <ul style="list-style-type: none"> • mögliche Kanalverlagerung bei zu langer Verweildauer des Instrumentes |
| Crown-down-pressureless-Technik | <ul style="list-style-type: none"> • Kanalerweiterung von koronal nach apikal mit absteigenden ISO-Größen und Konizitäten | <ul style="list-style-type: none"> • Initiale Entfernung des infizierten Gewebes | <ul style="list-style-type: none"> • Gefahr der Kanalbegradigung bei zu langer Verweildauer des Instrumentes oder zu forciertem Arbeiten |
| Double-flare-Technik | <ul style="list-style-type: none"> • mit Feilen großer ISO-Größen wird der Kanal erweitert bis AL erreicht ist • Apikale Erweiterung: Step-back-Technik | <ul style="list-style-type: none"> • effiziente Kanalreinigung • geringe Verblockungs-Gefahr | <ul style="list-style-type: none"> • Hoher Zeitaufwand |

2.5 Eigenschaften der Wurzelkanalinstrumente:

2.5.1 Schneidleistung (Shaping ability)

Bürklein et al. untersuchten in einer Studie *Mtwo*- und *EasyShape*-Feilen (coated/uncoated) im Hinblick auf ihre Schneid- und Reinigungsleistung. Die *Mtwo*-Feilen zeigten im Bereich der Debrisentfernung signifikant bessere Ergebnisse. Die Benutzung von *Mtwo*-Feilen hinterließ signifikant weniger Smear layer. Alle untersuchten Instrumente konnten dabei den originären Kanalverlauf beibehalten [12]. In einer weiteren Studie von *Bürklein et al.* wurden Scheid- und Reinigungsleistung der Systeme *WaveOne*, *Reciproc*, *Mtwo* und *ProTaper* getestet. Auch hier wuch keines der Instrumente während der Aufbereitung vom originären Kanalverlauf ab. Die Instrumentation mit dem *Reciproc*-System war verglichen mit allen anderen untersuchten Systemen signifikant schneller. Im Hinblick auf die Entfernung von Debris erzielten *Reciproc* und *Mtwo* im apikalen Kanaldrittels signifikant bessere Ergebnisse [13].

2.5.2 Drehmoment

Tabelle 4 listet die in dieser Arbeit verwendeten Drehmomente auf.

Tab. 4 : Eingesetzte Drehmomente

| Feile | Drehmoment (Ncm) | Rotationen/Min. |
|--------------------|------------------|-----------------|
| <i>Reciproc</i> | | |
| # 40/.06 | - | ~ 300 |
| <i>S-ApeX</i> | | |
| # 20 | 0,5 | 500-1000 |
| # 25 | 0,5 | 500-1000 |
| # 30 | 0,5 | 500-1000 |
| # 35 | 0,5 | 500-1000 |
| # 40 | 0,5 | 500-1000 |
| # 50 | 0,5 | 500-1000 |
| # 60 | 0,5 | 500-1000 |
| # 70 | 0,5 | 500-1000 |
| # 80 | 0,5 | 500-1000 |
| <i>Mtwo</i> | | |
| # 10/.04 | 1,2 | 280 |
| # 15/.05 | 1,3 | 280 |
| # 20/.06 | 2,1 | 280 |
| # 25/.06 | 2,3 | 280 |
| # 30/.06 | 1,2 | 280 |
| # 35/.04 | 1,2 | 280 |
| # 40/.04 | 1,6 | 280 |
| <i>GT-Series X</i> | | |
| # 20/.04 | 1,0 | 300 |
| # 30/.04 | 1,0 | 300 |
| # 40/.04 | 1,0 | 300 |

2.6 Wurzelkanalspüllösungen

Die Wurzelkanalspülung ist ein substanzieller Bestandteil der chemo-mechanischen Wurzelkanalpräparation [20]. Besonders da ca. ein Drittel der Kanaloberfläche nach der Aufbereitung nicht suffizient bearbeitet ist [77]. In der gemeinsamen Stellungnahme der *DGZMK* und der *DGZ* zum Thema Wurzelkanalspülungen vom Jahre 2006 werden Ziele der Wurzelkanalspülung und Anforderungen an die Spüllösungen wie folgt formuliert [20]:

Ziele der Wurzelkanalspülung:

- Reduktion der Keime und Bakterientoxine im Wurzelkanalsystem
- Auflösung und Entfernung des restlichen Pulpagewebes
- Unterstützung der mechanischen Aufbereitung und Abtransport von Dentinspänen

Anforderungen an die Spüllösungen:

- Desinfektionswirkung
- Biologische Verträglichkeit
- Gewebsauflösende Wirkung
- Einfache Applizierbarkeit

Cunningham et al. (1980) fanden heraus, dass eine zusätzliche Aktivierung der Spüllösungen mit Ultraschall zu besseren Ergebnissen führt [18].

Nachfolgend sollen die Standardspüllösungen aufgeführt und erläutert werden.

Natriumhypochlorit (NaOCl)

NaOCl gilt laut *DGZMK* und *DGZ* in Konzentrationen zwischen 0,5% und 5% als Spüllösung der ersten Wahl [20]. Die antibakteriell wirkende Lösung hat einen pH-Wert von 11-12 und kann sowohl vitales, als auch avitales Gewebe auf-

lösen [4]. Desweiteren ist NaOCl in der Lage die Endotoxine der gramnegativen Bakterien zu inaktivieren und organische Bestandteile des Smear layers zu entfernen. *Andersen et al.* stellten 1992 in einer *in-vitro*-Studie fest, dass 2%-iges Natriumhypochlorit in der Lage ist bei 37°C innerhalb von bis zu 2,5 Stunden 6,5 mg Pulpagewebe aufzulösen. Desweiteren empfehlen sie die kombinierte Anwendung von NaOCl als Wurzelkanalspüllösung mit Calciumhydroxid als medikamentöser Einlage, da sie feststellten, dass Calciumhydroxid ebenfalls innerhalb von 2 Stunden in der Lage ist die Hälfte des *in-vitro* verwendeten pulpalen Gewebes zu entfernen, für das übrige Gewebe jedoch bis zu einer Woche Einwirkzeit benötigt [4]. Da die zytotoxischen Nebenwirkungen auf das periradikuläre Gewebe mit einer Steigerung der Lösungskonzentration zunehmen, wird die Anwendung von 1-3%-igen Lösungen empfohlen [77]. Die Erwärmung 2,6%-iger Lösung auf Körpertemperatur (37°C) kann das Zeitintervall bis zur Sterilität von *in-vitro* Bakterienkulturen im Vergleich zu 22°C warmen Lösungen signifikant reduzieren [18]. Bezüglich der Lagerung ist darauf zu achten das NaOCl kühl und dunkel aufzubewahren [77]. Die Effektivität der NaOCl-Lösungen unterscheidet sich in den Konzentrationen 5,25%, 2,5% und 1% nicht, lediglich bei der Anwendung von 0,5 %-igen Lösungen können einzelne Fibrillen an der Kanalwand zurückbleiben [7]. *Zehnder et al.* sehen deshalb keinen Grund Lösungen über 1% anzuwenden [112]. *Jacob* nennt zusätzlich den unangenehmen Geruch der 5,25%-igen Lösungen als Negativfaktor [46]. Eine komplette Entfernung des Smear layers an instrumentierten Kanaloberflächen kann erreicht werden, wenn NaOCl (5,25%) in Kombination mit EDTA (15%) verwendet wird [95]. Die Studie von *Sim et al.* gibt jedoch einen Hinweis darauf, dass zu hohe Konzentrationen von Natriumhypochlorit die Kanalwand schwächen können, so reduziert die Anwendung 5,25%iger Lösung das Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit des Dentins [90].

Chlorhexidinglukonat

Chlorhexidin (CHX) wird zumeist in Konzentrationen von 2% angewendet. Es hat eine geringe Toxizität und wirkt besonders gut gegen gram-positive Keime wie *E. faecalis* und *C. albicans*. Da es aber keine gewebsauflösenden Eigenschaften hat und weder den Smear layer entfernen kann, noch bakterielle Endotoxine inaktiviert, wird es nicht als alleinige Wurzelkanalspülung eingesetzt

[77]. Yamashita *et al.* verglichen 2003 die Reinigungsleistung von CHX (2%) mit der von NaCl, NaOCl (2,5%) und NaOCl (2,5%)+EDTA. Dabei stellten sie fest, dass die Reinigungsleistung von NaCl und CHX der der anderen untersuchten Lösungen unterlegen war. CHX sollte deshalb nur im Sinne einer adjuvanten Spülung bei Revisionen oder anhaltenden Beschwerden genutzt werden [107]. Gomes *et al.* fanden in einer Untersuchung von 2001 heraus, dass sowohl NaOCl, als auch CHX den Problemkeim *E. faecalis* abtöten können, dies aber in Abhängigkeit von der Konzentration der genutzten Lösung unterschiedlich schnell geschieht. So wirkte CHX-Flüssigkeit (0,2%) nach 30 s und CHX-Flüssigkeit in den Konzentrationen von 1,0% und 2,0% schon nach unter 30 s. Dieser Wert konnte mit NaOCl erst ab einer Konzentration von 5,25 % erreicht werden. Auch CHX-Gel (0,2%) wirkte effektiv gegen *E. faecalis*, allerdings erst nach einer Einwirkzeit von 2 Stunden [34]. Auch da primäre endodontische Infektionen polymikrobiell mit einer Dominanz von gram-negativen Anaerobiern sind [93], ist das vornehmlich gegen gram-positive Erreger wirkende CHX eher als Ergänzungsspülung anzusehen. Bei einer Wechselspülung mit NaOCl ist jedoch zu beachten, dass eine Zwischenspülung mit NaCl o.ä. erfolgen muss, da es beim Kontakt von CHX und NaOCl zu einer Präzipitation von Chloranilin kommt, was für den Behandler als Rot-Braun-Verfärbung der Zahnhartsubstanzen sichtbar wird [77]. Laut einer Studie von *Evanov et al.* kann auch die Erwärmung einer CHX-Lösung (0,12%) auf 46°C eine Steigerung der antibakteriellen Wirkung ohne Erhöhung der zytotoxischen Eigenschaften des CHX bewirken [26].

Spüllösungen auf Chelatorenbasis: Entfernung der Schmierschicht

Da bei der instrumentellen Aufbereitung durch Dentinabrieb, Pulpa- und Zellreste eine Schmierschicht (Smear layer) entsteht, welche die Dentintubuli verschließen kann, sollte diese im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung entfernt werden [20]. So können nachfolgende Spüllösungen in die Dentintubuli penetrieren und eine adäquate Bakterienreduktion gewährleisten. Die dafür am häufigsten verwendeten Spüllösungen sind EDTA und Zitronensäure.

EDTA

Der Ausdruck Chelate kommt aus dem Griechischen und leitet sich vom Wort "Chele"(Krebsschere) ab. EDTA (Ethylenediaminetetraaceticacid) ist ein groß-

molekularer Komplexbildner, der selektiv Kalziumionen des Dentins an sich bindet. Diese Eigenschaft hat eine "chemische Erweichung" des Wurzeldentins zur Folge, was besonders die Aufbereitung enger und kalzifizierter Kanäle erleichtert [38]. EDTA wird meist in Konzentrationen von 15% bis 20 % nach Abschluss der Wurzelkanalpräparation verwendet. Angewendet werden sollte ca. eine Menge von 5 ml pro Kanal. Die Lösung entfernt die anorganischen Bestandteile der Schmierschicht. Wird im Anschluss mit NaOCl gespült, so kann dieses in die Dentintubuli eindringen und auch Bereiche reinigen, die vorher von der Schmierschicht bedeckt waren [77]. Bei kombinierter Anwendung mit NaOCl ist zu beachten, dass sowohl EDTA, als auch Zitronensäure die antibakterielle Wirksamkeit von NaOCl in 1:100 Verdünnungen herabsetzen [112]. Vorsicht ist geboten bei zu langer Einwirkzeit des EDTA auf das Wurzeldentin, da es hierbei zu massiven Dentinerosionen kommen kann. EDTA ist deshalb nicht als Langzeiteinlage geeignet [77]. Nach *Uzunoglu et al.* beeinflussen unterschiedliche Konzentrationen und Einwirkzeiten von EDTA-Lösungen die Frakturresistenz von endodontisch behandelten Wurzeln. Die höchste Frakturresistenz wurde in dieser Studie nach Spülung mit 5%-iger EDTA-Lösung für 10 Minuten, die geringste nach Spülung mit 17%-iger Lösung für 10 Minuten ermittelt [101].

Zitronensäure

Auch Zitronensäure wird von einigen Autoren als Spüllösung zur Auflösung der Schmierschicht empfohlen. Es kann in Konzentrationen von 10-20% verwendet werden, ist jedoch nicht so effektiv wie EDTA [77]. Laut Stellungnahme der *DGZMK* und *DGZ* löst Zitronensäure in Konzentrationen über 30% jedoch nicht nur den zu entfernenden Smear layer auf, sondern beschädigt auch das peritubuläre Dentin [20].

2.7 Zur Anatomie des Dentins

2.7.1 Dentin

Bei der Wurzelkanalbehandlung wird mit den endodontischen Feilen bakteriell infiziertes Dentin von der Kanalwand entfernt um bakterienfreie Verhältnisse vor der Wurzelkanalfüllung zu gewährleisten. Dentin hat eine Brinellhärte von 60-70 HB (Schmelz 300-350 HB). Humanes Dentin besteht zu 70 m% aus

anorganischer Matrix, wozu vorwiegend feine Apatitkristalle zählen, zu 20 m% aus organischer Matrix, vor allem Kollagenfasern, und zu 10 m% aus Wasser [56]. Dentin wird von feinen Odontoblastenfortsätzen, den sog. Tomes'schen Fasern, durchzogen deren Durchmesser zur Schmelz-Dentin-Grenze hin abnimmt. Beträgt dieser pulpanah noch ca. 2 μm , so finden sich pulpafern Odontoblastenfortsätze mit einem Durchmesser von ca. 1 μm [56]. *Garberoglio* und *Brännström* stellten 1976 in einer Studie fest, dass sich pulpanah ca. 45000 Dentinkanälchen pro μm , im mittleren Dentinbereich 29500 pro μm und peripher ca. 20000 pro μm im Dentin befinden. Desweiteren haben sie mittig einen Durchmesser der Dentinkanälchen von ca. 1,2 μm und peripher von 0,9 μm gemessen [30].

2.7.2 Einfluss des Dentins auf die Rissbildung

Nach *Jainaen et al.* läuft die Rissausbreitung im Dentin spannungskontrolliert ab. Sie stellten fest, dass sich Risse in Arealen hoher Dentintubulidichte (pulpanah) von Tubulus zu Tubulus ausbreiten, wohingegen die Rissausbreitung in Bereichen niedriger Dentintubulidichte (pulpafern) von der intertubulären Kollagenmatrix bestimmt wird. Ein weiteres Ergebnis ihrer Untersuchungen war, dass weniger Energie notwendig ist das Dentin senkrecht zu den Dentintubuli zu brechen, als parallel zu diesen [47]. *Iwamoto et al.* kamen in ihrer Studie zur Bruchfestigkeit des humanen Dentins zu dem Schluss, dass die Gesamtrisslänge parallel zu den Dentintubuli verlaufender Risse signifikant niedriger war, als die der senkrecht zu den Tubuli verlaufenden [45]. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Resultaten der o.g. Studie von *Jainaen et al* [47].

2.8 Mögliche Risstypen in der Zahnhartsubstanz

Layton et al. untersuchten 1996 die Rissbildung verursacht durch Ultraschall-Wurzelspitzenresektionen. Dabei wurden 3 Typen von Rissen detektiert [55]:

1) *Risse mit Ursprung im Wurzelkanal:* Diese Risse gehen vom Wurzelkanal aus und enden im Wurzeldentin, sie können sich verzweigen und entweder inkomplett oder komplett sein. Letztere breiten sich vom Kanalinneren auf die Wurzeloberfläche aus, während inkomplette Risse kurz vor der Wurzeloberfläche enden.

2) *Risse mit Ursprung im Dentin*: Der Verlauf dieser Risse beschränkt sich ausschließlich auf das Wurzelndentin. In der o.g. Studie verliefen diese meist in faciolingualer Richtung entweder mesial oder distal des Kanals.

3) *Risse mit Ursprung im Wurzelzement*: Diese können sich von der Zementoberfläche bis hin zur Dentin-Zement-Grenze ausdehnen.

Die American Association of Endodontists hat 5 verschiedene Variationen von Hartschubfrakturen („cracked teeth“) klassifiziert [1]:

- 1) Risslinie
- 2) frakturierter Höcker
- 3) gebrochener Zahn (cracked tooth)
- 4) gespaltener Zahn (split tooth)
- 5) Vertikale Wurzelfraktur (vertical root fracture, VRF)

Kahler et al. (2000) kamen in einer Studie über die bakterielle Kontamination von Rissen in symptomatischen vitalen Zähnen zu dem Ergebnis, dass sich die Risse direkt durch das Dentin zur Schmelz-Dentin-Grenze ausbreiten und zudem stark mit Bakterien besiedelt sind [48].

2.8.1 Rissbildung durch Wurzelkanalbehandlung

2.8.2 Einfluss der Wurzelkanalaufbereitung

Die Instrumentierung von Wurzelkanälen mit rotierenden NiTi-Feilen führt, genau wie die Wurzelfüllung, zu Defekten der Kanalwand, die als komplette und inkomplette Frakturen oder als Risslinien in Erscheinung treten können [85]. In dieser Studie wird der Einfluss von vier unterschiedlichen NiTi-Systemen auf das Wurzelndentin untersucht.

2.8.3 Einfluss der medikamentösen Einlage

Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hat einen pH-Wert von ~ 12,5 und findet in der Endodontie als Wurzelkanalpaste für medikamentöse Zwischeneinlagen Verwendung. Als medikamentöse Einlage ist $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in der Zahnmedizin gut etabliert

und weit verbreitet [22]. Es setzt in wässrigen Medien Hydroxylionen frei, welche die Zellmembran der Bakterien zerstören, deren DNA schädigen und sowohl Enzyme, als auch Proteine denaturieren [77]. *Doyon et al.* untersuchten 2005 die Frakturresistenz des Dentins nach unterschiedlichen Einwirkzeiten von Calciumhydroxid. Sie konnten feststellen, dass Calciumhydroxid weder einen fördernden, noch einen protektiven Effekt auf die Rissbildungstendenz des Wurzelentins hat [22].

2.8.4 Einfluss der Wurzelkanalfüllung

Sowohl die laterale Kompaktionstechnik, als auch die Continuous-wave-Technik verursachen Beschädigungen der Kanalwand, wobei Letztere prozentual weniger Risse verursacht als die laterale Kondensation [86]. Aus diesem Grund sollte der Behandler bei der Wahl der Füllungstechnik nicht nur ihre Fähigkeit einen Wurzelkanal dicht zu obturieren, sondern auch ihre Rissbildungstendenz mit in Betracht ziehen [86]. Auch *Morfis* sieht in der Anwendung der lateralen Kompaktion in Kombination mit einer vorher durchgeführten Step-back-Instrumentierung eine Gefahr für das Auftreten einer vertikalen Wurzelfraktur [65]. *Shemesh et al.* fanden in einer weiteren Studie von 2009 heraus, dass die Nutzung einer passiven Kompaktionstechnik (passive compaction technique) das Auftreten von Rissen im Dentin verglichen mit der lateralen Kompaktion signifikant reduzieren kann [86]. Bei der warmen vertikalen Kompaktionstechnik wird erwärmte Guttapercha vorsichtig und möglichst drucklos mit einem Plugger nach apikal kondensiert. Wird diese Technik vom Behandler sorgfältig ausgeübt, ohne unbeabsichtigt zu viel Druck aufzuwenden, ist nach *Telli et al.* eher nicht mit dem Auftreten von Wurzelfrakturen zu rechnen [96]. *Blum et al.* beobachteten jedoch bei der warmen vertikalen Fülltechnik den sogenannten Wedging-Effekt, welcher durch den Druck des Pluggers auf die Guttapercha entsteht [9]. Weder die Verwendung von UDMA- noch von Kunstharz-basierten Sealern im Rahmen der Wurzelfüllung beeinflusst die Fraktureigenschaften des Wurzelentins [47].

2.8.5 Einfluss von Revisionen

Eine Revisionsbehandlung geht stets mit einem erneuten Substanzabtrag einher. *Roggendorf et al.* stellten 2010 in einer Studie fest, dass eine Erweiterung des Kanals um 2 ISO-Größen größer, als die zuvor verwendete finale Feile notwendig ist um bei einer Revision eine adäquate Reinigung der Kanalwand

von Sealer- und Guttapercharesten zu gewährleisten [78]. *Wilcox et al.* sahen bereits in einer Kanalerweiterung ab 40% ein erhöhtes Risiko für das Entstehen einer vertikalen Wurzelfraktur [104]. Die Schäden am Wurzelkollagen, welche durch Revisionsbehandlungen verursacht werden, wurden von *Shemesh et al.* untersucht. Sie fanden heraus, dass Revisionsbehandlungen zu signifikant mehr Dentindefekten führten, als endodontische Erstbehandlungen. Hierbei spielte es keine Rolle, ob die Revision mit *Hedström*- Feilen oder *ProTaper*-Revisionsfeilen durchgeführt wurde. Auch die Dicke des verbleibenden Dentins hatte keinen Einfluss auf die Ergebnisse [87].

2.8.6 Einfluss der Laser-Anwendung zur Reinigung des Wurzelkanals

Kaitsas et al. (2001) untersuchten den Effekt eines Nd:YAG-Lasers auf die Kanalwand. Die Reinigung der Kanalwand mittels Laser hatte eine saubere Dentinoberfläche mit einigen offenen Dentintubuli zur Folge, welche aber zugleich auch vereinzelt Krater mit Dentinrissen zeigte. Sie zogen den Schluss, dass es bei inadäquater langer Dauer der Laserapplikation sowie falschem Energielevel in einem gewissen Maß zu thermischen Schäden an der Kanalwand sowie morphologischen Veränderungen der Dentinstruktur kommen kann [49].

2.9 Vertikale Wurzelfrakturen

Die vertikalen Wurzelfrakturen (vertical root fractures, VRFs) sind eine häufige Ursache für das Scheitern von endodontischen Behandlungen [100]. Das Fehlen typischer Symptome, die auf das Vorliegen einer VRF hinweisen erschweren die Diagnostik und Behandlung. *Pitts und Natkin* (1983) definierten eine vertikale Wurzelfraktur als längsorientierte Fraktur der Wurzel, die sich vom Wurzelkanal bis zum Parodont erstreckt [73]. Häufig auftretende unspezifische klinische Zeichen sind periradikuläre Läsionen, Schmerz, Schwellung, Fistelgang, eine erhöhte Zahnbeweglichkeit, Perkussionsempfindlichkeit [73]. Röntgenologisch können ein erweiterter Parodontalspalt, sowie resorptive Knochendefekte sichtbar sein. Diese Zeichen sind von Lage und Ausprägung der VRF abhängig. Betroffene Patienten haben häufig eine lange Vorgeschichte mit unklaren Symptomen [37]. Jedoch sind die herkömmlichen Röntgenbefunde bei der Diagnose einer VRF nicht immer spezifisch [50]. *Testori et al.* erkannten in einer Studie von 1993, dass VRF vor allem bei Patienten im Alter von 45-60 Jahren vorkommen [98]. Nach *Kramer* ist das Risiko eine VRF an wurzelkanalbehand-

delten Zähnen zu entwickeln bei Patienten nach dem 50. Lebensjahr um das 2,5-fache höher [53]. *Llena-Puy et al.* stellten in einer Studie mit 25 klinischen Fällen von VRFs vor allem erhöhte Sondierungstiefen und diffusen Schmerz bei den untersuchten Patienten fest. Ebenso wurden bei einigen Probanden Fisteln, sowie eine Fragmentmobilität festgestellt. Röntgenologisch waren in nur 6 Fällen laterale und/oder apikale Osteolysen zu beobachten [59]. *Tamse et al.* sehen im Auftreten eines Halo-Effektes, einer perilateralen Aufhellung, angulärer Resorption des krestalen Knochens, im Zusammenhang mit diffusem oder definierten, aber nicht Kortikalis begrenzter Kanten, eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen einer VRF. In Ihrer Studie von 1999, in der 92 Zähne mit einer VRF untersucht wurden, wurden vor der Extraktion durch einen Oralchirurgen das Auftreten von hohen Sondierungstiefen, als dominantestes Zeichen, gefolgt von Perkussionsempfindlichkeit, Lockerung, Schwellung und Fistelgängen beschrieben [94]. *Abou-Rass* sieht als Gründe für das Entstehen von VRFs u.a. Zahntraumata durch parafunktionsbedingte Kräfte, Unfälle im Mund-Gesichtsbereich, das Design von Kavitätenpräparationen und die thermische Expansion von Füllungs- und Restaurationsmaterialien, sowie den exzessiven Druck beim Einbringen eines Stiftes in endodontisch behandelte Zähne. Desweiteren sind ungünstige Zahnpositionen, durch Elongationen, Kippungen und Rotationen problematisch [2]. *Morfis* ergänzte die o.g. Punkte um die Technik der lateralen Kompaktion. Er konstatierte, dass die laterale Kompaktion im Zusammenhang mit einer Step-back-Instrumentation des Wurzelkanals Grund für eine VRF sein kann [65]. Desweiteren zeigte sich, dass auch die Länge des gesetzten Stiftes eine Rolle spielt. *Morfis* stellte fest, dass Stifte, deren Länge mehr als die halbe Wurzellänge beträgt, besonders anfällig für VRFs waren [65]. VRFs entstehen vor allem bei einer Kanalerweiterung ab 40 % [104]. Die Verwendung von Adhäsivtechnik und -materialien um die endodontisch behandelten Zähne zu rekonstruieren, sowie die Nutzung konfektionierter zylindrischer intraradikulärer Retainer sollen nach *Llena-Puy et al.* die Zeit bis zum Entstehen einer VRF nicht verlängern [59]. Aber auch vorhandene Restaurationen, oder das Überkronen von wurzelkanalbehandelten Zähnen scheinen die Zeit bis zum Auftreten einer VRF nicht maßgebend zu beeinflussen. *Llena-Puy et al.* gaben von der Wurzelfüllung bis zum Auftreten einer VRF eine durchschnittliche Zeitspanne von 54 Monaten an [59]. Eine Studie von *Kramer et al.* von 2008 ergab einen Zeitraum von ca. 3-5 Jahren [53]. Bei Vorliegen einer VRF ist die meist letzte

therapeutische Möglichkeit die Zahnextraktion [73], in der aktuellen Literatur werden jedoch auch neue Ansätze beschrieben. Özer *et al.* dokumentierten 3 Fälle in denen Zähne mit einer VRF extrahiert und extraoral mit einem selbsthärtenden, dualhärtenden adhäsiven Zement repariert wurden um anschließend replantiert zu werden. Die Zähne waren nach einem Zeitraum von 2 Jahren asymptomatisch [68]. Diese Technik könnte in der schwierigen Behandlung von VRFs eine Alternative zur häufig notwendigen Extraktion der betroffenen Zähne sein. Langzeitergebnisse sind jedoch abzuwarten.

2.9.1 Visualisieren von Rissen in der Zahnhartsubstanz

2.9.2 Röntgen-Technik

Auch die Radiographie ist ein Mittel für die Visualisierung von Rissen und vertikalen Wurzelfrakturen. Die tatsächliche Darstellung gestaltet sich hierbei jedoch problematisch, da ein Frakturspalt nur dargestellt werden kann, wenn er parallel zum Zentralstrahl orientiert ist, oder in einem Winkel von 4 Grad zu jeder Seite [80]. Zudem können Frakturen, die in mesiodistaler Richtung gelegen sind nur bei Dislokation der Frakturfragmente dargestellt werden [111].

2.9.3 Computertomographie

2005 untersuchten Hannig *et al.* die Fähigkeit eines neuen FD-VCT (flat panel volume detector computer tomograph). Sie sehen in diesem System ein innovatives non-destruktives Gerät für die Darstellung von vertikalen Wurzelfrakturen und Rissen im Dentin. Der klinische Einsatz wäre jedoch erst nach einer Reduktion der Bestrahlungsdosis durch technische Modifikationen möglich [35]. Die Anwendung eines kontrastverstärkten Mikro-CTs ermöglicht die drei-dimensionale, non-invasive Visualisierung und Darstellung der Morphologie und räumlichen Lage von Rissen im Dentin [54]. Youssefzadeh *et al.* (1999) sind der Meinung, dass die Computertomographie dem konventionellen Röntgen bei der Detektion von vertikalen Wurzelfrakturen überlegen ist [111].

2.9.4 Cone beam computed tomographie (CBCT)

Wie eingangs erwähnt ist die Diagnostik im Bezug auf die Detektion einer VRF äußerst schwierig. Hassan *et al.* haben 2009 in einer Studie CBCT (Cone beam computed tomographie) mit periapikalen Röntgenbildern für die Diagnostik von

VRF verglichen und herausgefunden, dass CBCTs im Vergleich zu Röntgenbildern zum einen genauer sind, zum anderen eine höhere Sensitivität im Bezug auf Darstellung von Frakturlinien haben, da sie eine drei-dimensionale Ansicht aus verschiedenen Winkeln ermöglichen [36]. Auch nach *Kajan et al.* hat das CBCT ein gutes Potential Wurzelfrakturen zu detektieren, da es ein hohes Maß an Genauigkeit bietet [50].

2.9.5 Ultraschall-Analyse

Aufgrund der kurzen Wellenlänge in harten Geweben und im Zusammenhang mit einer hohen Auflösung bietet auch Ultraschall die Möglichkeit Risse in Zahnhartsubstanzen darzustellen [16]. So untersuchten *Culjat et al.* mit einem speziell angefertigten Ultraschall-Gerät Risse in künstlichen Zähnen und fanden heraus, dass damit eindeutig zwischen Arealen mit oder ohne Risse unterschieden werden konnte [16].

2.9.6 Transillumination

Wright et al. (2004) sahen im Einsatz von Transillumination, kombiniert mit 8-facher optischer Vergrößerung, durch Nutzung eines Operations-Mikroskops, ein gutes Mittel für die Detektion von Dentinrissen. In ihrer Studie schnitt die Verwendung von Transillumination unter zusätzlicher Verwendung des Farbstoffes Methylenblau am besten ab [106].

3 Versuchplanung und Zielsetzung

In dieser In-vitro-Studie sollen 4 verschiedene maschinelle NiTi-Aufbereitungssysteme unterschiedlicher Hersteller im Bezug auf ihre Rissbildungstendenz im Wurzelkaries verglichen werden.

Folgende Instrumente sollen hierfür untersucht werden:

Das neue *GT-Series X-System* von Dentsply Maillefer stellt eine effiziente Schneidleistung auf voller Arbeitslänge, sowie hohe Elastizität und Bruchresistenz auch in stark gekrümmten Kanälen sicher. Die Technik sei einfach zu erlernen, da alle Instrumente direkt auf Arbeitslänge in den Kanal eingebracht werden.

Das *Mtwo-System* von VDW, dieses etablierte System besteht aus 7 Instrumenten, die alle auf voller Arbeitslänge benutzt werden. Das so genannte „*Simultaneous Shaping*“ soll dafür sorgen, dass der Kanal von jeder Feile von koronal bis apikal geformt wird. Der Hersteller verspricht dadurch eine effektive Bakterieneliminierung, dass schon nach der 2. Feile eine Spülkanüle bis ca. 3 mm vor den Apex gebracht werden kann.

Das *Reciproc-System* von VDW, hierbei handelt es sich um ein recht neues System, dass die Wurzelkanalaufbereitung mit nur einem Instrument ohne Herstellung eines initialen Gleitpfades ermöglichen soll. Die Feilen werden dabei reziprok angetrieben. Der Hersteller wirbt mit einer schnelleren Aufbereitung und der geringeren Wahrscheinlichkeit von Aufbereitungsfehlern.

Das *S-ApeX-System* von FKG Dentaire, diese NiTi-Instrumente mit inverser Konizität sollen eine Fraktur der Instrumentenspitzen durch eine koronal des Arbeitsstückes liegende Sollbruchstelle verhindern. Desweiteren verspricht diese Instrumentenreihe ein leichteres Eindringen von Spülflüssigkeiten bis zur Arbeitslänge und die Schaffung eines apikalen Stopps.

Jeweils 15 Zähne werden mit den o.g. rotierenden Systemen aufbereitet. Um später eine sinnvolle Vergleichbarkeit zu erreichen ist für alle 4 Versuchsgruppen eine gemeinsame apikale Aufbereitungsgröße von 40 vorgesehen. Nach koronaler Dekapitierung aller Zähne auf 15 mm liegt die Arbeitslänge für alle Versuchszähne bei 14 mm. Vor Aufbereitungsbeginn und nach jeder Feile, sowie Zwischenspülung mit NaOCl (3%) wird von jeder Zahnwurzel jeweils von mesial und distal mit dem Auflichtmikroskop und angeschlossener Leica-Digitalkamera ein Foto gemacht. Hierfür werden kleine Silikonformen genutzt um eine optimale Durchleuchtung der Zähne zu gewährleisten. Um möglichst physiologische Bedingungen für die Aufbereitung zu schaffen erfolgt die Aufbereitung in speziell angefertigten Aufbereitungsblöckchen aus Silikon und Gips zur Simulation des natürlichen Parodontiums. Nach abgeschlossener Aufbereitung und erfolgter Fotodokumentation schließt sich die Auswertung der Zunahme der Gesamtrisslänge an. Diese wird mit Hilfe des Programms Leica QWin durchgeführt, mit dem die Risse im Wurzeldentin nach Kalibrierung mit Hilfe des Zeigers und rechter Maustaste markiert und dabei automatisch gemessen und addiert werden. Im Anschluss soll die statistische Auswertung durchgeführt werden.

3.1. Nullhypothesen

Folgende Nullhypothesen sollen überprüft werden:

1. Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung verursacht keine Mikrorisse im Wurzeldentin unabhängig vom Feilensystem.

2. Die Erhöhung der Feilenzahl kann das Risiko einer Rissbildung im Wurzeldentin nicht reduzieren.

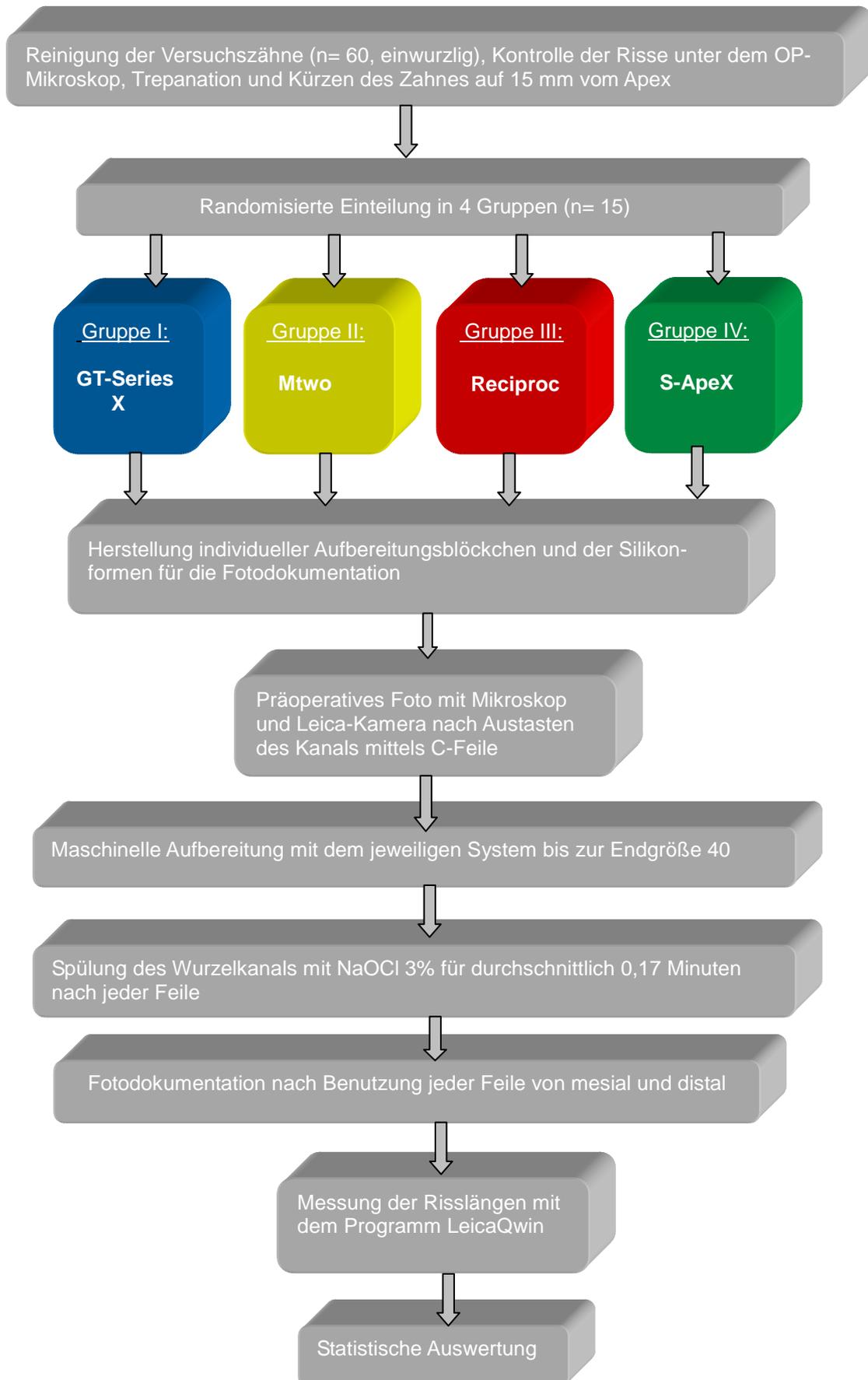
3. Im apikalen, substanzschwächeren Bereich der Wurzel entstehen keine Mikrorisse.

4. Eine Umkehr der Feilenkonizität vermindert das Risiko der Entstehung von Mikrorissen nicht.

5. Das Reciproc-System produziert trotz Benutzung nur einer Feile nicht weniger Risse.

4 Material und Methode

4.1 Versuchsdesign



4.2 Versuchsvorbereitung

4.2.1 Auswahl der Versuchszähne

Für die Versuchsreihe wurden 60 humane, einwurzlige Zähne mit geradem Wurzelverlauf und einem Wurzelkanal gesammelt und in gesättigter Thymol-Lösung (Fa. Merck) aufbewahrt. In dieser Lösung wurden sie während der gesamten Versuchszeit gelagert. Die Zähne mussten ein abgeschlossenes Wurzelwachstum aufweisen, die Wurzeln sollten unbeschädigt und die Wurzelkanäle durften noch nicht endodontisch behandelt sein.

4.2.2 Reinigung der Versuchszähne

Alle Zähne wurden vor Versuchsbeginn mit rotierenden Bürstchen und grünem Winkelstück (*INTRAmatic Lux 3*, Fa. KaVo), sowie mit Handscalern von Geweberesten und Konkrementen befreit, unter dem OP-Mikroskop auf initiale Risse im Wurzelentin kontrolliert und gegebenenfalls aussortiert.

4.2.3 Vorbereitung der Versuchszähne

Im Anschluss erfolgte die Trepanation mit einem 1:4 übersetzten Winkelstück (*INTRAmatic Lux 2*, Fa. KaVo) und einem birnenförmigen Diamanten (Grünring Fa. Komet) mit 40000 U/Min, sowie die Kanaleingangsdarstellung mit Gates-Glidden-Bohrern (# 20 und # 25, Fa. Komet). Nach Austasten des Kanals mit C-Pilot-Feilen und druckloser Instrumentierung mit K-Feilen (# 15) zur Erschaffung eines Gleitpfades, erfolgte die einheitliche Kürzung der Zähne auf 15 mm vom Apex mit einer Diamanttrennscheibe unter Wasserkühlung. Es schloss sich die randomisierte Einteilung in eine von 4 Versuchsgruppen n=15 an.

Gruppe I: *GT-Series X* (Dentsply Maillefer)

Gruppe II: *Mtwo* (VDW)

Gruppe III: *Reciproc* (VDW)

Gruppe IV: *S-ApeX* (FKG Dentaire)

Mit einem wasserfesten Filzschreiber wurden alle Zähne zervikal mit einer

Nummer und distal mit einem Punkt versehen.

Abbildungen 3 und 4 zeigen exemplarisch einen Versuchszahn vor Trepanation und nach Kürzung auf eine Länge von 15 mm.



Abb. 3: Extrahierter Versuchszahn

Abb. 4: Versuchszahn nach Kürzung
auf 15 mm

4.2.4 Herstellung der Aufbereitungsblöckchen

Für jeden Zahn einer Gruppe wurde ein Aufbereitungsblöckchen hergestellt, welches das Parodontium des gesunden menschlichen Zahnes simulieren sollte (s. Abb. 5). Hierzu wurde die Wurzel in dünnfließendes Silikon (*Silasoft direct*, Fa. DETAX) getaucht [Wolfart et al., 2007]. Nach Aushärtung des Silikons wurde der Zahn in ein rechteckiges Kunststoffrörmchen mit flüssigem Sockelgips (*OctaDur*, Fa. Heraeus) gesteckt. Das fertige Aufbereitungsblöckchen konnte der Form nach erfolgter Abbindeaktion des Gipses entnommen werden. Die gesamte Aufbereitung der Wurzeln erfolgte im Aufbereitungsblöckchen, sie wurden lediglich für die Fotodokumentation entnommen.



Abb. 5: Silikon-beschichteter Versuchszahn



Abb. 6: Simuliertes Parodont mit Versuchszahn vor Beginn der Aufbereitung

4.2.5 Herstellung der Silikonformen für die Fotodokumentation

Für die spätere Fotodokumentation mussten ebenfalls für jeden Zahn eine mesiale sowie eine distale Silikonform hergestellt werden. Diese dienen der besseren Beleuchtung der Zahnwurzel durch die Kaltlicht-Unterleglampe, sowie einer reproduzierbaren Darstellbarkeit der Wurzeln. *Silaplast FUTUR* (Fa.DE-TAX) wurde nach Herstellerangaben mit *Catp universal FUTUR PLUS* manuell angemischt und in eine flache Kunststoffform gegeben. Anschließend glättete man die Silikonoberfläche mit Laugenwasser, um eine ebene Fläche zu erlangen. Der Zahn wurde dann möglichst gleichmäßig horizontal ausgerichtet in das Silikon gedrückt, sodass dieser ca. zur Hälfte in der Silikonmasse steckte. Nach Aushärtung des Silikons und Entnahme des Zahnes wurde der Wurzelabdruck keilförmig ausgeschnitten, sodass die Wurzel frei lag und bei der späteren Betrachtung unter dem Mikroskop möglichst viel Licht der Unterleglampe gebündelt durch die Zahnhartsubstanzen scheinen konnte. Kleine Skalpellmarkierungen bei 3, 6 und 9 mm am Rande des Wurzelabdruckes dienen der Einteilung in ein apikales, mittleres und koronales Drittel (s. Abb.7).



Abb. 7: Silikonform (mesial) für die Fotodokumentation

4.3 Maschinelle Aufbereitung der Versuchszähne

Die nächsten Versuchsschritte umfassten die schrittweise Aufbereitung der Versuchszähne mit den jeweiligen maschinellen Aufbereitungssystemen (s. Tab. 4) und die Fotodokumentation. Für diese wurde ein an einen PC angeschlossenes Mikroskop (Fa. Leica) mit aufgesetzter Mikroskop-Digitalkamera (Leica DFC 420) genutzt. Über das Programm *Leica Application Suite* konnte das Bild auf dem Computerbildschirm aufgerufen, sowie die Belichtungszeit und der Kontrast reguliert werden. Die Belichtungszeit, sowie die 10-fache Vergrößerung wurde jeweils pro Zahn beibehalten, um vergleichbare Bilder zu erhalten. Fokussiert wurde direkt über die Einstellschraube am Mikroskop. Vor der Aufbereitung der Versuchszähne wurden die Zahnwurzeln zunächst mit der Digitalmikroskop-Kamera von mesial und distal fotografiert. Hierfür wurde der Zahn in seiner Silikonform auf eine Petrischale mit Blaulichtfilter gelegt, welche auf der Kaltlichtlampe unter dem Mikroskop positioniert wurde. Diese Ausgangssituation diente als Referenz für die sich anschließende digitale Auswertung des Bildmaterials.

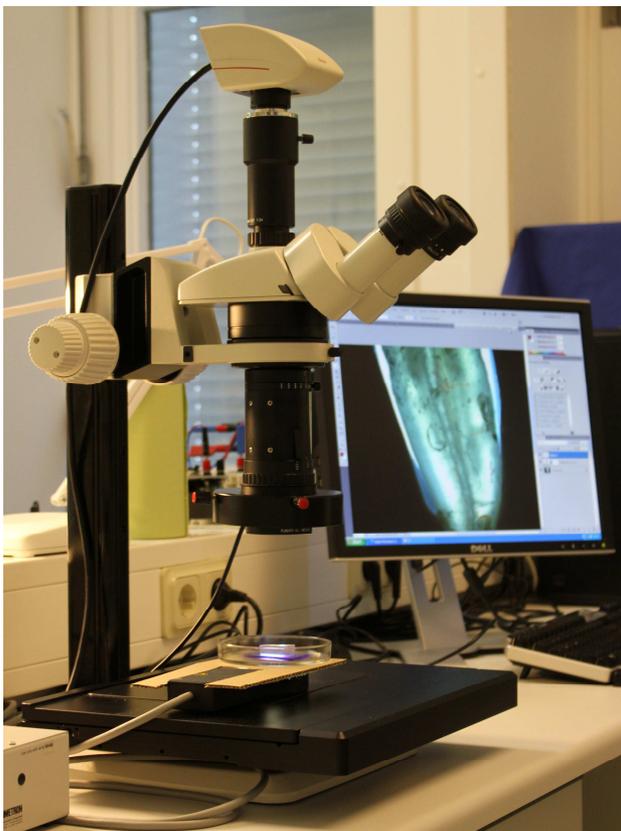


Abb. 8: Versuchsaufbau mit Mikroskop und angeschlossenen PC

Um einer Verfälschung der Versuchsergebnisse durch Trocknungsrisse vorzubeugen, wurden die Zähne nach Entnahme aus den Silikonformen in ein mit Wasser angefeuchtetes Tuch gewickelt, sofern nicht unmittelbar die Fotodokumentation erfolgte. Durch die einheitliche Kürzung der Zähne auf 15 mm ergab sich eine Arbeitslänge von 14 mm für alle Wurzeln, welche mit Hilfe einer Messlehre (Fa. KaVo) auf die Instrumente übertragen werden konnte. Ein weiterer einheitlicher Faktor war die apikale Aufbereitungsgröße von 40. Alle 15 Zähne einer Gruppe (I-IV) wurden mit dem jeweils zugeordneten System nach Herstellerangaben im entsprechenden Aufbereitungsblöckchen aufbereitet. Als Endomotoren wurden der *Endo Pilot* (Fa. Schlumbohm) und der *VDW-Silver-Reciproc*-Motor genutzt, in denen die Feilensequenzen der jeweiligen Systeme eingespeichert waren. Nach jeder Feile erfolgte die Spülung des Wurzelkanals mit NaOCl (3% Fa. Speiko) für durchschnittlich 12 Sekunden, die vorsichtige Trocknung mit Druckluft, sowie die Fotodokumentation von mesial und distal. Für jeden Zahn wurden neue Feilen genutzt. Man beschränkte sich auf die Kontrolle der Rissbildung der mesialen und distalen Wurzelfläche, da sich in Vorversuchen gezeigt hatte, dass bukkal/lingual bzw. palatinal liegende Wurzelanteile aufgrund ihrer größeren Dicke schlechter durchleuchtet und dargestellt werden konnten.

Tabelle 5 zeigt die untersuchten NiTi-Systeme und führt signifikante Merkmale der Instrumente, sowie die Feilensequenzen auf.

Während der Aufbereitung und Spülung der Wurzelkanäle erfolgte eine Zeitmessung mittels Stoppuhr, sodass für jedes System eine durchschnittliche Anwendungsdauer ermittelt werden konnte.

4.3.1 Versuchsgruppe I: Aufbereitung mit dem *GT-Series X-System*

Dieses Feilensystem der Firma Dentsply Maillefer ist der Nachfolger der *SystemGT*-Feilen und besteht aus M-Wire-Nickel-Titan. Die Feilen zeichnen sich durch eine höhere Flexibilität und geringere zyklische Ermüdung aus, da das Material mit einem speziellen Wärmebehandlungsverfahren bearbeitet wurde [3,29]. Die Feilen haben einen triangulären Querschnitt, Radial lands, welche durch eine Variation der Breite entlang des Instruments verbessert sind [11] und eine nicht-scheidende Battspitze. Breite Schneidenkantenabstände

sowie variable Schneidekantenwinkel gewährleisten einen großen Spanraum, der den Abtransport von Dentinspänen erleichtern soll. Das System verfügt über 3 zur Auswahl stehenden ISO-Größen 20,30,40, wobei jede der Feilen in einer Konizität von 4-6% (ISO 20) und 4-8% (ISO 30,40) erhältlich ist. Auch bei diesem System war der erste Aufbereitungsschritt die Schaffung eines Gleitpfades mit einem Handinstrument der ISO-Größe 15. Anschließend wurde das erste Instrument direkt auf volle Arbeitslänge gebracht, wobei der Anwender generell je nach Kanalkonfiguration zwischen den verschiedenen Konizitäten wählen kann. Nachdem die erste Feile die volle Arbeitslänge erreicht hatte, wurde das Instrument inspiziert. War die Instrumentenspitze mit Dentinspänen bedeckt, so konnte die Aufbereitung beendet werden. War dies nicht der Fall, so war der apikale Durchmesser des Kanals größer als der des Instrumentes und es musste zur nächsten ISO-Größe übergegangen werden. Als maximale Umdrehungszahl wird vom Hersteller ein Wert von 300 U/Min. angegeben. In der vorliegenden Arbeit wurden die Feilen #20/.04, #30/.04 und #40/.04 verwendet um eine Vergleichbarkeit mit den anderen Instrumenten zu erreichen (s. Abb. 9).



Abb. 9: *GT-Series-X-Feilen-Set*

4.3.2 Versuchsgruppe II: Aufbereitung mit dem *Mtwo*-System

Das 2005 von VDW herausgebrachte *Mtwo*-System wurde speziell für die neue Single-length-Technik entwickelt [79]. Die NiTi-Instrumente verfügen über einen S-förmigen Querschnitt mit 2 aktiven Schneiden und einer Battspitze. Die Schneidenzahl nimmt zum Instrumentenschaft hin progressiv zu. Die Instrumente verfügen über einen großen Spanraum, der ein Verblocken der Kanäle durch Debris verhindern soll. Desweiteren wirbt der Hersteller mit einer geringeren Bruchanfälligkeit aufgrund eines dünneren Instrumentenkerns und daraus resultierender höherer Flexibilität der Feilen. Dem Anwender steht eine Sequenz von 7 Feilen Größen 10-4, sowie Konizitäten von 4-6% zur Verfügung. Zunächst wurde mit einem ISO-15-Handinstrument ein Gleitpfad geschaffen, im Anschluss wurden alle Feilen auf voller Arbeitslänge (Single-length-Technik) verwendet. Eine Erweiterung des koronalen Kanaldrittels konnte durch leichtes seitliches Andrücken des Instrumentes erreicht werden. Die vom Hersteller angegebene Umdrehungszahl liegt bei 280 U/Min (s. Abb.10).



Abb. 10: *Mtwo*-Feilen-Set

4.3.3 Versuchsgruppe III: Aufbereitung mit dem *Reciproc*-System

Dieses neu entwickelte System der Firma VDW gehört nicht, wie die anderen 3 untersuchten Systeme zu den vollrotierenden Systemen, sondern arbeitet mit reziproken Bewegungen. Die Feilen haben einen S-förmigen Querschnitt und bestehen, ebenso wie die o.g. *GT-Series X*-Feilen aus M-Wire-Nickel-Titan, einem speziell thermisch vorbehandelten Nickel-Titan. Dieses System soll eine Aufbereitung mit nur einem Instrument ermöglichen. 3 Instrumente stehen je nach Kanaldurchmesser zur Verfügung. R25 für enge Kanäle, R40 für mittelgroße Kanäle und die R50 für weite Kanäle. Für diesen Versuch wurde die R40 (#40/.06) angewendet. Nach Schaffung eines geradlinigen Zugangs zum Kanal wurde dieser mit Spülflüssigkeit gefüllt und das Instrument eingebracht. Mit drucklosen Auf- und Abbewegungen wurde die Feile vorsichtig nach apikal vorgebracht. Nach 3 Picks (1 Pick entspricht einer Auf- und Abbewegung) wurde das Instrument aus dem Kanal entfernt und im Interimsständer gesäubert. Der Kanal wurde mit NaOCl gespült und mit C-Feilen rekapituliert. War die Arbeitslänge nach diesem Vorgang noch nicht erreicht wurde der Vorgang wiederholt. Für dieses Feilensystem wurde der VDW SILVER RECIPROC Motor genutzt.



Abb. 11: *Reciproc*- Feile #40/.06

4.3.4 Versuchsgruppe IV: Aufbereitung mit dem S-ApeX-System

Dieses neue System der Firma FKG Dentaire ist im Gegensatz zu den anderen Systemen durch eine inverse Konizität gekennzeichnet. Die NiTi-Feilen haben einen dreieckigen Querschnitt und verfügen über eine Sollbruchstelle 16 mm von der Instrumentenspitze entfernt. Diese solle eine Instrumentenfraktur im Kanal verhindern. Die inverse Konizität sorgt laut Herstellerangaben für einen apikalen Stopp, schafft Raum für nachfolgende Instrumente und ermöglicht das leichtere Vordringen von Spülflüssigkeiten bis zum Apex. Dem Anwender stehen ISO-Größen 15-80 zur Verfügung. In diesem Versuch wurden die Wurzelkanäle mit den ISO-Größen 20-40 und 50-80 aufbereitet. Zunächst wurde auch hier nach der Längenbestimmung ein Gleitpfad mit einem ISO 15 Handinstrument hergestellt. Auf die vom Hersteller empfohlene *PreRace* wurde verzichtet, da die Wurzelkanäle bereits nach der Trepanation initial mit *Gates-Glidden*-Bohrern dargestellt wurden. Anschließend erfolgte die Aufbereitung mit den nachfolgenden ISO-Größen der S-Apex-Sequenzen bis ISO 40. Um auch hier eine gemeinsame apikale Aufbereitungsgröße von 40 zu erlangen, wurde ab der ISO-Größe 50 bis ISO 80 ein Step-back in 1 mm-Schritten durchgeführt. Die Empfehlung einer Rotationsgeschwindigkeit von 500-1000 U/Min und einem Drehmoment von 0,5 Ncm wurden bei der Aufbereitung berücksichtigt.



Abb. 12: S-ApeX-Feilen-Set

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die vier in dieser Studie verwendeten Feilen-Systeme

Tab.5: Übersicht über benutzte Feilensysteme- und Sequenzen

| System | Feilenzahl | Sequenz | U/Min. | Drehmoment (Ncm) | Besonderheiten |
|-------------------------------|------------|---|----------|---|---|
| GT-Series X (Dentsply) | 3 | #20/.04 #30/.04 #40/.04 | 300 | 1,0 | <ul style="list-style-type: none"> • Battspitze • triangulär • variable Scheidekantenwinkel |
| Mtwo (VDW) | 7 | #10/.04 #15/.05 #20/.06 #25/.06 #30/.05 #35/.04 #40/.04 | 280 | 1,2 1,3 2,1 2,3 1,2 1,2 1,6 | <ul style="list-style-type: none"> • Single-length-Technik • Battspitze • S-förmig • simultaneous shaping |
| Reciproc (VDW) | 1 | #40/.06 | - | - | <ul style="list-style-type: none"> • reziproke Feilenbewegung • S-förmig • Ein-Feilen-System |
| S-ApeX (FKG) | 9 | #20-40 #50-80 ab #50 1mm Step-back | 500-1000 | 0,5 | <ul style="list-style-type: none"> • inverse Konizität • Sollbruchstelle • dreieckiger Querschnitt |

4.4 Auswertung des Bildmaterials

Alle digitalen Bilder einer Sequenz wurden in einem für jeden Zahn angelegten Ordner auf dem Computer abgespeichert und chronologisch benannt (z.B. Z(Zahn)1 F(Feile) m (mesial)). Für die Ermittlung der Risslänge und deren Zunahme während der Aufbereitung wurde das Programm Leica Qwin genutzt. Die Bilder wurden zunächst auf dem Computerbildschirm dargestellt und nach initialer Längenkalibrierung mit Hilfe der integrierten Messfunktion bearbeitet. Jedes Drittel (apikal, mittig, koronal) wurde einzeln bearbeitet, zur Orientierung dienten hier die Skalpellmarkierungen in der Silikonform. Erster Schritt war die

Kalibrierung. Mit dem Zeiger der Maus und gedrückter linker Maustaste wurden dann die auf dem Bild sichtbaren Risse im Wurzel dentin nachgefahren. Bereits gekennzeichnete Risse wurden auf dem Bildschirm rot gekennzeichnet, sodass man eine Doppelmessung ausschließen konnte. Die Ergebnisse für jeden Zahn wurden tabellarisch abgespeichert. Bei der Auswertung wurde nur die Gesamtrisslänge gemessen, die Zunahme der einzelnen Risse blieb unbeachtet.

Die Abbildungen 13 bis 20 zeigen exemplarisch am Beispiel eines mit dem *Mtwo*-System aufbereiteten Zahnes die schrittweise Auswertung der Mikrorisslängen.

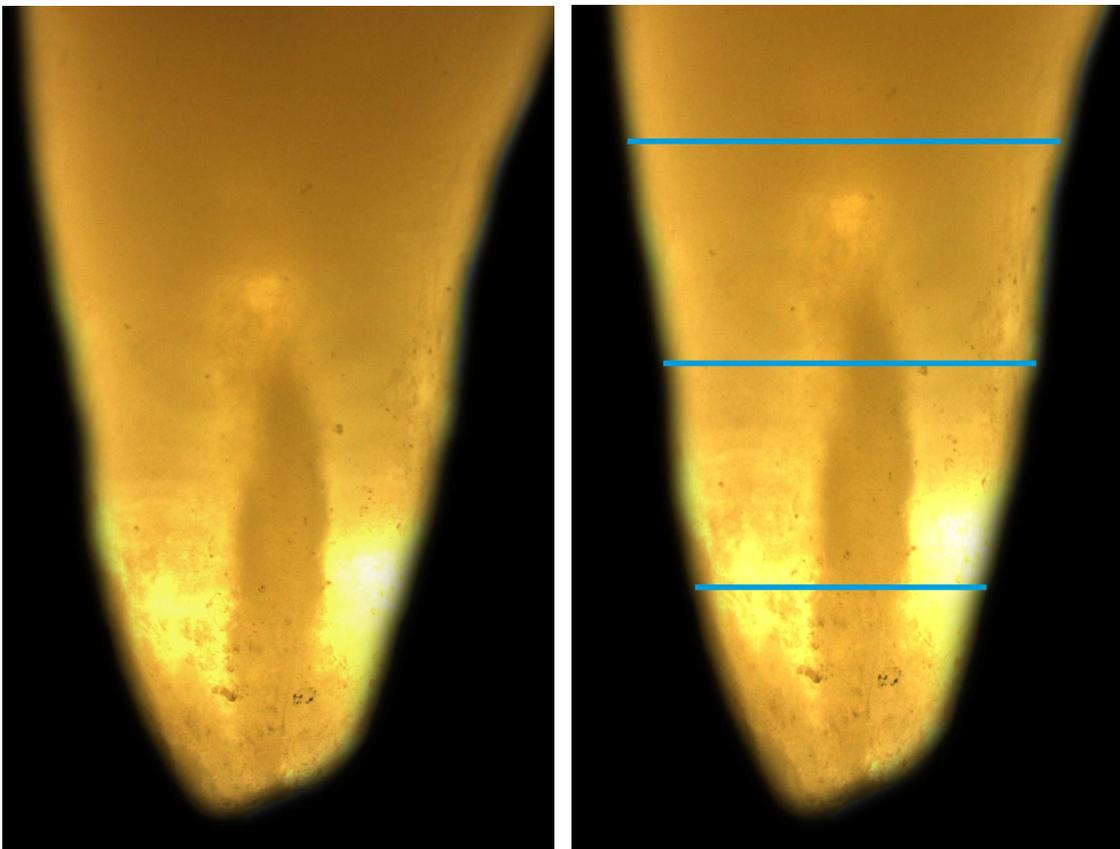


Abb.13 : Versuchszahn vor Beginn der Aufbereitung mit dem *Mtwo*-System

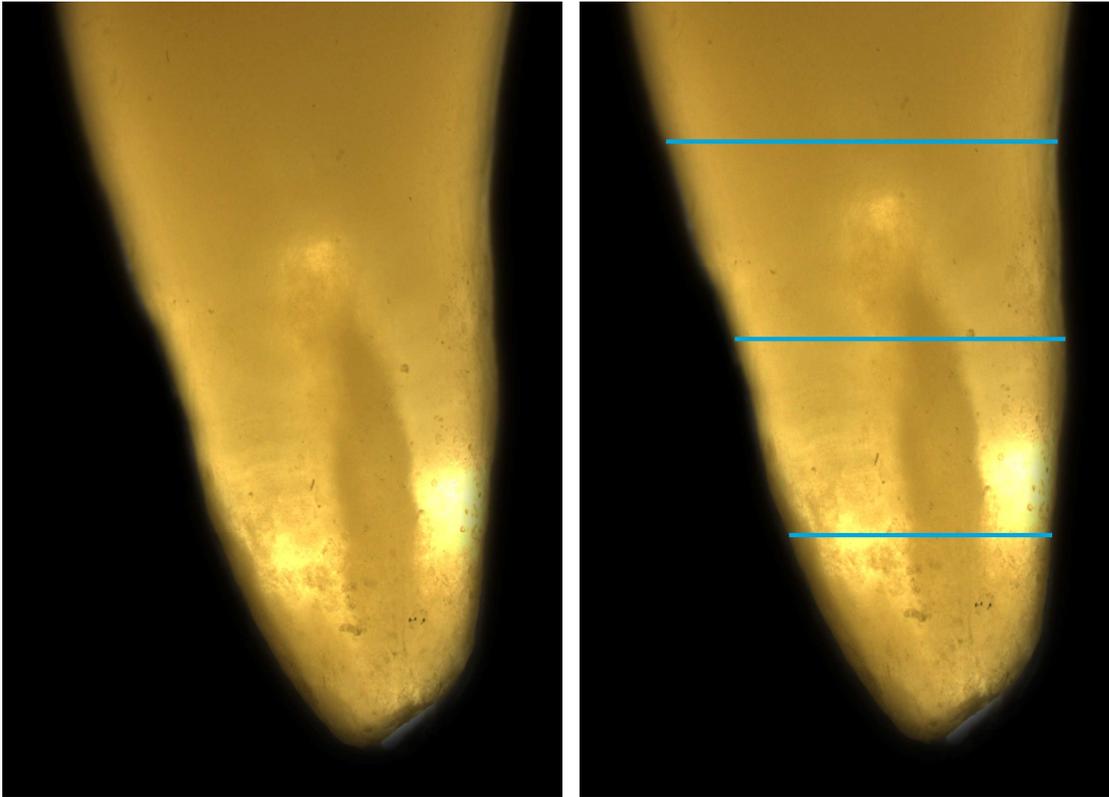


Abb. 14: Rissbildung nach Aufbereitung mit der *Mtwo*-Feile #10/.04

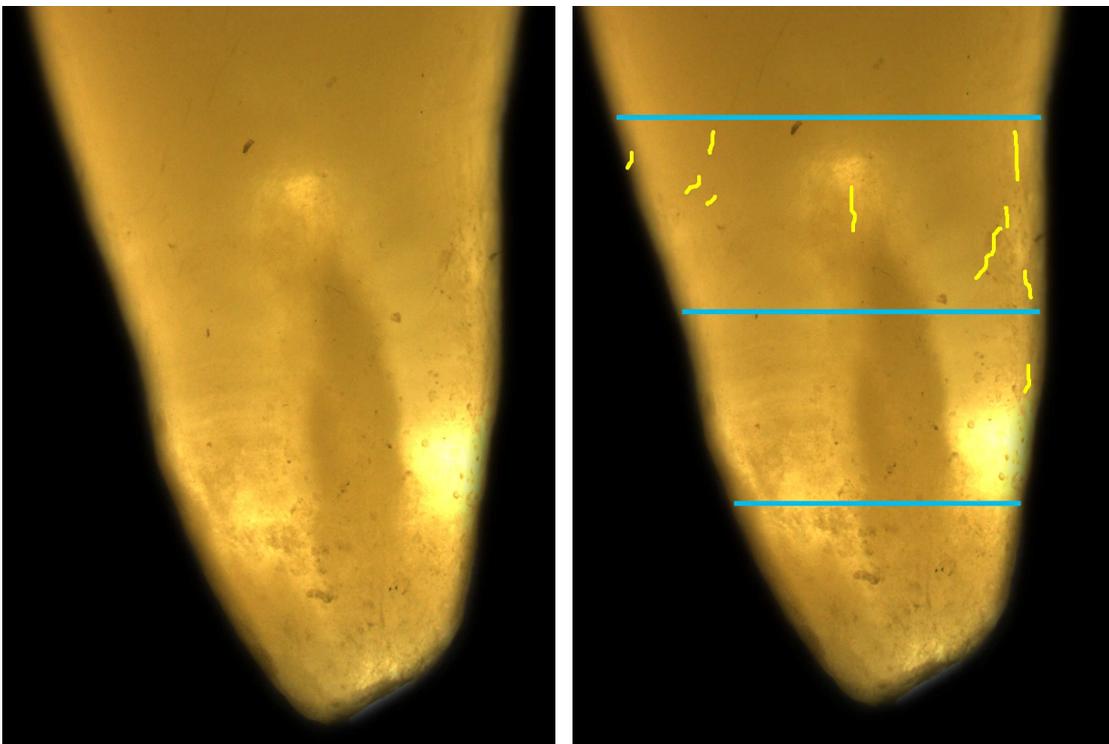


Abb.15: Rissbildung nach Aufbereitung mit der *Mtwo*-Feile #15/.05

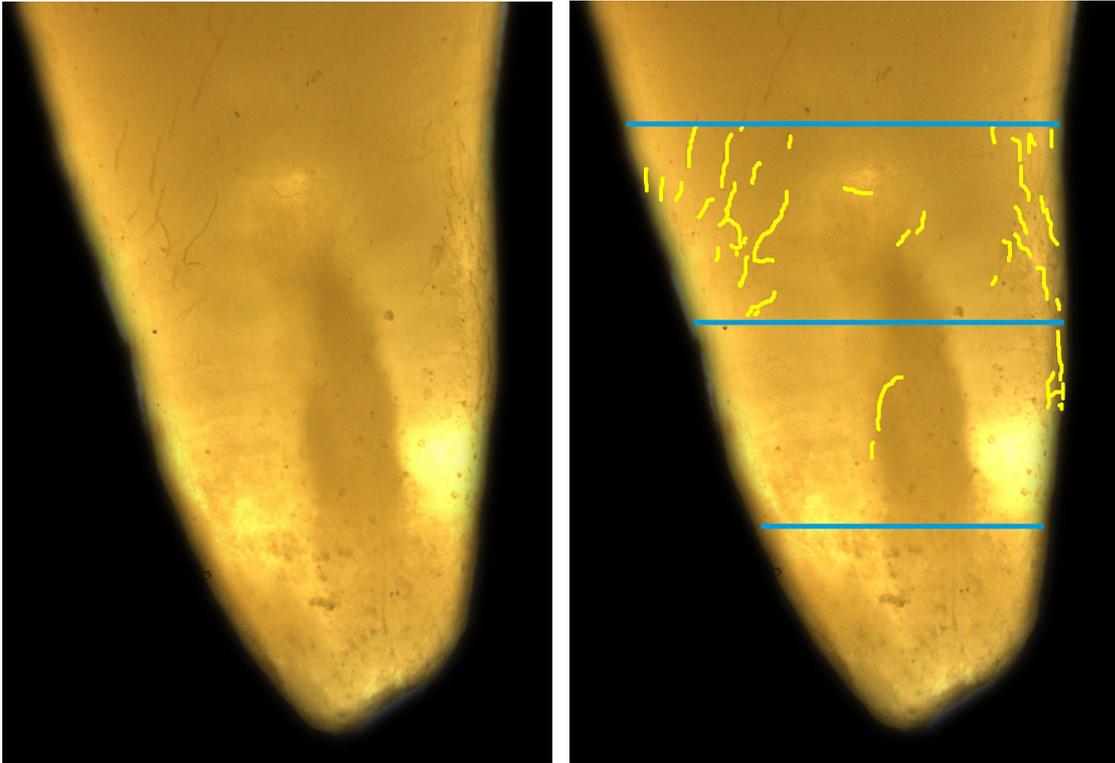


Abb. 16: Rissbildung nach Aufbereitung mit der *Mtwo*-Feile #20/.06

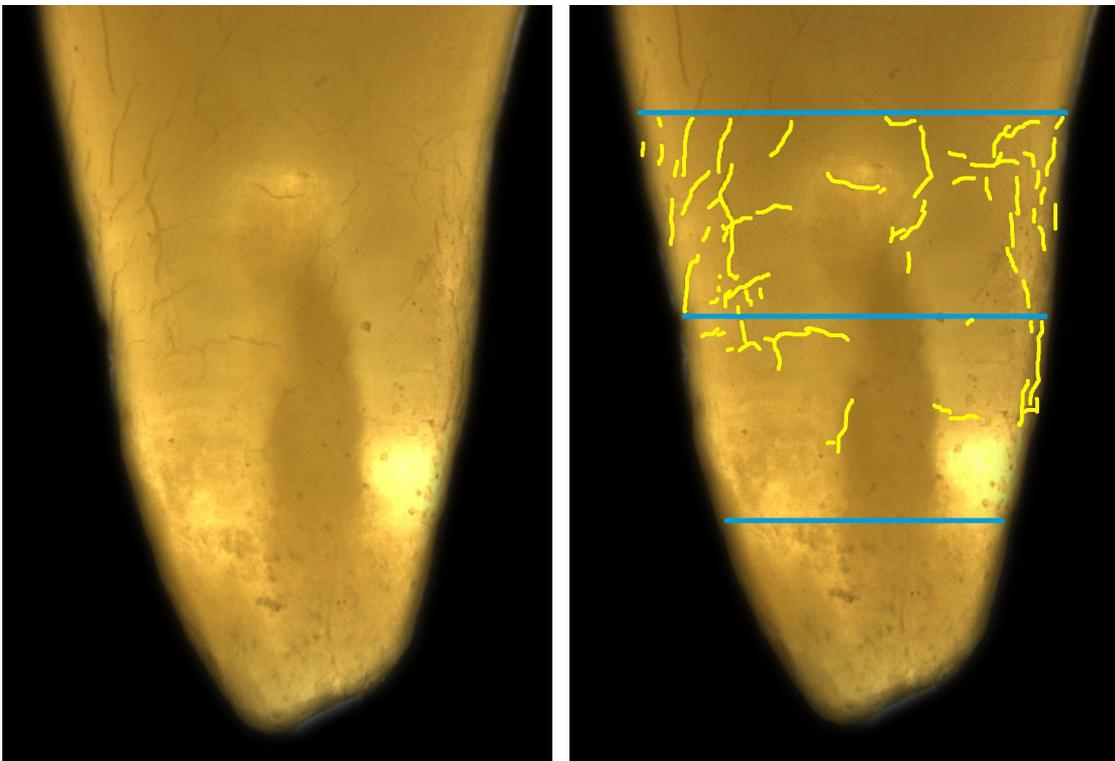


Abb. 17: Rissbildung nach Aufbereitung mit der *Mtwo*-Feile #25/.06

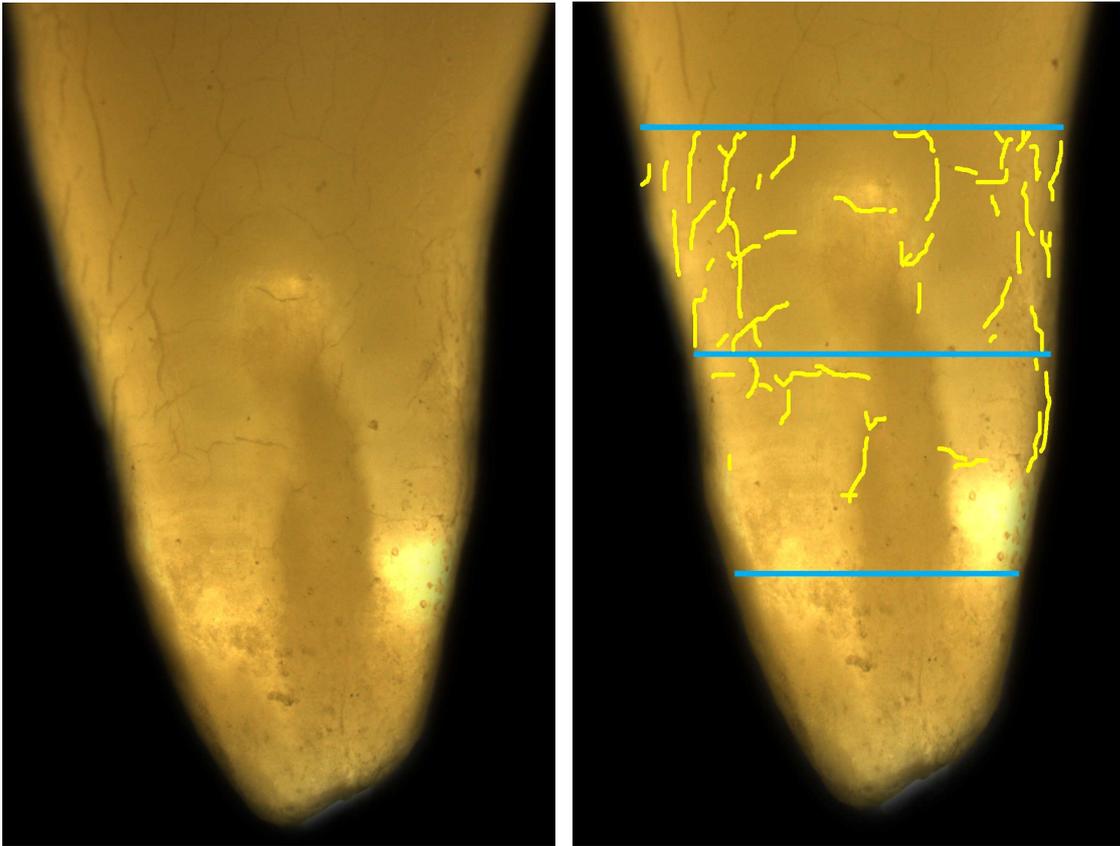


Abb. 18: Rissbildung nach Aufbereitung mit der *Mtwo*-Feile #30/.05

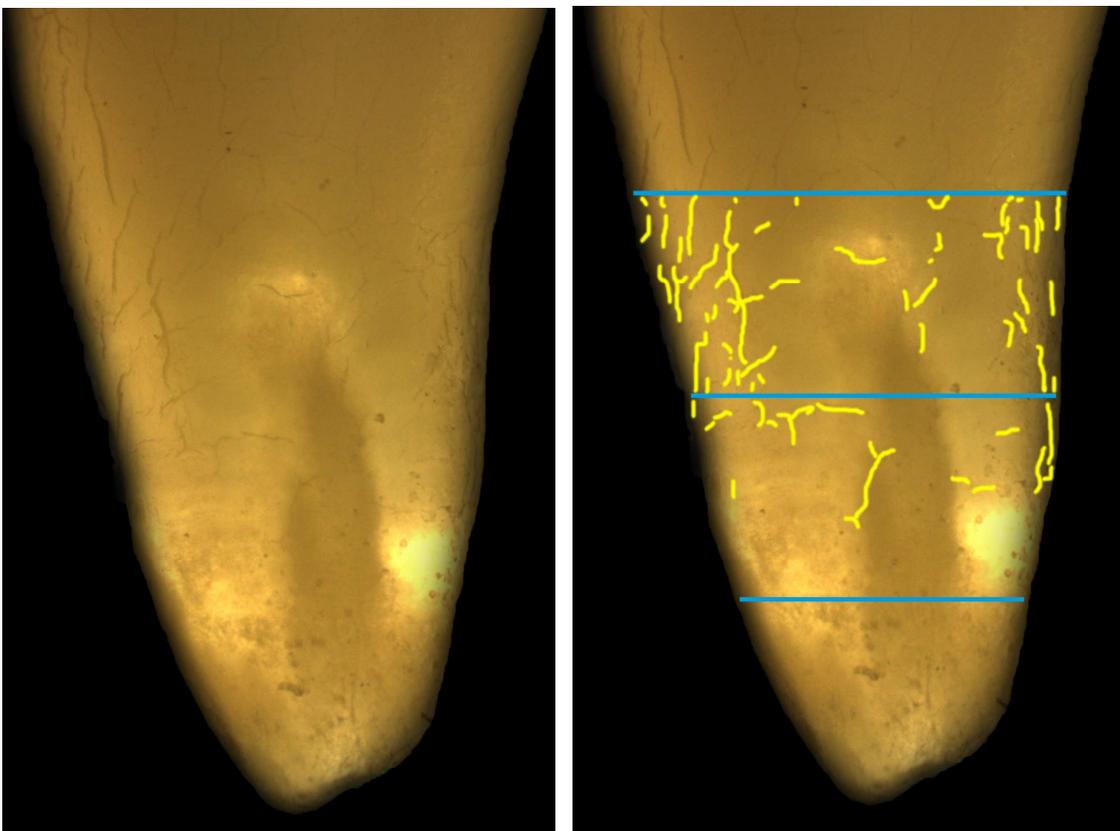


Abb. 19: Rissbildung nach Aufbereitung mit der *Mtwo*-Feile #35/.04

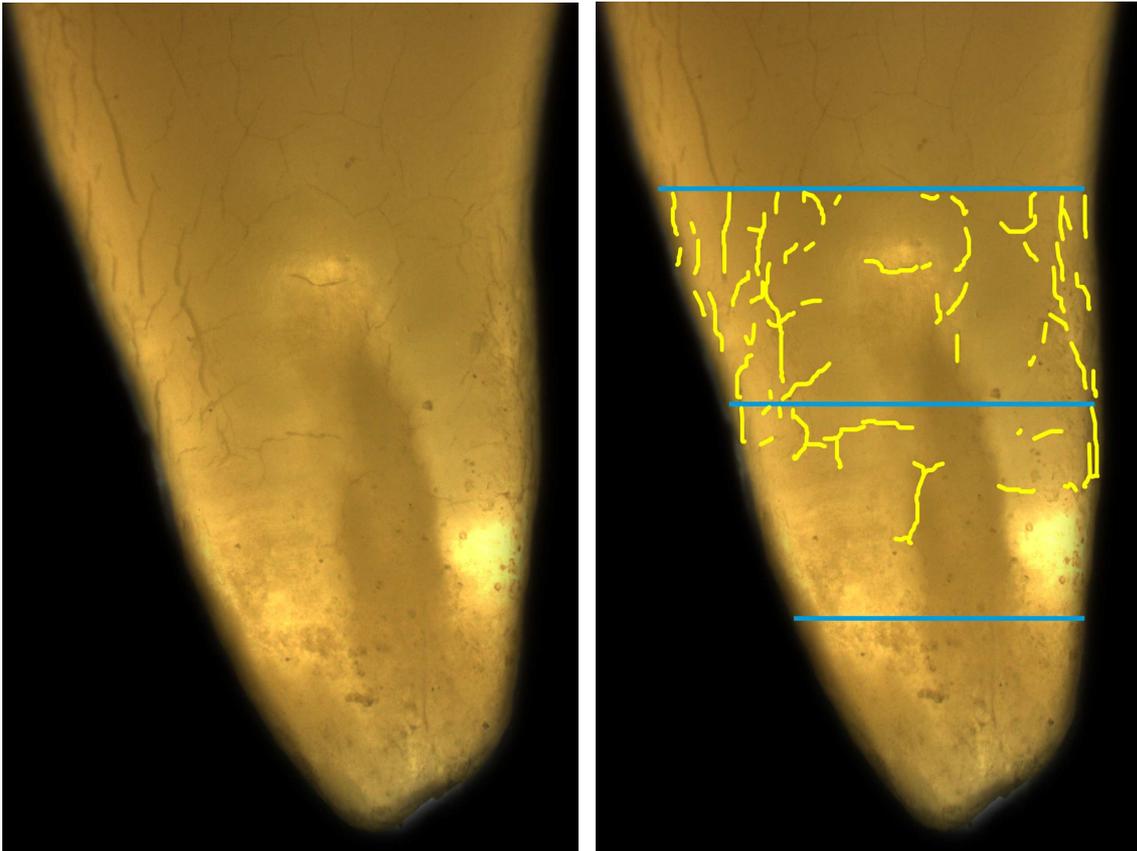


Abb. 20: Rissbildung nach Aufbereitung mit der *Mtwo*-Feile #40/.04

4.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Software-Paket *SPSS 19.0*. Um die Normalverteilung zu überprüfen wurde der *Kolmogorov-Smirnov*-Anpassungstest angewandt. Für die Berechnung der Unterschiede zwischen den Gruppen wurde zunächst eine univariate *ANOVA* gerechnet. Die nachfolgend gerechneten *Post-hoc*-Tests nach *Tamhane* dienten der Ermittlung von Signifikanzen homogener Gruppen. Mittels *Kruskal-Wallis*-Test wurden die Unterschiede zwischen jeweils zwei Instrumentensystemen in den drei verschiedenen Kanalabschnitten berechnet. Mit dem *Wilcoxon*-Test wurden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Feilengrößen innerhalb einer Feilensequenz ermittelt, um eine Aussage darüber treffen zu können, ab welcher Feilengröße die Unterscheide hinsichtlich des Auftretens von Mikrorissen innerhalb der jeweiligen Gruppe im Vergleich zur ersten eingesetzten Feile signifikant wurden.

5 Ergebnisse

Insgesamt wurden 60 Wurzelkanäle aufbereitet und nachfolgend ausgewertet. Für die Untersuchung des *Mtwo*-Systems wurden 7 Feilen genutzt (digitale Fotos: 192), beim *Reciproc*-System fand lediglich eine Feile Verwendung (digitale Fotos pro: 48). Das *S-ApeX*-Instrumentarium beinhaltet 9 Feilen (digitale Fotos: 240), die Zähne der *GT-Series X*-Gruppe wurden mit 3 Feilen der Serie aufbereitet (digitale Fotos: 96). Insgesamt wurden 576 digitale Fotos angefertigt von denen alle ausgewertet werden konnten.

5.1 Ergebnisse der 4 Aufbereitungssysteme im Vergleich (bis #40)

Die Gruppen *GTX*, *Mtwo* und *Reciproc* zeigten eine Normalverteilung der gemessenen Werte für die Mikrorisse in allen Wurzelabschnitten (*Kolmogorov-Smirnov*-Anpassungstest, $p > 0,05$). In der Gruppe *S-ApeX* waren lediglich bei zwei Instrumentengrößen (F1-mittig/ F6-koronal) die Werte nicht normalverteilt ($p < 0,05$). Tabelle 6 stellt die durchschnittlichen Gesamtrisslängen der Systeme pro Wurzel Drittel in μm dar. Im apikalen Wurzelabschnitt erzeugte die Aufbereitung mit dem *Reciproc*-System mit 191 μm die wenigsten Mikrorisse. Im Gegensatz dazu war die Gesamtrisslänge im apikalen Bereich bedingt durch die Aufbereitung mit dem *GT-Series X*- System mit 659 μm fast 3,5 mal so hoch, die Auswertung der Mikrorisslängen induziert durch das *Mtwo*-System ergab einen Durchschnittswert von 369 μm . Deutlich mehr Risse bildeten sich im apikalen Wurzel dentin nach Aufbereitung mit dem *S-ApeX*-System (910 μm). Auch bei der Untersuchung des mittleren Wurzel drittels zeigte *Reciproc* mit 1038 μm die geringsten Werte, gefolgt vom *GT-Series X*- System mit 1311 μm . Die Ergebnisse von *Mtwo* und *S-ApeX* waren mit 2775 μm und 2862 μm ähnlich. Im koronalen Wurzelabschnitt konnten bei allen Systemen deutlich höhere Gesamtrisslängen festgestellt werden. Das *S-ApeX* System verursachte mit 5229 μm die meisten Mikrorisse, *GT-Series X* mit 3291 μm die wenigsten. Die Werte von *Mtwo* und *Reciproc* rangieren bei 4684 μm und 4739 μm . Aus der Summe der durchschnittlichen Risslängen von apikal, mittig und koronal ergeben sich die entstandenen Gesamtrisslängen der jeweiligen Systeme. Hierbei schnitt das System *GT-Series X* im Hinblick auf die Mikrorissbildung im Wurzel dentin mit einer durchschnittlichen Gesamtrisslänge von 5189 μm am besten ab. Aber

auch bei der Anwendung des *Reciproc*-Systems entstanden nur unwesentlich mehr Risse (5968 μm). Die maschinelle Aufbereitung mit dem *Mtwo*-System führte zu einer Gesamtrisslänge von 7828 μm . Die höchste Gesamtrisslänge (9001 μm) entstand durch die Nutzung des *S-ApeX*-Systems.

Tab.6 : Gesamtrisslängen aller Systeme

| Gesamtrisslänge (μm) | GT-Series X | Mtwo | Reciproc | S-ApeX |
|-----------------------------------|-------------|------|----------|--------|
| Apikal | 659 | 369 | 191 | 910 |
| Mittig | 1311 | 2775 | 1038 | 2862 |
| Koronal | 3219 | 4684 | 4739 | 5229 |
| Komplett | 5189 | 7828 | 5968 | 9001 |

5.1.1 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile - apikal

Abbildung 21 zeigt die Mikrorissbildung im apikalen Wurzelbereich nach Abschluss der Aufbereitung (finale Feile) mit den vier Feilensystemen im Vergleich. Die statistisch berechneten Medianwerte lagen sowohl für *Mtwo* als auch für *Reciproc* bei ~ 0 μm . Die Ergebnisse für *S-ApeX* und *GT-Series X* lagen im Bereich um 500 μm . Den größten Wertebereich des Datensatzes wies das *S-ApeX*-System auf. Hier lag der größte gemessene Wert bei ca. 3100 μm . Die mittleren 50% der erfassten Werte lagen bei diesem System jedoch um 0 - 1300 μm . Bei *GT-Series X* umfasst der Interquartilabstand den Bereich von 24 - 750 μm , bei *Mtwo* von 0 - 837 μm und bei *Reciproc* von 0 - 220 μm . Die geringste Spannweite der Werte wurde beim *Reciproc*-System ermittelt.

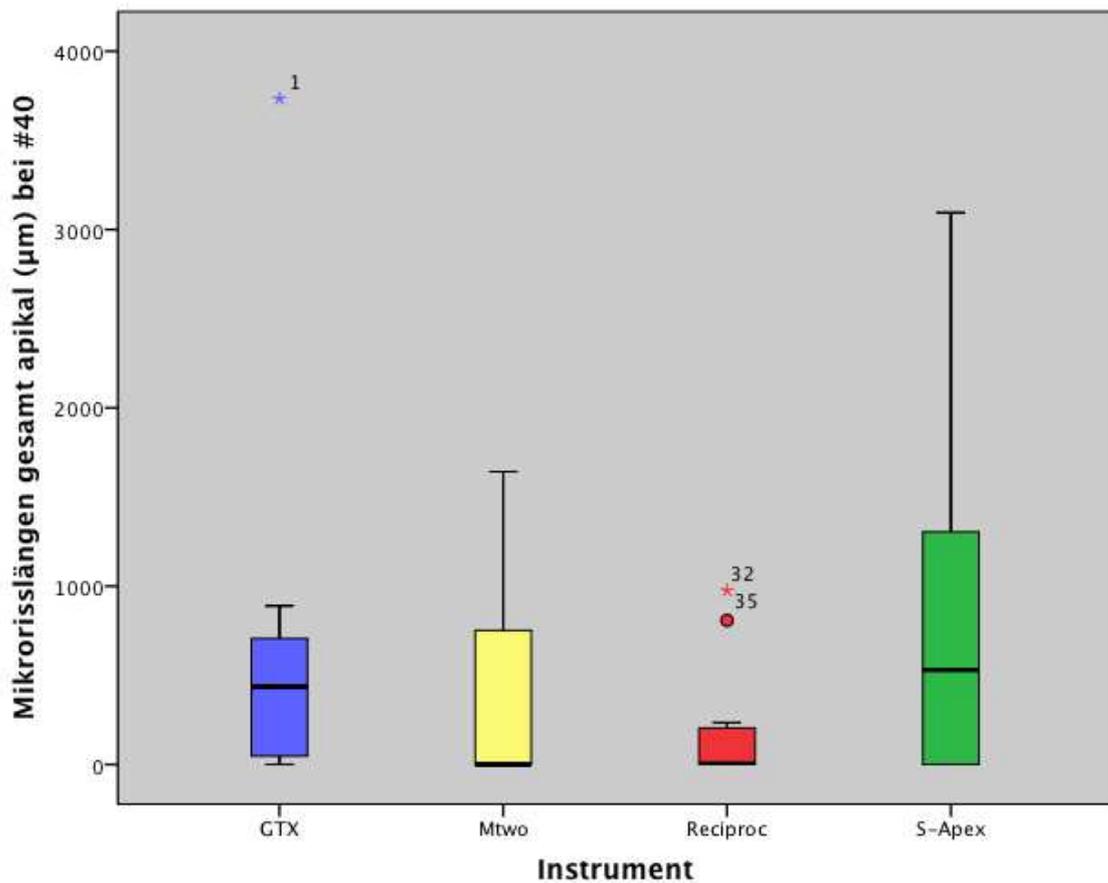


Abb. 21: Mikrorisslängen gesamt apikal (μm) bei #40

5.1.2 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile - mitte

Im Diagramm (s. Abb. 22) dargestellt sind die Werte für die Mikrorisslängen nach Nutzung der letzten System-Feile im mittleren Wurzelabschnitt. Die Ergebnisse sind auch hier für die vier Systeme im Vergleich aufgeführt. Im Vergleich zu den apikal erfassten Daten sind im mittleren Wurzelabschnitt durch die Aufbereitung eindeutig mehr Risse entstanden. Der Medianwert des *Reciproc*-Systems war mit ca. 724 μm am niedrigsten, der des *S-ApeX*-System lag bei 2880 μm . Knapp darunter lag der Medianwert des *Mtwo*-Systems (2262 μm), der des *GT-Series X*- Systems rangierte bei 1121 μm .

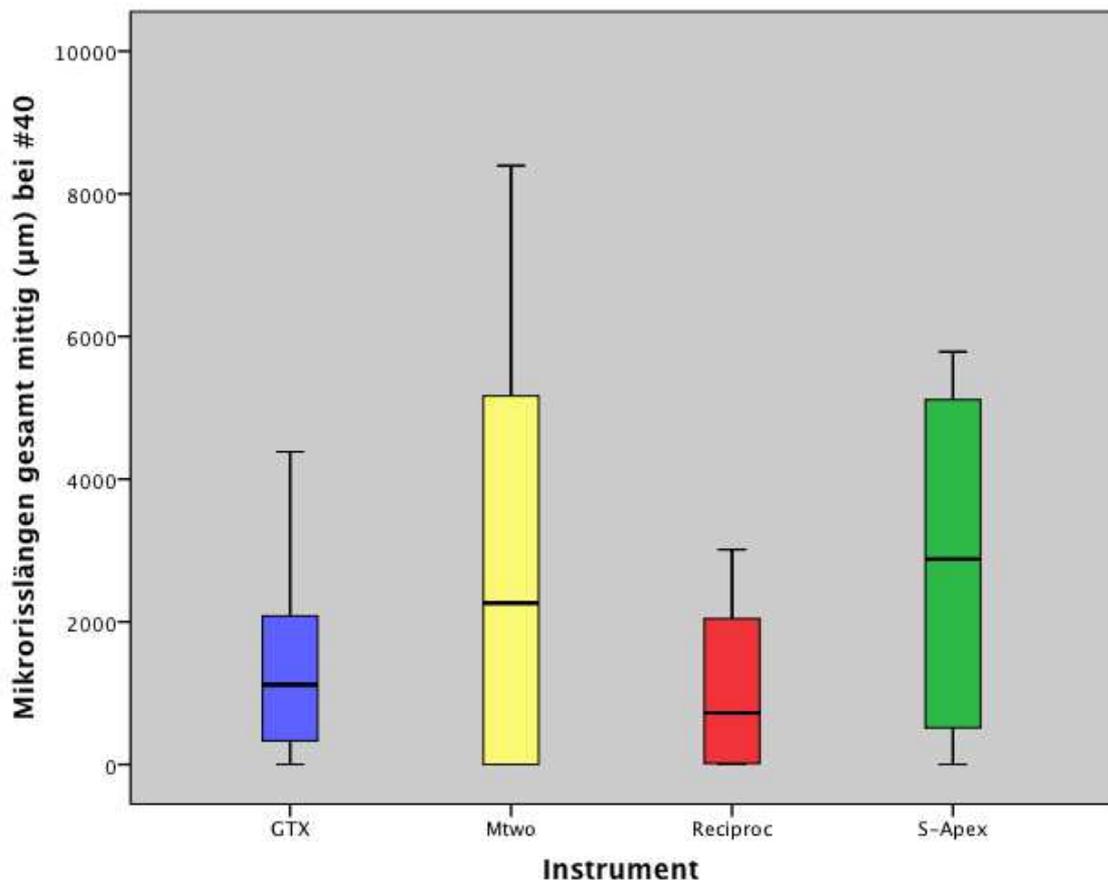


Abb. 22: Mikrorisslängen gesamt mittig (μm) bei #40

Bei dieser Datenmenge hatte das *Mtwo*-System mit 0 bis maximal 8396 μm die größte Spannweite der Werte. Die mittleren 50 % der Werte lagen beim *GT-Series X*-System im Bereich von 334 - 2090 μm , beim *Mtwo*-System von 0 - 5448 μm , beim *Reciproc*-System von 9 - 2230 μm und beim *S-ApeX*-System lag der Interquartilabstand bei 476 - 5014 μm .

5.1.3 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile- koronal

Wie in Abbildung 23 ersichtlich steigerten sich die Werte bezüglich der Mikrorisse im koronalen Wurzelbereich im Vergleich zum apikalen und mittleren Drittel erneut. Der Medianwert liegt für *GT-Series X* bei 2710 μm , für *Mtwo* bei 4556 μm , für das Ein-Feilen-System *Reciproc* bei 4007 μm und für *S-ApeX* bei 4545 μm . Größte Datenspannweite wies hier mit 0 - 14874 μm das *Reciproc*-System auf. Koronal rangieren beim *GT-Series X*-System 50% der mittleren Werte im Bereich von 1200 - 3337 μm , bei *Mtwo* von 0 – 8550 μm , bei *Reciproc* von 266 - 9268 μm und beim *S-ApeX*-System von 1875 - 8176 μm .

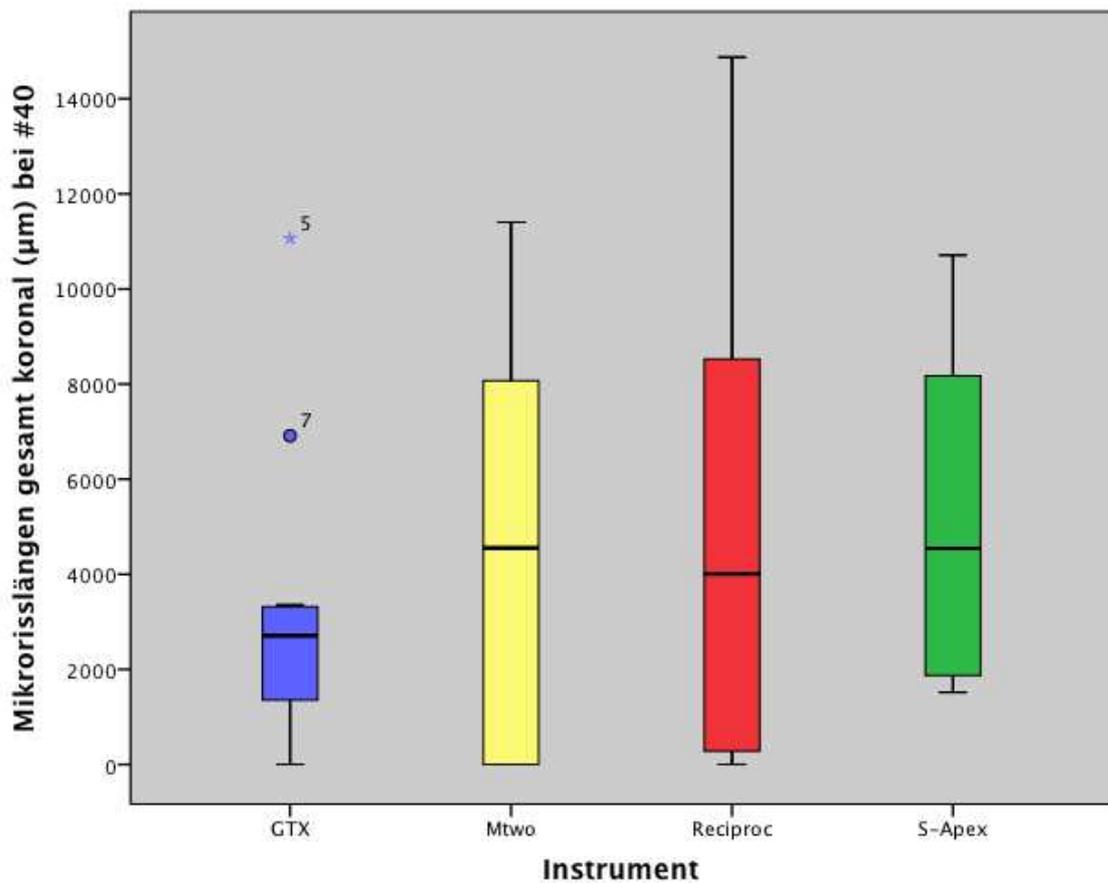


Abb. 23: Mikrorisslängen gesamt koronal bei (μm) #40

5.1.4 Vergleich der Mikrorissbildung finale Feile- insgesamt

Der *Post-hoc*-Test nach *Tamhane* zeigt bezogen auf die Ergebnisse der letzten Feile keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen in allen drei Wurzelbereichen ($p > 0,05$). Auch die univariate *ANOVA* offenbarte keine Signifikanzen zwischen den Werten der vier Systeme im Hinblick auf die Ergebnisse der letzten Feile apikal, mittig und koronal. Auch mit dem Paar-Vergleichs-Test nach *Kruskal - Wallis*, welcher die Ergebnisse der unterschiedlichen Feilensysteme gegenüberstellt, konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen nach Aufbereitung mit der letzten System-Feile festgestellt werden ($p > 0,05$). Zur Veranschaulichung fasst Abbildung 24 die vorangegangenen Abbildungen zusammen. Wie eingangs erwähnt wurde bei der Datenauswertung eine Steigerung der Mikrorisslängen von apikal nach koronal festgestellt. Dieses traf auf alle untersuchten Instrumentensysteme zu. Auffällig sind teils hohe Maximalwerte, wie beim *Reciproc*-System, bei dem koronal die insgesamt höchsten Mikrorisslängen auftraten. Ebenfalls zu be-

merken sind die abgesehen von den apikal erfassten Daten großen Interquartilabstände der Werte.

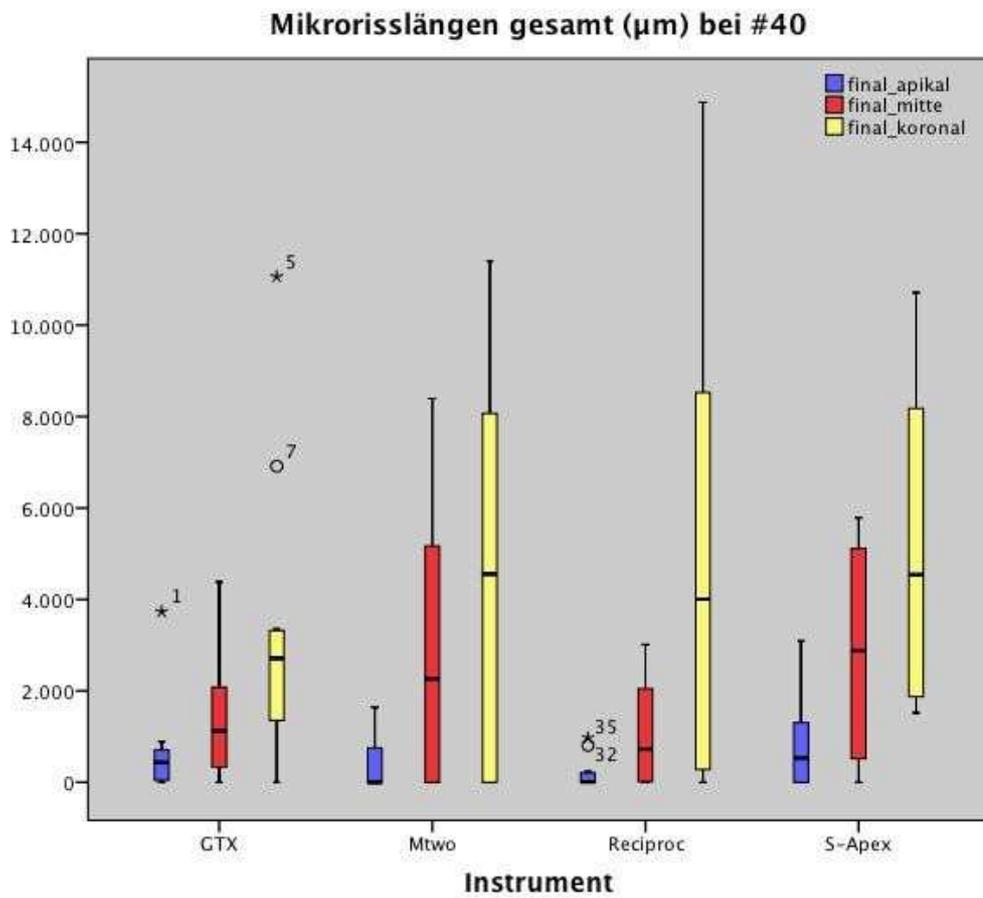


Abb. 24: Mikrorisslängen gesamt (μm) bei #40

5.2 Mikrorissanalysen der vier verschiedenen Systeme im Überblick

5.2.1 Mikrorisslängen nach Aufbereitung mit dem *GT-Series X-System*

Tab. 7: Mikrorisslängen induziert durch das *GT-Series X-System*

| Instrument | Kanalabschnitt | MW* (μm) | SD** (μm) | Min. (μm) | Max. (μm) | 50% Quartil (Median) |
|------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| F1 #20/04 | Apikal | 301 | 612 | 0 | 2084 | 26 |
| | Mittig | 344 | 564 | 0 | 1970 | 154 |
| | Koronal | 1615 | 2627 | 0 | 9630 | 991 |
| F2 #30/04 | Apikal | 551 | 1043 | 0 | 3712 | 153 |
| | Mittig | 945 | 1128 | 0 | 3944 | 565 |
| | Koronal | 2588 | 2775 | 0 | 9937 | 2033 |
| F3 #40/04 | Apikal | 659 | 1017 | 0 | 3733 | 437 |
| | Mittig | 1311 | 1248 | 0 | 4385 | 1121 |
| | Koronal | 3219 | 3020 | 0 | 11064 | 2710 |

*MW (Mittelwert), **SD (standard deviation)

Die Ergebnisse dieser Gruppe zeigten eine deutliche Zunahme der Risslängen von apikal nach koronal. Innerhalb der drei untersuchten Wurzelabschnitte stieg die Länge der Mikrorisse mit fortschreitender Instrumentierung deutlich an. Im Bereich der Wurzelspitze kam es während der Aufbereitung zu einer Erhöhung der Mikrorisslänge von 301 μm auf 659 μm . Mittig betrug die Risslänge nach Beendigung der Aufbereitung 1311 μm . Im koronalen Wurzelbereich entstanden mit einer durchschnittlichen Gesamtlänge von 3219 μm die meisten Mikrorisse. Schaut man auf die in der Tabelle dargestellten Maximalwerte zeigt sich, dass teilweise bei der Aufbereitung wesentlich höhere Werte erreicht wurden (F3 koronal: 11064 μm). Der *Wilcoxon*-Test ergab signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Feilen 1 und 3 in allen drei Wurzelabschnitten ($p < 0,05$). Es konnte mittels *Wilcoxon-Pairwise-Tests* eine signifikante Zunahme der Mikrorisse von der ersten zur zweiten und zur dritten Feile in allen 3 Wurzelabschnitten festgestellt werden ($p < 0,05$).

5.2.2 Mikrorissslängen nach Aufbereitung mit dem *Mtwo*-SystemTab. 8: Mikrorissslängen induziert durch das *Mtwo*- System

| Instrument | Kanalabschnitt | MW* (μm) | SD** (μm) | Min. (μm) | Max. (μm) | 50% Quartil (Median) |
|------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| F1 #10/.04 | Apikal | 29 | 77 | 0 | 270 | ,00 |
| | Mittig | 650 | 1089 | 0 | 3777 | 137 |
| | Koronal | 726 | 1050 | 0 | 2851 | 125 |
| F2 #15/.05 | Apikal | 52 | 107 | 0 | 349 | ,00 |
| | Mittig | 1077 | 1286 | 0 | 3771 | 391 |
| | Koronal | 1227 | 1475 | 0 | 4405 | 854 |
| F3 #20/.06 | Apikal | 160 | 262 | 0 | 787 | ,00 |
| | Mittig | 1586 | 1870 | 0 | 4606 | 675 |
| | Koronal | 2174 | 2205 | 0 | 5664 | 1995 |
| F4 #25/.06 | Apikal | 189 | 308 | 0 | 884 | ,00 |
| | Mittig | 1804 | 1963 | 0 | 4847 | 1312 |
| | Koronal | 2773 | 2757 | 0 | 7180 | 2424 |
| F5 #30/.05 | Apikal | 226 | 355 | 0 | 954 | ,00 |
| | Mittig | 2129 | 2235 | 0 | 6813 | 1660 |
| | Koronal | 3371 | 3376 | 0 | 9266 | 2677 |
| F6 #35/.04 | Apikal | 291 | 443 | 0 | 1255 | ,00 |
| | Mittig | 2620 | 2781 | 0 | 8175 | 1869 |
| | Koronal | 3751 | 3482 | 0 | 9213 | 3616 |
| F7 #40/.04 | Apikal | 369 | 556 | 0 | 1643 | ,00 |
| | Mittig | 2775 | 2778 | 0 | 8396 | 2262 |
| | Koronal | 4684 | 4106 | 0 | 11404 | 4556 |

*MW (Mittelwert), **SD (standard deviation)

Auch in dieser Versuchsgruppe kam es zu einer kontinuierlichen Zunahme der Mikrorisse mit zunehmendem Instrumentendurchmesser in allen drei Wurzelabschnitten. Im apikalen Bereich wurden hierbei die geringsten Werte ge-

messen. Vergleicht man die Ergebnisse der ersten und letzten Feile stiegen diese apikal auf das 12-fache, mittig auf das 4-fache und koronal auf das 6-fache an. Die Anwendung des *Wilcoxon*-Tests ergab signifikante Unterschiede zwischen den Werten der ersten und letzten Feile des Systems (F1/F7) in allen drei Wurzelbereichen ($p < 0,05$). Das Ergebnis des *Wilcoxon-Pairwise*-Tests zeigte eine signifikante Risszunahme von der ersten Feile zu allen folgenden Instrumenten in allen drei Wurzelabschnitten. Nur die Risszunahme von der ersten Feile zur zweiten Feile war im apikalen Wurzelbereich nicht signifikant.

5.2.3 Mikrorissslängen nach Aufbereitung mit dem *Reciproc*-System

Tab. 9: Mikrorissslängen induziert durch das *Reciproc*- System

| Instrument | Kanalabschnitt | MW* (μm) | SD** (μm) | Min. (μm) | Max. (μm) | 50% Quartil (Median) |
|------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| F1 #40/06 | Apikal | 191 | 338 | 0 | 976 | 6,50 |
| | Mittig | 1038 | 1123 | 0 | 3015 | 724 |
| | Koronal | 4739 | 4931 | 0 | 14874 | 4007 |

*MW (Mittelwert), **SD (standard deviation)

Mit Blick auf die Ergebnisse des *Reciproc*-Systems erkennt man einen deutlichen Anstieg der gemessenen Mikrorissslängen von apikal nach koronal. Im Durchschnitt wurden apikal Rissslängen von 191 μm gemessen, im mittleren Wurzelbereich waren die Werte ca. 5-mal so hoch (1038 μm). Koronal wurde eine durchschnittliche Mikrorissslänge von 4739 μm festgestellt. Hinsichtlich der maximal gemessenen Werte fällt ebenfalls eine Steigerung der Werte von apikal nach koronal auf. Systembedingt war bei dem Ein-Feilen-System keine Berechnung nach *Wilcoxon* möglich.

5.2.4 Mikrorissslängen nach Aufbereitung mit dem *S-ApeX*- System

Wie in Tab. 10 ersichtlich steigen die Rissslängen von apikal nach koronal an. Apikal entstanden durch die Aufbereitung gleich nach Verwendung der ersten Feile (#20) Mikrorisse in der durchschnittlichen Gesamthöhe von 621 μm , diese erhöhten sich im Laufe der Aufbereitung jedoch nur auf 910 μm . Auch in der Wurzelmitte entwickelten sich durch die Aufbereitung bereits nach der ersten

Tab. 10: Mikrorisslängen induziert durch das S-ApeX- System

| Instrument | Kanalabschnitt | MW* (μm) | SD** (μm) | Min. (μm) | Max. (μm) | 50% Quartil (Median) |
|---------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| F1 #20 | Apikal | 621 | 1024 | 0 | 2719 | 96 |
| | Mittig | 1127 | 1641 | 0 | 3684 | 51 |
| | Koronal | 1362 | 1822 | 0 | 4556 | 339 |
| F2 #25 | Apikal | 655 | 1019 | 0 | 2722 | 147 |
| | Mittig | 1571 | 1879 | 0 | 4278 | 709,00 |
| | Koronal | 2081 | 2734 | 0 | 6177 | 466,50 |
| F3 #30 | Apikal | 702 | 1051 | 0 | 2805 | 178 |
| | Mittig | 1663 | 1998 | 0 | 4445 | 720 |
| | Koronal | 2237 | 2746 | 0 | 6391 | 649 |
| F4 #35 | Apikal | 739 | 1068 | 0 | 2872 | 235 |
| | Mittig | 1800 | 1068 | 0 | 4752 | 941 |
| | Koronal | 2577 | 2753 | 283 | 6542 | 918 |
| F5 #40 | Apikal | 772 | 1085 | 0 | 2945 | 297 |
| | Mittig | 1996 | 2207 | 0 | 5374 | 1099 |
| | Koronal | 2813 | 2806 | 317 | 6588 | 1269 |
| F6 #50 | Apikal | 799 | 1103 | 0 | 3012 | 340 |
| | Mittig | 2429 | 2093 | 0 | 5505 | 2100 |
| | Koronal | 3246 | 2605 | 1190 | 6786 | 1636 |
| F7 #60 | Apikal | 831 | 1106 | 0 | 3035 | 399 |
| | Mittig | 2593 | 2191 | 0 | 5704 | 2377 |
| | Koronal | 3513 | 2611 | 1370 | 7268 | 1976 |
| F8 #70 | Apikal | 880 | 1103 | 0 | 3046 | 497 |
| | Mittig | 2677 | 2246 | 0 | 5708 | 2433 |
| | Koronal | 3858 | 2774 | 1495 | 7993 | 2451 |
| F9 #80 | Apikal | 910 | 1120 | 0 | 3094 | 531 |
| | Mittig | 2862 | 2310 | 0 | 5785 | 2880 |
| | Koronal | 5229 | 3768 | 1519 | 10712 | 4545 |

MW* (Mittelwert), SD** (standard deviation)

Feile (#20) Risse in der Höhe von 1127 μm . Wie auch bei den drei anderen Systemen wurden im koronalen Wurzelabschnitt die meisten Mikrorisse detektiert. Hier wurde nach der letzten Feile eine Gesamtrisslänge von 5229 μm gemessen. Maximal wurden jedoch koronal vereinzelt Werte von bis zu 10712 μm ermittelt. Signifikante Unterschiede zwischen den Werten der Feile eins und neun ergab in allen drei Wurzelabschnitten die Berechnung mittels *Wilcoxon*-Test, hierbei war $p < 0,05$. Die Mikrorisszunahme von der ersten Feile zu allen nachfolgenden Instrumenten war in den drei Wurzelabschnitten signifikant ($p < 0,05$).

5.3 Aufbereitungszeiten

Die Auswertung der Ergebnisse (Univariate ANOVA, $p = 0,000$) zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Instrumentensystemen, sowohl im Bezug auf die Instrumentierungszeit, als auch auf die Spüldauer und die aus deren Summe resultierende Gesamtaufbereitungszeit. Der *Levene*-Test auf Varianzhomogenität ergab keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$).

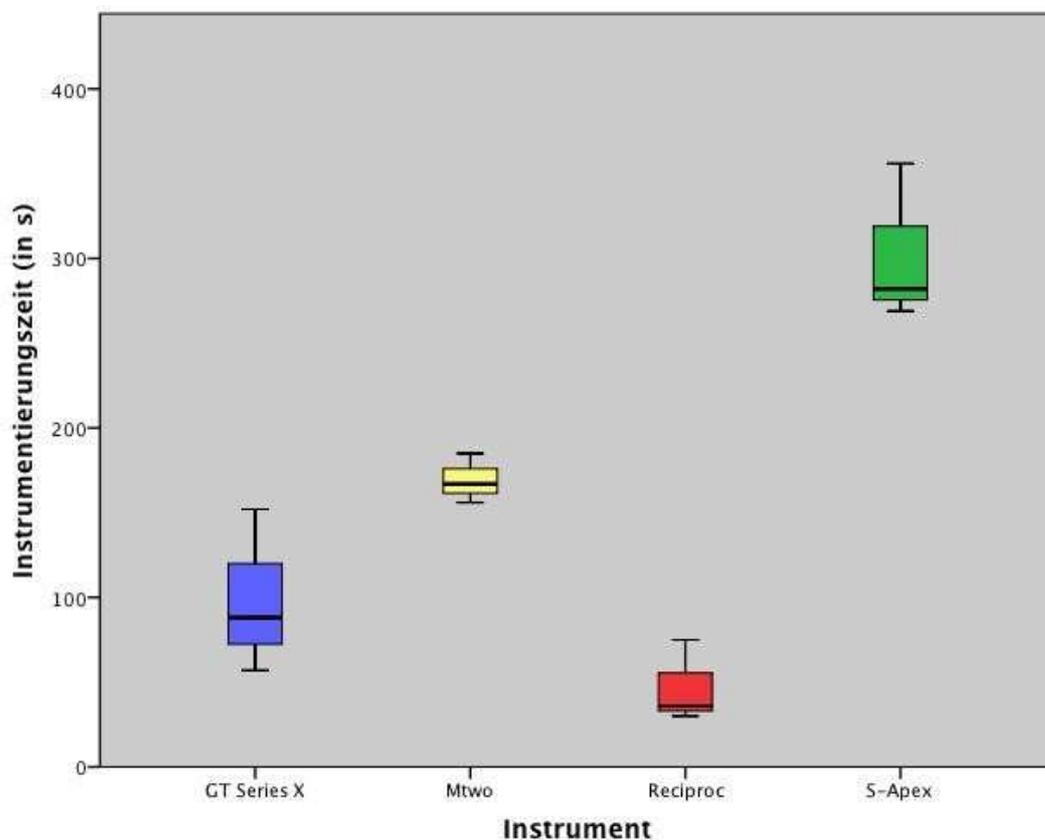


Abb 25: Instrumentierungszeit (s)

Abbildung 25 stellt die unterschiedlichen Instrumentierungszeiten der Systeme in Sekunden dar. Die geringste Zeit wurde beim *Reciproc*-System gemessen, hier wurde ein Medianwert von 30 Sekunden ermittelt. Etwas mehr Zeit musste für die Aufbereitung mit dem *Mtwo*-System aufgewendet werden, hier waren durchschnittlich 160 Sekunden notwendig. Der Medianwert für die Kanalinstrumentierung mit dem *GT-Series X*-System liegt bei ca. 85 Sekunden. Das *S-ApeX*-System benötigte für die Aufbereitung mit durchschnittlich 275 Sekunden die meiste Zeit.

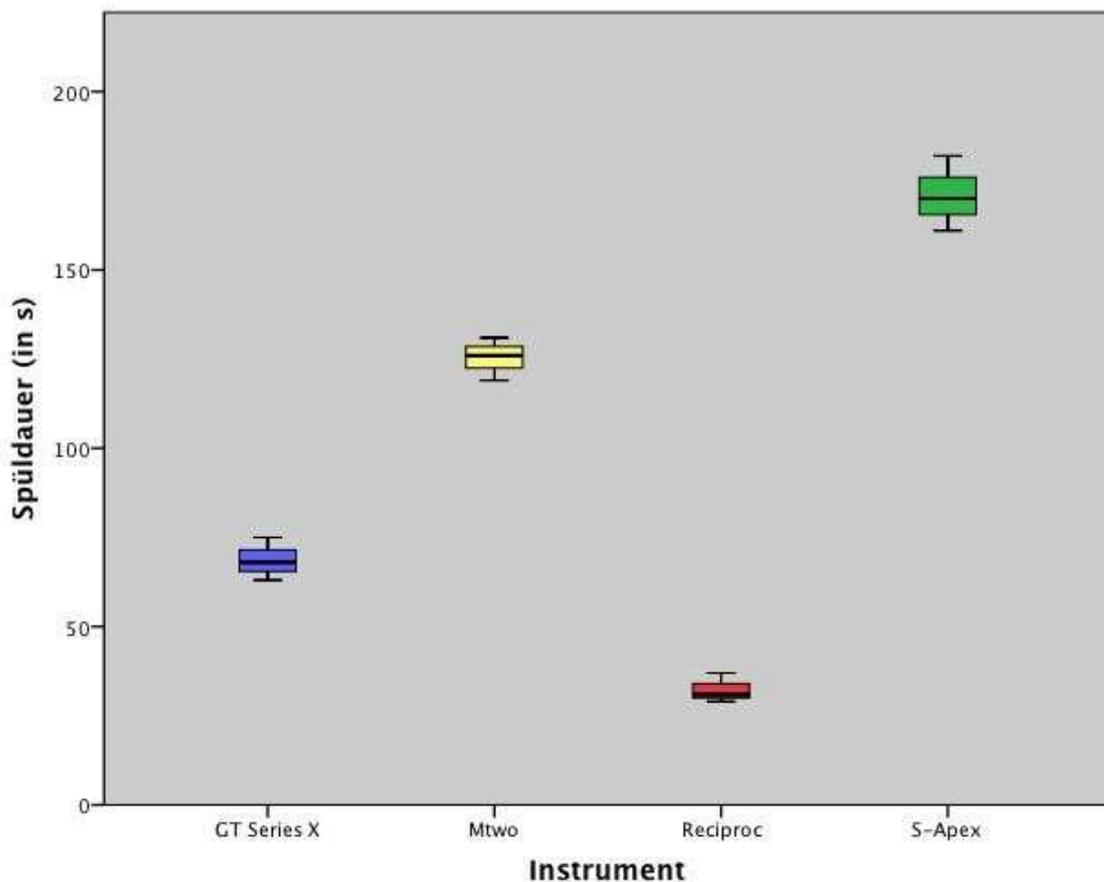


Abb. 26: Spüldauer (s)

Abbildung 26 zeigt die unterschiedliche Spüldauer der vier untersuchten Systeme auf. Die wenigste Zeit für die Zwischenspülung musste für beim *Reciproc*-System aufgewendet werden (Medianwert: 25 Sekunden). Die längste Spülzeit wurde mit durchschnittlich 170 Sekunden beim *S-ApeX*-System gemessen. Der Medianwert für *GT-Series X* liegt bei 70 Sekunden, für *Mtwo* bei ca. 130 Sekunden.

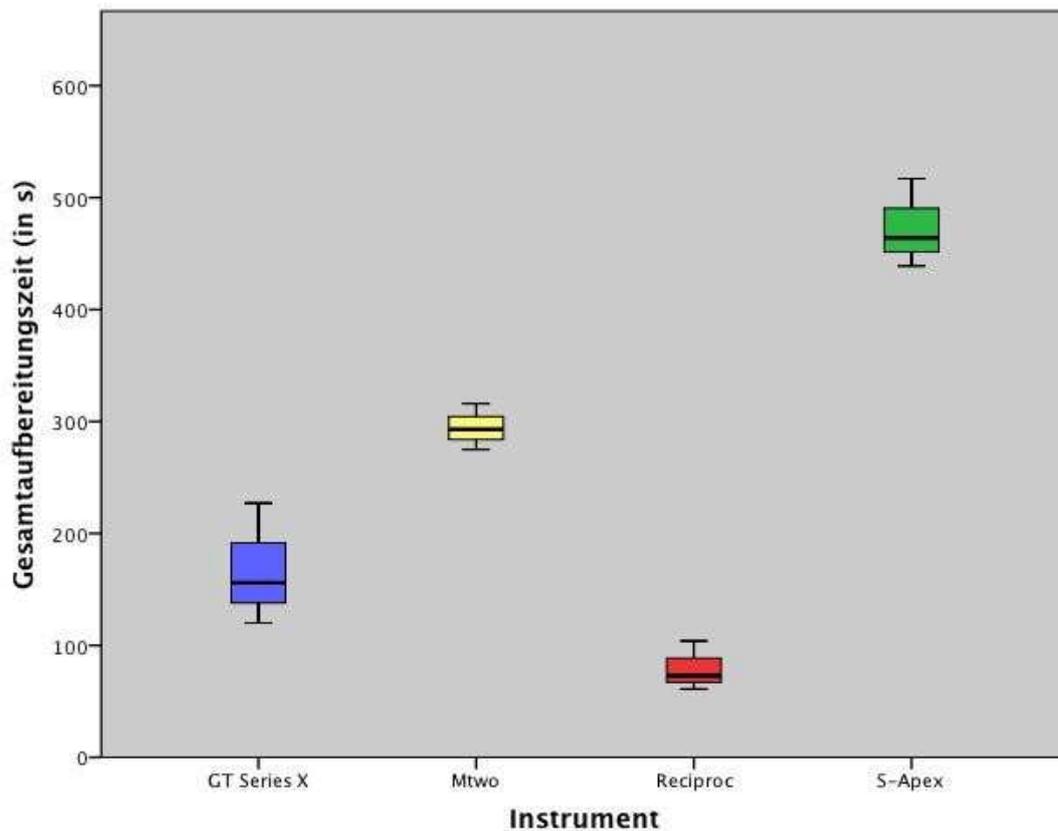


Abb. 27: Gesamtaufbereitungszeit (s)

Die Gesamtaufbereitungszeit umfasst sowohl die Spüldauer, als auch den Instrumentenwechsel und die für die Kanalaufbereitung benötigte Zeit. Hierbei war das *Reciproc*-System mit durchschnittlich ca. 79 Sekunden am schnellsten, das *S-ApeX*-System benötigte signifikant mehr Zeit, als die anderen untersuchten Systeme. Für eine Aufbereitung mit diesem System wurden ca. 473 Sekunden benötigt. Die durchschnittliche Aufbereitungsdauer für das *GT-Series X*-System betrug ca. 168 Sekunden, für die komplette Instrumentierung mit dem *Mtwo*-System mussten ca. 294 Sekunden aufgewendet werden. Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse des Scheffé-Tests bezogen auf die Gesamtaufbereitungszeit der Systeme.

Tab.11: Scheffé-Test

| System | Untergruppe für Alpha= 0,05. | | |
|--------------------|------------------------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 |
| <i>Reciproc</i> | 79,33 | | |
| <i>GT-Series X</i> | 167,67 | | |
| <i>Mtwo</i> | | 294,67 | |
| <i>S-ApeX</i> | | | 473,33 |
| Signifikanz | 0,105 | 1,000 | 1,000 |

In der homogenen Untergruppe 1 konnte bei *GT-Series X* und *Reciproc* trotz unterschiedlich langer Aufbereitungszeiten kein signifikanter Unterschied zwischen den benötigten Zeiten festgestellt werden. Die Aufbereitung mittels *Mtwo*-System war signifikant langsamer als die Instrumentierung mit *GT-Series X* und *Reciproc*. Die signifikant meiste Zeit beanspruchte mit durchschnittlich 473,33 Sekunden das *S-ApeX*-System.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Problemstellung und Zielsetzung

Die Endodontie hat in der Zahnerhaltung einen großen Stellenwert und speziell die Aufbereitung mit maschinellen NiTi-Systemen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Doch fällt bei der großen Auswahl an Systemen angefangen bei vollrotierenden bis hin zu reziprok arbeitenden Ein-Feilensystemen die Wahl häufig schwer. Neben Handhabung und Zeitaufwand sollte auch die Substanzschonung eines Systems mit in Betracht gezogen werden. Auch andere Autoren stellten in Studien Mikrorissbildungen durch verschiedene endodontische Maßnahmen fest [8,85,86,87]. Ziel sollte es also sein, ein System zu wählen, welches den Wurzelkanal möglichst schonend aufbereitet. In dieser Studie wurden teils hohe Werte an Mikrorissen induziert durch die maschinelle Aufbereitung gemessen. Doch an diesem Punkt stellt sich auch die Frage nach der Konsequenz dieser Mikrorisse. Zum einen scheint es zu einer starken bakteriellen Besiedelung der Mikrorisse zu kommen [48], zum anderen muss untersucht werden wie sich die Mikrorisse nach jahre- oder jahrzehntelanger Kaubelastung entwickeln. Inwiefern steigt durch die feinen Risse die Gefahr von vertikalen Wurzelfrakturen?

6.2 Diskussion der Methodik

6.2.1 Anforderungen an Versuchszähne

Bei Studien mit endodontischen Fragestellungen stehen für die Versuchsreihen sowohl artifizielle als auch natürliche Wurzelkanäle bzw. Versuchszähne zur Verfügung. Nach *Hülsmann et al.* erlauben künstliche Versuchskanäle auf der einen Seite eine Standardisierung der Kanaldiameter, der Wurzelkanallänge und auch des Radius und der Länge der Kanalkrümmung. Auf der anderen Seite sind möglicherweise die Härte und das Abriebverhalten von Acrylharz und Wurzelentin nicht als gleichwertig anzusehen. Natürliche Zähne zeigen meist unterschiedliche Kanalmorphologien und -konfigurationen und weisen ebenfalls z.T. Unterschiede in der Dentinhärte auf [43]. In dieser Studie wurde die Rissbildung im Wurzelentin untersucht und da sich die Rissbildung im Kunststoff nicht mit der im Wurzelentin schwer vergleichen lässt haben wir uns für humane Zähne entschieden. Bei der Auswahl der Versuchszähne wurde darauf geachtet, dass die Wurzeln unbeschädigt waren, einen geraden

Wurzelverlauf und auch ein abgeschlossenes Wurzelwachstum aufwiesen. Mit Hilfe eines OP-Mikroskops mit 12-facher Vergrößerung wurden alle Zähne auf initiale Risse untersucht. Nach der Trepanation wurden Zähne mit ovalen Kanälen aussortiert, sodass in die Untersuchung nur Zähne mit runden Wurzelkanalquerschnitten einbezogen wurden.

6.2.2 Kürzung der Versuchszähne

Um für alle Versuchszähne eine einheitliche Arbeitslänge und einen geraden Zugang zum Wurzelkanal zu gewährleisten, wurden die Versuchszähne auf eine einheitliche Länge von 15 mm gekürzt. So wurde ein weiterer Einflussfaktor für abweichende Ergebnisse vermieden. Die Dekapitierung wurde bereits vor der ersten Fotodokumentation durchgeführt um eine Verfälschung der Ergebnisse durch Mikrorissbildung bedingt durch die Kürzung der Zähne zu umgehen. Waren Risse in präoperativen Fotos sichtbar, so wurden diese vermerkt und von der Gesamtrisslänge abgezogen.

6.2.3 Herstellung des simulierten Parodonts

Humane Zähne sind über parodontale Fasern in der Alveole verankert. Dieser Bandapparat fängt den bei der Mastikation entstehenden Druck bis zu einem gewissen Grad auf und erlaubt eine physiologische Bewegung des Zahnes in seinem Knochenfach. Da im Falle der extrahierten Versuchszähne das Parodontium wegfällt, muss dieses um unverfälschte Ergebnisse zu erhalten und die Pufferwirkung der dentoalveolären Fasern mit einzubeziehen für die Versuche nachgestellt werden. Hierfür wurden die dekapitierten Versuchszähne in leicht feuchtem Zustand zunächst mit dünnfließendem Silikon ummantelt, sodass eine gleichmäßige Schicht entstand. Die Wurzeln wurden im Anschluss in kleine Förmchen mit Superhartgips eingebettet. Auch *Wolfart et al.* machten sich für die Simulation des Parodonts eine 200 µm starke Silikonschicht zu Nutze, welche eine Zahnbewegung von 50 µm erlaubte. In ihrer Studie wurden die silikonummantelten Zähne jedoch in eine niedrig schmelzende Legierung eingebettet [105]. Die gleiche Technik wurde auch von *Mehl et al.* verwendet [63]. *Liu et al.* ummantelten die Wurzeln mit Aluminiumfolie bevor sie sie in Kunstharzblöckchen einbetteten [58]. Die Aluminiumfolie diente hierbei nur als

Platzhalter und wurde nachfolgend durch ein hydrophiles Vinylpolysiloxan ersetzt. *Holcomb et al.* hielten für eine ihrer Studien die Zähne während der Aufbereitung in der Hand. Die Versuchsobjekte wurden dafür in ein mit Wasser befeuchtetes Gaze-Tuch gehüllt, was den Vorteil hat, dass die Zähne gleichzeitig vor Austrocknung geschützt werden [40].

6.3 Die maschinelle Aufbereitung:

Auswahl der untersuchten Feilensysteme

6.3.1 *GT-Series-X-System*

Die Feilen sind die Nachfolger der *System-GT*-Feilen und bestehen aus Nickel-Titan, der mit einem speziellen Wärmeverfahren bearbeitet wurde (M-Wire-Nickel-Titan). Dies bewirkt, dass die Feilen eine geringere zyklische Ermüdung aufweisen (bei #30/.04) [3]. *Gambarini et al.* kamen bei einer Studie zum gleichen Schluss [29]. Auch diese Feilen haben eine nicht-schneidene Battspitze und weisen einen triangulären Querschnitt auf. Es werden ISO-Größen 20,30,40 und Konizitäten von 4-8% angeboten. Die *GT-Series X*-Feilen haben immer noch Radial lands, wobei diese durch eine Variation der Breite entlang des Instruments verbessert sind [11]. Laut *da Cunha Peixoto et al.* weisen die *GT-Series-X*-Feilen im Vergleich mit ihrem Vorgänger aufgrund unterschiedlicher struktureller Merkmale und Abmessungen eine höhere Resistenz gegen zyklische Ermüdung auf, gleichzeitig zeigen sie jedoch eine geringere Torsionsfestigkeit [19]. *Kell et al.* fanden allerdings heraus, dass Feilen der Series *GT-X* nach Gebrauch eine höhere Resistenz gegen Torsionsfrakturen haben, als die älteren *GT*-Feilen (bei #20/.06) [51].

6.3.2 *Mtwo-System*

Dieses NiTi-System wurde 2005 auf den Markt gebracht und ist als etabliert anzusehen. Die Feilen sind durch einen S-förmigen Querschnitt, 2 aktive Schneiden und einer nicht-schneidenden Spitze (Battspitze) gekennzeichnet. Die Instrumentensequenz besteht aus 8 Feilen von ISO-Größe 10-40 mit Konizitäten von 4-7%. Aufbereitungstechnik ist hierbei die Single-length-Technik. *Mtwo*-Feilen weichen während der Aufbereitung nicht vom originären Kanalverlauf ab [14,82] und entfernen im Vergleich zu *ProTaper*- und

WaveOne-Feilen im apikalen Bereich mehr Debris, gleiches gilt für *Reciproc*-Feilen [14]. *Foschi et al.* fanden jedoch heraus, dass *Mtwo*-Feilen nicht in der Lage sind im apikalen Anteil des Wurzelkanals den Smear Layer und Debris vollständig zu entfernen [28]. Bezüglich der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle zeigt sich das *Mtwo*-System als schnell und sicher aufbereitend bei gleichzeitigem Beibehalten der Kanalkrümmung [82]. Im Vergleich zur Aufbereitung mit manuellen K-Feilen zeichnet sich das *Mtwo*-System durch eine adäquate Reinigungsleistung aus und erreicht in kürzerer Zeit ähnliche Ergebnisse wie die manuelle Aufbereitung [5]. Jedoch verursacht die Kanalinstrumentation mit dem *Mtwo*-System signifikant mehr Dentinrisse als die Handaufbereitung [39]. *Machado et al.* untersuchten in einer Studie die Effektivität von *ProTaper* und *Mtwo* im Hinblick auf die mechanische Entfernung von Mikroorganismen im Wurzelkanalsystem. Sie stellten fest, dass beide Systeme die Bakterienzahl reduzieren konnten und für diesen Zweck nützlich sind [61].

6.3.3 *Reciproc*-System

Für diese Studie wurde das *Reciproc*-System als Vertreter der Ein-Feilen-Systeme ausgewählt. Die Feilen besitzen einen S-förmigen Querschnitt und arbeiten im Gegensatz zu den vollrotierenden NiTi-Systemen mit einem reziproken Antrieb, welcher nach *Varela-Patiño et al.* das Risiko einer zyklischen Ermüdung reduziert und das Instrument entlastet [102]. Auch *Pedullà et al.* bestätigen, dass die reziproke Instrumentenbewegung verglichen mit einer Vollrotation der Systeme eine höhere Resistenz gegen zyklische Ermüdung bewirkt [69]. Durch die doppelte S-Form der Feilen sind diese besonders flexibel und durch das Design wird eine gute Schneidleistung erzielt. Der große Spanraum der Feilen sorgt bei der Aufbereitung für einen adäquaten Abtransport der entstehenden Dentinspäne [13]. Auch diese Feilen bestehen aus M-Wire-Nickel-Titan. Sie sind durch einen regressiven Taper gekennzeichnet, welcher einen unnötigen Substanzabtrag verhindern soll. Je nach Kanaldurchmesser stehen 3 verschiedene Feilengrößen zur Auswahl. In dieser Studie wurde die R40 (#40/.06) mit der Crown-down-Technik verwendet. Nach *Yared* ermöglicht dieses System eine Aufbereitung ohne Gleitpfaderstellung [108], desweiteren ist die Aufbereitung im Vergleich zu anderen vollrotierenden

Systemen signifikant schneller [13]. Die alternierende Arbeitsweise der Instrumente besteht aus einer Drehung im Uhrzeigersinn, bei der die Feile in den Kanal vorgebracht wird und einer Bewegung gegen den Uhrzeigersinn, bei der die Feile wieder freigegeben wird. Hierbei ist der Winkel der Drehung gegen den Uhrzeigersinn größer als der Winkel der Bewegung im Uhrzeigersinn. Aufgrund des größeren Winkels gegen den Uhrzeigersinn kann sich die Feile kontinuierlich nach apikal vorarbeiten [109]. Alle Winkel sind in einem elektronischen Motor eingespeichert. [13]. Auch der Umstand, dass bei der Aufbereitung mit *Reciproc* und *WaveOne* nur eine Feile für die komplette Instrumentierung genutzt wird, hat im Vergleich zur Aufbereitung mit der vollen Sequenz des *Mtwo*- oder *ProTaper*-Systems keinen Einfluss auf die Sauberkeit des Kanals [13]. In einer Studie von 2012 fanden *Bürklein* und *Schäfer* heraus, dass es bei der Anwendung reziproker Feilen im Vergleich zu vollrotierenden Systemen zu mehr Extrusion von Debris nach apikal kommt [14]. Nach *Gavini et al.* frakturiert die *Reciproc*-Feile R25 bei reziprokem Antrieb, verglichen mit der vollrotierender Anwendung, erst nach einer höheren Anzahl an Zyklen. Die reziproke Bewegung kann also die Resistenz gegen zyklische Ermüdung verbessern [32]. *Reciproc*-Feilen haben auch verglichen mit Feilen der Serie *WaveOne* eine signifikant höhere Resistenz gegenüber zyklischer Ermüdung [74]. *Bürklein et al.* untersuchten die durch die Aufbereitung mit rotierenden und reziproken NiTi-Feilen induzierten Defekte am Dentin. Sie fanden mittels horizontaler Zahnschnitte heraus, dass sowohl die vollrotierenden, als auch die reziproken Feilen Beschädigungen des Dentins hervorrufen. Laut ihrer Studie entstanden im apikalen Kanalabschnitt durch die reziproke Aufbereitung signifikant mehr inkomplette Dentinrisse, als durch voll-rotierende NiTi-Feilen [15].

6.3.4 S-ApeX-System

Besonderes Merkmal dieses Systems ist zum einen die inverse Konizität der Feilen, die für einen adäquaten apikalen Stopp sorgen soll, zum anderen die Sollbruchstelle bei 16 mm, die verhindern soll, dass das Instrument bei Fraktur tief im Kanal abbricht. Die dreieckigen Feilen stehen in den ISO-Größen 15-80 zur Verfügung. Laut *Bier et al.* verursachen die Feilen keine Beschädigungen des Dentins. In dieser Studie wurde jedoch im Gegensatz zu unserer Versuchs-

reihe auch nur bis zur ISO-Größe 60 instrumentiert [8]. Flexible Feilen wie S-Apex sind bevorzugt für die Instrumentierung von S-förmigen Wurzelkanälen zu nutzen [10]. Leider finden sich in der Literatur erst sehr wenige Untersuchungen zum o.g. System, sodass keine Informationen über die Reinigungs- und Schneidleistung des Systems zur Verfügung stehen.

6.4 Das Spülkonzept

Um die bei der Aufbereitung entstehenden Dentinspäne, sowie vorhandene Mikroorganismen zu entfernen, wurde in dieser Studie nach Anwendung jeder Feile für ca. 12 Sekunden mit 3%-iger NaOCl-Lösung gespült. Nach Beendigung des Spülvorgangs wurde der Kanal feucht belassen um die Eigenschaften des NaOCl als Transport- und Schmiermedium zu nutzen und so die Aufbereitung zu erleichtern. Laut Stellungnahme der DGZMK und DGZ gilt NaOCl in Konzentrationen von 0,5% bis 5% als Spüllösung der ersten Wahl [20], hat eine gute antibakterielle Wirksamkeit und kann sowohl vitales, als auch avitales Gewebe im Wurzelkanal eliminieren [4]. *Baumgartner und Cuenin* fanden in einer Studie heraus, dass sich die Effektivität von NaOCl-Lösungen in Konzentrationen von 5,25%, 2,5% und 1% nicht unterscheidet [7]. Aufgrund der zytotoxischen Nebenwirkungen auf das periradikuläre Gewebe, die mit einer Steigerung der Wirkungskonzentration zunehmen, wird jedoch die Anwendung von 3%-iger Lösung empfohlen [77]. Ein weiterer Grund für die Wahl der 3%-igen Lösung war, dass die Spülung von Wurzelkanälen mit 5,25%-igem NaOCl das Elastizitätsmodul und auch die Biegefestigkeit des Dentins reduziert [90]. Um Verfälschungen der Ergebnisse zu vermeiden wurde daher in dieser Studie auf die Verwendung höherer Konzentrationen verzichtet.

6.5 Mikrorissdarstellung

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Mikrorissanalyse im Wurzelentin mittels Transillumination und mikroskopischer Vergrößerung. Diese Technik hat zum Vorteil, dass sie non-destruktiv und vor allem reproduzierbar angewendet werden kann. Dies erlaubt die Analyse der Mikrorisszunahme nach jeder Feile am gleichen Versuchszahn, ohne dass der Zahn zerteilt werden muss. Als

nachteilig muss jedoch gewertet werden, dass die Methode nur *in-vitro* angewendet werden kann und dass sie keine Auskunft darüber gibt wie tief sich die Risse ins Wurzelentin ausdehnen. Auch die konventionelle Röntgentechnik ist eine Methode zur Darstellung von Rissen, die ebenfalls non-destruktiv ist. Problematisch hierbei ist jedoch, dass Frakturlinien nur direkt dargestellt werden können, wenn sie parallel zum Röntgenstrahl orientiert sind oder in einem Winkel von 4° zu jeder Seite [80]. Die Gefahr Frakturen aufgrund falscher Projektionen zu übersehen ist bei dieser Technik recht groß, zumal in dieser Studie Mikrorisse untersucht werden, die aufgrund ihrer geringen Ausdehnung noch schlechter dargestellt werden können. Desweiteren können Frakturen mit mesiodistaler Orientierung nicht direkt dargestellt werden, es sei denn die 2 Fragmente sind disloziert [111]. Aufgrund der Strahlenbelastung für den Patienten können Röntgenbilder bei Verdacht auf eine Fraktur nicht beliebig oft wiederholt werden um aus unterschiedlichen Winkeln Aufnahmen zu machen [111]. *Hannig et al.* sind der Meinung, dass das FD-VCT (flat panel volume detector computer tomograph) ein innovatives Gerät für die non-destruktive Detektion von Rissen im Dentin, sowie für die Diagnostik von vertikalen Wurzelfrakturen ist. Gleichzeitig sind sie jedoch auch der Auffassung, dass die Strahlenbelastung vor Einsatz im klinischen Bereich durch technische Veränderungen am Gerät zu reduzieren ist. Der negative Einfluss von metallischen Restaurationen, den man wie bei einem konventionellen CT erwartet, spiele bei diesem Gerät eine untergeordnete Rolle [35]. Für eine *in-vitro*-Studie könnte man diese Art der Mikrorissanalyse jedoch in Betracht ziehen, sobald das System etablierter ist. Eine weitere diagnostische Möglichkeit ist das konventionelle CT, welches nach *Landrigan et al.* sowohl die drei-dimensionale und non-invasive Visualisierung von Mikrorissen ermöglicht, als auch die Darstellung ihrer Morphologie und räumlichen Lage [54]. Das CT ist dem konventionellen Röntgen im Hinblick auf die Diagnostik von VRFs überlegen [111]. Daher halten sie die Verwendung eines CTs für sinnvoll. In einer Untersuchung stellten sie eine durchschnittliche Sensitivität von 70% und eine Spezifität von 100% für die Diagnose einer Fraktur mittels Dünnschicht-CT fest [111]. *Youssefzadeh et al.* empfehlen daher die Anfertigung eines CTs bei klinisch begründetem Verdacht auf eine Fraktur [111]. Nach *Edlund et al.* ist für die Diagnose einer VRF jedoch die Cone beam computed tomography (CBCT) das Mittel der Wahl. Die Ergebnisse ihrer Studie belegen die Effektivität dieses

Systems in der Diagnostik von VRFs mit relativ hoher Spezifität und Sensitivität [23]. Die Dosis der preisgünstigeren CBCT liegt weit unter der von klinischen Multi-Slice-CTs [60]. Auch *Hassan et al.* sehen im CBCT verglichen mit periapikalen Röntgenbildern das bessere Mittel für die Diagnostik von VRFs. Da CBCTs eine drei-dimensionale Darstellung der Frakturlinien aus mehreren Winkeln ermöglichen, haben sie verglichen mit konventionellen Röntgenbildern eine höhere Sensitivität bezüglich der Detektion von VRFs. Dabei hat das Vorhandensein von Wurzelfüllungen ihrer Meinung nach keinen Einfluss auf die Genauigkeit des Systems [36]. *Shemesh et al.* untersuchten den Nutzen von CBCTs in der Diagnostik von Perforationen im Vergleich mit konventionellen Röntgenbildern. Sie fanden heraus, dass das Risiko einer Fehldiagnose für beide Techniken groß ist, wobei CBCTs eine höhere Sensitivität zeigten [88]. Die optische Kohärenztomographie (OCT) wurde entwickelt um biologische Systeme non-invasiv und zweidimensional in der Querschnittsansicht darstellen zu können. Hierbei werden die optischen Reflektionen von Mikrostrukturen gemessen. Es können sowohl Niedrig-Kohärenz-Licht, als auch Ultrakurzwellen-Impulse für die Messung genutzt werden [41]. *Shemesh et al.* sehen in der OCT ein gutes und verlässliches Mittel für die nondestruktive Detektion von VRFs. Nachteilig sind jedoch noch die hohen Kosten für den OCT-Katheder, wobei schon Systeme für den dentalen Gebrauch in Entwicklung sind. Die Methode eignet sich auch gut um die Kanalanatomie und Sauberkeit der Kanalwände *in-vivo* zu beurteilen, ohne ionisierende Strahlung verwenden zu müssen [84]. Für diese Studie eignete sich die OCT jedoch nicht, da diese eine Teilung der Versuchszähne erfordert hätte. Das Ziel eine non-destruktive Methodik für die Rissanalyse zu entwickeln, bei der nach jeder Feile die Risszunahme am gleichen Versuchszahn gemessen werden kann, hätte damit nicht erreicht werden können. *Bahcall und Barss* berichten über die oroskopische Untersuchung des Wurzelkanalsystems. Hierbei stehen zwei zum einen faseroptische, zum anderen Stablinsen- Endoskope zur Auswahl. Beide können in der Endodontie zur Visualisierung des Wurzelkanalsystems verwendet werden. Als nachteilig muss jedoch bewertet werden, dass der Kanal für die Verwendung eines 0,8 mm Endoskops auf den 15 koronalen Millimetern bis Größe 90 aufbereitet sein muss um ein klemmfreies Einführen in den Kanal zu gewährleisten. Dies erlaubt die Visualisierung des apikalen Kanaldrittels [6]. Diese Technik wäre für diese Versuchsreihe nicht in Frage gekommen, da eine

so große koronale Aufbereitung die Ergebnisse deutlich hätte verändern können. Die Arbeitsgruppe von *Culjat et al.* entwickelte 2005 ein spezielles Ultraschallsystem für die Detektion von Rissen im Dentin. Hierfür stellten sie künstliche Zahnmodelle her, deren Eigenschaften an denen von natürlichen Zähnen orientiert waren. Diese simulierten Zähne wiesen einen Riss nahe der Schmelz-Dentin-Grenze auf. *Culjat et al.* kamen zu dem Ergebnis, dass mit dem entwickelten System klar zwischen Arealen mit und ohne Risse unterschieden werden konnte [16]. Hinsichtlich dieser vielversprechenden Technik stellt sich jedoch die Frage, ob Mikrorisse der Größe, die mit der Transillumination festgestellt werden konnten auch mittels Ultraschall hätten dargestellt werden können. Wie auch in dieser Studie nutzte *Wright et al.* in einer Untersuchung die Transillumination zur Darstellung von Mikrorissen. Er kombinierte diese Technik mit verschiedenen Farbstoffen und optischer Vergrößerung und fand dabei heraus, dass Transillumination zusammen mit Methyleneblau die wirksamste Methode ist. Er betonte die Nützlichkeit von Transillumination in der Rissanalyse [106]. In Vorversuchen, zu der vorliegenden Studie wurden die verwendeten Silikonformen für die Fotodokumentation entwickelt, die eine optimale Belichtung der Wurzeln und eine gute Detailschärfe ermöglichten. Mikrorisse ließen sich auf diese Weise sehr gut darstellen, sodass auf die zusätzliche Verwendung von Farbstoffen verzichtet werden konnte. *Shemesh et al.* nutzten in einigen ihrer Studien Zahnschnitte für die Mikrorissanalyse. Hierbei wurden die Wurzeln nach Wurzelkanalaufbereitung oder -füllung im Abstand von 3, 6 und 9 mm vom Apex horizontal mit einer wassergekühlten Säge geteilt. Diese Hartsubstanzschnitte wurden nachfolgend unter einem Mikroskop mit Kaltlichtquelle betrachtet und die Rissanalyse wurde vorgenommen. Vorteil dieser Technik ist sicherlich, dass die Risse in ihrer kompletten Ausdehnung dargestellt werden können [85,86]. In diesem Zusammenhang lässt sich zum einen zwischen oberflächlichen und tiefer gehenden Rissen, zum anderen zwischen kompletten und inkompletten Rissen unterscheiden. Als nachteilig kann bewertet werden, dass durch die Zertrennung der Wurzel Beschädigungen und Artefakte entstehen können. Da in der vorliegenden Arbeit jedoch die Risszunahme nach jeder einzelnen Feile und zwar am selben Versuchszahn gemessen werden sollte, wäre die Technik von *Shemesh et al.* für diese Studie nicht in Frage gekommen, da es sich hierbei um eine destruktive und nicht reproduzierbare

Technik handelt. In dieser Studie wurde für die Rissanalyse die Transillumination in Kombination mit optischer Vergrößerung per Lichtmikroskop gewählt. Die Mikrorisse und vor allem deren Zunahme konnte am selben Versuchszahn nach jeder Feile reproduzierbar beurteilt werden. Die Wurzeln mussten daher nicht geteilt werden. Es handelt sich also um eine non-destruktive Methode, bei der nur 2 Flächen des Zahnes (mesial und distal) beurteilt wurden, da man ein Mehrfachzählen von Rissen vermeiden wollte. Desweiteren ließen sich die Wurzeln von vestibulär oder oral aufgrund der unterschiedlichen Dentindicke wesentlich schlechter durchleuchten. Nachteil dieser Technik ist allerdings, dass keine Aussage darüber getroffen werden kann wie tief sich die Risse ins Dentin ausdehnen bzw. ob es sich um komplette oder inkomplette Risse handelt. Von Vorteil bei der Auswertung war die hohe Auflösung der Bilder. Dadurch war es möglich, dass die Aufnahmen am Computerbildschirm vergrößert werden konnten, was die Auswertung der Risslängen vereinfachte. Die Aufbereitung und Auswertung wurde von einem Behandler ausgeführt. Da es sich bei der Rissauswertung um eine klare Ja-Nein-Entscheidung handelte waren subjektive Einflüsse auf die Auswertung auszuschließen.

6.6 Diskussion der Ergebnisse

6.6.1 Prüfung der Nullhypothesen

1. Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung verursacht keine Mikrorisse im Wurzeldentin unabhängig vom Feilensystem.
*Diese Hypothese wird **abgelehnt**.*

Bei allen untersuchten Systemen verursachte die maschinelle Aufbereitung Mikrorisse, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß. Somit sind die Ergebnisse mit denen der Arbeitsgruppe um *Shemesh* konform, welche konstatierte, dass die Aufbereitung von Wurzelkanälen mit rotierenden NiTi-Feilen zu Defekten der Kanalwand führt [85].

2. Die Erhöhung der Feilenzahl kann das Risiko einer Rissbildung im Wurzelkollodium nicht reduzieren.

*Diese Hypothese wird **angenommen**.*

Durch Aufbereitung mit dem *S-ApeX*-System, dem System, welches mit neun Feilen die meisten Feilen beinhaltet, entstanden durchschnittlich die meisten Mikrorisse in allen 3 Wurzelregionen. Während die Aufbereitung mit dem Ein-Feilen-System *Reciproc* zumindest apikal und mittig, jedoch nicht koronal, die geringsten Mikrorisslängen zeigte. Auch *GT-Series X* erzeugte trotz Aufbereitung mit nur drei Feilen weniger Risse als die Aufbereitung mit dem *Mtwo*-System, welches sieben Feilen umfasst. Das gibt uns einen Hinweis, dass sowohl Feilengeometrie als auch Konizität eine Rolle spielen könnten.

3. Im apikalen, substanzschwächeren Bereich der Wurzel entstehen keine Mikrorisse.

*Diese Hypothese wird **angenommen**.*

Diese Hypothese konnte durch die durchgeführten Versuchsreihen bestätigt werden. Im Bereich der Wurzelspitze wurden bei allen Systemen im Vergleich zum koronalen und mittleren Drittel weniger Mikrorisse detektiert. Begründet werden könnte dies durch die zunehmende Konizität der Feilen zum Instrumentenschaft hin. Eine Ausnahme bildet hier das *S-ApeX*-System, welches durch eine inverse Feilenkonizität gekennzeichnet ist. Von allen vier Feilensystemen entstanden durch die Aufbereitung mit dem *S-ApeX*-System apikal die meisten Mikrorisse.

4. Eine Umkehr der Feilenkonizität vermindert das Risiko der Entstehung von Mikrorissen nicht.

*Diese Hypothese wird **angenommen**.*

Das *S-ApeX*-System, gekennzeichnet durch eine inverse Feilenkonizität, verursachte während der Aufbereitung durchschnittlich die meisten Mikrorisse in allen drei Wurzelabschnitten.

5. Das *Reciproc*-System produziert trotz Benutzung nur einer Feile nicht weniger Risse.

*Diese Hypothese wird nur **teilweise angenommen**.*

Diese Hypothese konnte nur teilweise bekräftigt werden, denn im apikalen und mittleren Wurzel Drittel erzeugte die Wurzelkanalaufbereitung mit der *Reciproc*-Feile im Vergleich mit den anderen Systemen durchschnittlich weniger Mikrorisse. Nur im koronalen Wurzelbereich produzierte die Feile nach dem *S-ApeX*-System die höchsten Werte für die Gesamtrisslänge. Grund hierfür könnte die 6%-ige Konizität der Feile sein, die den koronalen Wurzelanteil möglicherweise stärker beansprucht.

6.6.2 *GT-Series X*-System

Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass das *GT-Series X*-System von allen untersuchten Feilensystemen im Durchschnitt die niedrigsten Werte für die kumulierten Mikrorisslängen produzierte. Wie auch bei den weiteren Systemen konnte hier jedoch eine Steigerung der Mikrorisslängen von apikal nach koronal festgestellt werden. Möglicherweise ist dieser Umstand durch die Konizität der Instrumente bedingt, die bei diesem System ausschließlich 4% betrug. Positiv auf die Rissbildungstendenz könnte sich zudem das Feilendesign auswirken. Die Instrumente des *GT-Series X*-Systems haben einen triangulären Querschnitt und verfügen über Radial lands. Diese Geometrie führt zu einer guten Zentrierung im Wurzelkanal. Sie sind zudem aus einem speziell wärmebehandelten M-Wire-Nickel-Titan gefertigt, der die Feilen flexibler [71] und widerstandsfähiger gegen zyklische Ermüdung macht [3]. Unter Umständen ist diese Weiterentwicklung des Werkstoffes ein Grund für die geringeren Mikrorisslängen von *GT-Series X* und auch *Reciproc*. Denn beide Feilen können sich aufgrund der höheren Flexibilität während der Aufbereitung gegebenenfalls

besser an die Kanalkonfiguration anpassen.

6.6.3 *Mtwo*-System

Die Feilen der *Mtwo*-Serie erzeugten mit 7828 µm nach dem *S-Apex*-System durchschnittlich die meisten Mikrorisse. Auch in der Studie von *Hin et al.* entstanden durch die Aufbereitung mit *Mtwo* Risse im Dentin, hier wurden Zahnschnitte angefertigt welche sogar vollständige Risse zeigten [39]. Die Feilen verfügen über einen S-förmigen Instrumentenquerschnitt und aktive Schneidekanten. Innerhalb der Aufbereitungssequenz wechseln die Konizitäten der Instrumente zwischen 4 und 6 % und auch die Drehmomenteinstellung ändert sich im Bereich von 1,2 bis 2,3 Ncm. Beide Umstände könnten für die höhere Mikrorissbildung mit verantwortlich sein. *Hin et al.* fanden zudem heraus, dass bei der Aufbereitung mittels vollrotierenden *Mtwo*-Feilen mehr Risse entstehen, als bei der Instrumentierung mit Handfeilen [39]. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass möglicherweise auch das Drehmoment eine Rolle spielen kann. Das *Mtwo*-System ist das einzige der untersuchten Systeme, bei dem das Drehmoment innerhalb der Instrumentensequenz verändert wird. Das Simultaneous-Shaping soll dafür sorgen, dass der Kanal von jedem Instrument von apikal bis koronal geformt wird, da dadurch alle Feilen über größere Flächen Kontakt zur Kanalwand haben, wird hierbei gegebenenfalls mehr Stress auf das Wurzelentzin ausgeübt, was eine mögliche Ursache für die Rissbildung darstellt.

6.6.4 *Reciproc*-System

Im apikalen und mittigen Wurzelbereich erzeugte die Aufbereitung mit dem *Reciproc*-System von VDW im Durchschnitt die wenigsten Mikrorisse. Koronal war die Rissbildung stärker, was im Zusammenhang mit dem Taper der eingesetzten *R40*-Feile gesehen werden muss. Der Instrumentenkonus beträgt 6% wohingegen der der finalen Feilen der Systeme *Mtwo* und *GTX* 4% beträgt. Widersprüchlich ist jedoch, dass VDW mit dem regressiven Taper des Instrumentes wirbt, welcher einen unnötigen Substanzabtrag verhindern soll. Das *S-Apex*-System muss aufgrund der inversen Konizität von dieser Betrachtung ausgenommen werden. Die Studie von *Wilcox et al.* gibt einen Hinweis darauf, dass der eingesetzte Taper einen eindeutigen Einfluss auf die

Frakturresistenz des Zahnes hat. Mit der Aufbereitungsgröße des Kanals stieg auch das Auftreten von Risslinien oder Frakturen an [104]. Das S-förmige Feilendesign scheint im Zusammenhang mit der reziproken Arbeitsweise des Systems substanzschonend zu arbeiten, obwohl nur eine Feile benutzt wird. Der Querschnitt der Feilen und der daraus resultierende große Spanraum erleichtert den Abtransport von Dentinspänen, gewährleistet somit eine gute Kanalreinigung und führt zu einer effizienten Schneidleistung [13], was die auf die Kanalwand wirkenden Kräfte möglicherweise reduzieren könnte. *Bürklein et al.* fanden im Gegensatz zu unseren Ergebnissen heraus, dass bei der reziproken Aufbereitung apikal signifikant mehr Dentinrisse entstanden, als bei der Kanalinstrumentierung durch die vollrotierenden NiTi-Systeme [15]. Entscheidend für die in dieser Studie ermittelten Daten scheint jedoch eine sehr vorsichtige, schrittweise Instrumentierung zu sein.

6.6.5 S-Apex-System

Dieses Feilensystem führte zu den höchsten durchschnittlichen Mikrorisslängen in allen drei Wurzelabschnitten. Die Erklärung dafür könnte in der inversen Konizität der Feilen liegen, welches das Hauptunterscheidungsmerkmal zu den anderen untersuchten Systemen ist. Durch das Feilendesign ist das Vordringen in den Wurzelkanal erleichtert, es könnte jedoch bedingt durch die inverse Konizität der Instrumente zu punktuellen Belastungen der Kanalwand kommen, was die hohen Werte für die Mikrorisslängen erklären könnte. *Bier et al.* untersuchten das S-ApeX-System ebenfalls im Hinblick auf Beschädigungen des Dentins durch maschinelle Aufbereitung. Im Rahmen dieser Studie wurden jedoch keine Risse im Dentin detektiert. Die Gründe hierfür sind vermutlich in der Methodik zu suchen. Die Arbeitsgruppe um *Bier* nutzte die Feilen ISO 15-60 auf voller Arbeitslänge. Im Anschluss an die Aufbereitung wurden Zahnhartschnitte angefertigt, welche nachfolgend unter dem Mikroskop auf Risse untersucht wurden [8]. In der vorliegenden Studie hingegen wurden Feilen bis ISO 80 genutzt und ab der ISO-50-Feile ein Step-back in 1mm-Schritten durchgeführt um die einheitliche Endaufbereitungsgröße 40 zu erreichen. Desweiteren wurden hier mesial und distal die kompletten Wurzelflächen durchleuchtet und unter dem Mikroskop betrachtet. Diese Methodik ermöglichte die Detektion von Mikrorissen, die gegebenenfalls nicht komplett durchgängig

sind. Nachteil dieser Technik ist jedoch, dass man keine Aussage darüber treffen kann, wie tief sich die Mikrorisse ausdehnen. Hingegen können bei Zahnhartschnitten Mikrorisse, die sich nur auf der Wurzeloberfläche befinden, schlechter darstellen werden.

6.7 Aufbereitungszeiten der Feilensysteme

Nach *Hülsmann et al.* ist die Aufbereitungszeit sowohl abhängig von der gewählten Instrumentierungstechnik und der Anzahl der genutzten Feilen, als auch von der Erfahrung des ausführenden Behandlers [43]. In dieser Studie wurde für die Aufbereitung mit dem *S-ApeX*-System signifikant mehr Zeit benötigt als für die die Instrumentierung mit den anderen drei Systemen. Grund hierfür ist die hohe Feilenzahl des Systems und die aufwendigere Step-back-Technik. Bei höherer Feilenzahl sind die Spülzeit und die Zeit für das Umstecken der Feilen automatisch höher, woraus die längere Gesamtaufbereitungszeit resultiert. Die kürzeste Aufbereitungsdauer wurde, da es nur der Anwendung einer Feile bedarf, beim *Reciproc*-System detektiert (79 Sekunden). Dieses Resultat entspricht den Ergebnissen von *Bürklein* und *Schäfer* [14]. Wenn auch nicht signifikant, aber dennoch deutlich ist der Unterschied zur Gesamtaufbereitungszeit des *GT-Series-X*-System (168 Sekunden), dabei fällt eine große Spannweite der Daten auf. Dies könnte möglicherweise mit der Feilengeometrie begründet werden. Die Feilen weisen Radial lands auf und sind dadurch mitunter weniger stark schneidend als die anderen untersuchten Instrumente. Diese Eigenschaft macht in Einzelfällen erneutes Rekapitulieren und eine Zwischenspülung notwendig, bis die gewünschte Arbeitslänge erreicht ist. Zusätzlich ist bei dreieckigem Instrumentenquerschnitt der Abtransport von Dentinspänen aufgrund des kleineren Spanraumes schwieriger als z.B. bei S-förmigen Querschnitten (z.B. *Reciproc* und *Mtwo*). Nach *Scheffé*-Test signifikant langsamer als das *Reciproc*- und das *GT-Series-X*-System arbeitet das *Mtwo*-System, welches jedoch im Vergleich zu *GT-Series X* auch 4 Feilen mehr umfasst. Bezogen auf die Spüldauer liegen eventuelle Schwankungen der Werte darin begründet, dass zum Teil bei persistierenden Dentinspänen im Kanal länger gespült werden musste um diese sicher entfernen zu können. *Bürklein et al.* raten wegen der kürzeren Aufbereitungszeiten bei Ein-Feilen-Systemen und der damit einhergehenden reduzierten Spülzeit zur Verwendung einer größeren Menge an Spülflüssigkeit

und einer zusätzlichen Aktivierung [15]. Hinsichtlich der Beurteilung der Aufbereitungszeit der Systeme muss jedoch beachtet werden, dass dies in dieser Arbeit, in deren Tendenz zur Mikrorissbildung beurteilt wurde, nur einen Nebenaspekt darstellt.

7 Klinische Schlussfolgerung

Die vorliegende Studie zeigt, dass die maschinelle Aufbereitung mittels Ni-Ti-Feilen Mikrorisse im Dentin erzeugt. Wenn auch das Ausmaß unterschiedlich und vermutlich von Feilengeometrie und Konizität der Instrumente abhängig ist. Im Rahmen dieser Arbeit ließen sich nur oberflächlich entstandene Risse darstellen, wobei man keine Aussage darüber treffen konnte wie weit sich diese ins Wurzelkambium fortsetzen. Auch andere Arbeitsgruppen kamen zu dem Schluss, dass Maßnahmen wie Wurzelkanalaufbereitung, Wurzelkanalfüllung und auch Revisionen zu Rissbildungen im Dentin führen [3,65,85,86,87]. Die Frage nach der Konsequenz dieser Mikrorisse bleibt jedoch weiterhin offen. In nachfolgenden Studien muss geprüft werden inwiefern sich weitere endodontische Behandlungsschritte und auch Kaubelastung oder Überkronung auf die betreffenden Zähne auswirken und ob und wann es möglicherweise zum Auftreten einer VRF kommt. Nach Wilcox et. al. entstehen VRFs hauptsächlich ab einer Kanalerweiterung ab 40% [104]. Die Vermutung liegt nahe, dass aus oberflächlichen Mikrorissen unter extremer Kaubelastung oder in Zusammenhang mit Bruxismus VRFs entstehen können. Daher ist es essentiell ein Aufbereitungssystem zu wählen, welches effizient arbeitet und gleichzeitig schonend vorgeht um Rissbildungen zu vermeiden. So könnten die Erfolgchancen endodontischer Behandlungen gesteigert werden. Gleichzeitig ist für den Behandler sicherlich auch die für die Aufbereitung benötigte Zeit und somit auch die Wirtschaftlichkeit eines Instrumentensystems von Interesse. In dieser Studie zeigte sich, dass beispielsweise das Ein-Feilen-System *Reciproc* wesentlich schneller arbeitete als die 3 weiteren Systeme. Die Vermeidung einer VRF ist imminent wichtig, da bei Auftreten einer vertikalen Fraktur der Wurzel der einzig noch mögliche Behandlungsschritt die Extraktion des betroffenen Zahnes ist. Eine Studie von *Touré et al.* zeigte, dass in 13,4 % der Fälle eine VRF der Grund für die Entfernung eines endodontisch behandelten Zahnes war [100]. Damit sind vertikale Wurzelfrakturen neben parodontalen Erkrankungen und endodontischem Misserfolg ein nicht zu vernachlässigender Faktor in der Erhaltung endodontisch behandelter Zähne. Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie kann das *GT-Series X*-System als das substanzschonendste System zur Aufbereitung gerader Wurzelkanäle angesehen werden. Aber auch das *Reciproc*-System arbeitete trotz Nutzung nur einer Feile

effizient und schnell und induzierte nur unwesentlich mehr Risse, wobei die strikte Einhaltung der empfohlenen Feilenbewegung und die schrittweise Instrumentierung nach apikal unbedingt erforderlich sind.

8 Englische Zusammenfassung

Summary:

Abstract: Root dentin micro-cracks after root canal instrumentation with four different NiTi-systems

Aim of the study:

The aim of this present study was to evaluate the formation of micro-cracks in root dentin caused by root canal instrumentation with four different Ni-Ti-Systems.

Methods:

Sixty human single-rooted teeth with straight root canals and mature apices were randomly assigned to four groups (n=15). Preparation of access cavities of the experimental teeth was followed by coronal reduction to 15 mm, resulting in a working length of 14 mm. Consequently, gradual preparation of root canals with assigned systems was carried out. The following four NiTi-systems were used: *GT-Series X*, *Reciproc*, *Mtwo* and *S-ApeX*. Prior to instrumentation and after each file, microphotographs of the roots were taken for the mesial and distal aspect. Micro-cracks were identified and micro-crack length were measured and cumulated.

Results:

Each of the four instruments tested induced formation of micro-cracks in root dentin, albeit to varying degrees. The crack growth from the initial to the next following file was significant ($p \leq 0.05$). The highest total crack length was measured in teeth treated with the *S-ApeX*-system, whereas the *GT-Series X*-system induced lowest total crack length, but the differences between both instrument systems were not significant (apical: $p=0.64$, middle: $p=0.183$, coronal: $p=0.298$). With regard to the time required for preparation *Reciproc* and *GT-Series X* were significantly faster than *Mtwo* and *S-ApeX*.

Discussion:

Regardless the instrument motion all four systems induced micro-cracks in root dentin. As possible factors of influence, the cross-sectional design, the torque and the pre-treatment of NiTi files may be discussed.

Conclusion:

Lowest total crack length was detected after instrumentation with the *GT-Series X*-system. The *Reciproc*-system induced only slightly more cracks except of the coronal level of the root. Both systems were significantly faster than *Mtwo* and *S-ApeX*. The clinical relevance of micro-cracks is still uncertain, but they may be regarded as possible factors for the genesis of vertical root fractures occurring later on. Therefore, more studies are necessary to elucidate this question more in detail.

9 Deutsche Zusammenfassung

Problemstellung und Zielsetzung:

Die Gründe für das Scheitern einer endodontischen Behandlung sind vielschichtig und nicht immer einfach zu eruieren. Häufige Ursache ist das Auftreten einer vertikalen Wurzelfraktur, die nicht selten mit einer langen Leidensgeschichte des Patienten einhergeht, da diese oft aufgrund fehlender klinischer Zeichen schwer zu diagnostizieren ist. Nach Diagnose einer vertikalen Wurzelfraktur bleibt bis auf wenige Ausnahmen nur die Möglichkeit der Extraktion. Es bleibt die Frage, wie es zu diesen Frakturen kommt und wie man sie verhindern kann um die Verweildauer jedes endodontisch behandelten Zahnes in der Mundhöhle des Patienten zu verlängern. Ziel unserer Studie war es die Mikrorissbildung im Wurzelentin nach Aufbereitung mit 4 verschiedenen NiTi-Systemen zu untersuchen und damit ggf. das Auftreten unerwünschter Wurzelfrakturen zu erklären.

Material und Methode:

60 humane, einwurzelige Zähne mit geradem Wurzelverlauf und abgeschlossenem Wurzelwachstum wurden randomisiert auf 4 Gruppen (n=15) aufgeteilt. Nach Trepanation der Versuchszähne erfolgte ihre koronale Reduktion auf 15 mm, woraus sich eine einheitliche Arbeitslänge von 14 mm ergab. Es schloss sich die schrittweise Aufbereitung der Zähne mit dem zugeteilten System an. Verwendet wurden *GT-Series X*, *Mtwo*, *Reciproc* und das *S-ApeX*-System. Vor Aufbereitungsbeginn und nach jeder Feile erfolgte eine mikrofotographische Dokumentation jeweils von mesial und distal. Das entstandene Bildmaterial wurde standardisiert ausgewertet. Für die statistische Berechnung der Daten wurde das Softwarepaket SPSS 19.0 verwendet.

Ergebnisse:

Jedes der untersuchten Systeme induzierte die Bildung von Mikrorissen im Wurzelentin, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß. Die Risszunahme von der ersten zu den nächst folgenden Feilen war signifikant ($p=0,05$). Die höchste Gesamtrisslänge wurde bei mit dem *S-ApeX*-System aufbereiteten Zähnen gemessen, wohingegen das *GT-Series X*-System die wenigsten Mikrorisse induzierte. Bezüglich des Zeitaufwandes für die Aufbereitung waren *Reciproc* und

GT-Series X signifikant schneller als *Mtwo* und *S-ApeX*.

Diskussion:

Unabhängig von der Antriebsart induzierten alle vier Systeme Mikrorisse im Wurzelkollum. Als mögliche Einflussfaktoren können die Feilengeometrie, das Drehmoment und die Vorbehandlung der NiTi-Feilen gesehen werden.

Schlussfolgerung:

Nach Aufbereitung mit dem *GT-Series X*-System wurde die geringste Gesamtrisslänge detektiert, sodass dieses System basierend auf den Ergebnissen dieser Studie als das substanzschonendste der vier Systeme bezeichnet werden kann. Aber auch das *Reciproc*-System induzierte bis auf koronal nur unwesentlich mehr Risse. Beide Systeme waren in der Aufbereitung signifikant schneller als *Mtwo* und *S-ApeX*. Weiterhin stellt sich jedoch auch die Frage nach der Konsequenz der Mikrorisse und nach möglichen Einflussfaktoren, die gegebenenfalls zum Entstehen einer VRF beitragen. Um dieses Thema näher beleuchten zu können sind weitere Studien notwendig, die an diese Arbeit angeschlossen werden.

10 Literaturverzeichnis

1. **American Association of Endodontists (AAE):**
http://www.aae.org/uploadedFiles/Publications_and_Research/Endodontics_Colleagues_for_Excellence_Newsletter/CrackedTeethECFE_OnlineVersion.pdf
2. **Abou-Rass M.** Crack lines: The precursors of tooth fractures – their diagnosis and treatment. Quintessence 1983;14:437-447.
3. **Al-Hadlaq SM, Aljarbou FA, AlThumairy RI.** Evaluation of cyclic flexural fatigue of M-wire nickel-titanium rotary instruments. J Endodont 2010;36:305-307.
4. **Andersen M, Lund A, Andreasen JO, Andreasen FM.** In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochloride. Endod Dent Traumatol 1992;8,104-108.
5. **Azar MR, Mokhtare M.** Rotary Mtwo system versus manual K-file instruments: efficacy in preparing primary and permanent molar root canals. Indian J Dent Res 2011;22:363.
6. **Bahcall J, Barss J.** Orasopic visualization technique for conventional and surgical endodontics. Int Endod J 2003;36:441-453.
7. **Baumgartner JC, Cuenin PR.** Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation, J Endodont 1992;18:605-612.
8. **Bier CA, Shemesh H, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR, Wu MK.** The ability of different nickel-titanium rotary instruments to induce dentinal damage during canal preparation. J Endodont 2009;35:236-238.
9. **Blum JY, Machtou P, Micallef JP.** Analysis of forces developed during obturations. Wedging effect: Part II. J Endodont 1998;24:223-228.
10. **Bonaccorso A, Cantatore G, Condorelli GG, Schäfer E, Tripi TR.** Shaping ability of four nickel-titanium rotary instruments in simulated S-shaped canals. J Endodont 2009;35:883-886.

11. **Buchanan LS.** The new GT Series X rotary shaping system: objectives and technique principles. *Dent Today* 2008;27:70-74.
12. **Bürklein S, Hiller C, Huda M, Schäfer E.** Shaping ability and cleaning effectiveness of Mtwo versus coated and uncoated EasyShape instruments in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 2011;44:447-457.
13. **Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schäfer E.** 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* 2012;45:449-461.
14. **Bürklein S, Schäfer E.** Apically extruded debris with reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems. *J Endodont* 2012;38:850-852.
15. **Bürklein S, Tsotsis P, Schäfer E.** Incidence of dentinal defects after root canal preparation: reciprocating versus rotary instrumentation. *J Endodont* 2013;39:501-504.
16. **Culjat MO, Singh RS, Brown ER, Neurgaonkar RR, Yoon DC, White SN.** Ultrasound crack detection in simulated human tooth. *Dentomaxillofac Radiol* 2005;34:80-85.
17. **Cunningham WT, Martin H, Forrest WR.** Evaluation of root canal debridement by the endosonic ultrasonic synergistic system. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1982;53:401-404.
18. **Cunningham WT, Joseph SW.** Effect of temperature on the bactericidal action of sodium hypochlorite endodontic irrigant. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1980;50:569-571.
19. **da Cunha Peixoto IF, Pereira ES, da Silva JG, Viana AC, Bueno VT, Bahia MG.** Flexural fatigue and torsional resistance of ProFile GT and ProFile GT series X instruments. *J Endodont* 2010;36:741-744.
20. **DGZMK und DGZ.** Gemeinsame Stellungnahme zum Thema Wurzelkanal-

spülungen 2006.

21. **DGZMK.** Stellungnahme zum Thema Wurzelkanalaufbereitungen 2001.
22. **Doyon GE, Dumsha T, Fraunhofer JA.** Fracutre resistance of human root dentin exposed to intracanal calcium hydroxide. *J Endodont* 2005;31:12-15.
23. **Edlund M, Nair MK, Nair UP.** Detection of vertical root fractures by using cone-beam computed tomography: a clinical study. *J Endodont* 2011; 37:768-772.
24. **Esposito P, Cunningham CJ.** A comparison of canal preparation with nickel-titanium and stainless steel instruments. *J Endodont* 1995;21:173-176.
25. **European Society of Endodontology.** Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 2006;39:921-930.
26. **Evanov C, Liewehr F, Buxton, TB, Joyce AP.** Antibacterial efficacy of calcium hydroxide and chlorhexidine gluconate irrigants at 37°C and 46°C. *J Endodont* 2004;30:653–657.
27. **Fava LRC:** The Double-flared technique: An alternative for biomechanical preparation. *J Endodont* 1983;9:76-80.
28. **Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L, Marchionni S, Breschi L, Malagnino VA, Prati C.** SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 2004;37:832-839.
29. **Gambarini G, Grande NM, Plotino G, Somma F, Garala M, De Luca M, Testarelli L.** Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium instruments produced by new manufacturing methods. *J Endodont* 2008;34:1003-1005.
30. **Garberoglio R, Brännström M.** Scanning electron microscopic investigation of human dentinal tubules. *Arch Oral Biol* 1976;21:355-362.

31. **Garip Y, Günday M.** The use of computed tomography when comparing nickel–titanium and stainless steel files during preparation of simulated curved canals. *Int Endod J* 2001;34:452-457.
32. **Gavini G, Caldeira CL, Akisue E, Candeiro GT, Kawakami DA.** Resistance to flexural fatigue of Reciproc R25 files under continuous rotation and reciprocating movement. *J Endodont* 2012;38:684-687.
33. **Goerig AC, Michelich RJ, Schultz HH.** Instrumentation of root canals in molar using the step-down technique. *J Endodont* 1982;8: 550-554.
34. **Gomes BPFA, Ferraz CCR, Vianna ME, Berber VB, Teixeira FB, Souza-Filho FJ.** In vitro antimicrobial activity of several concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate in the elimination of *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J* 2001;34:424-428.
35. **Hannig C, Dullin C, Hülsmann M, Heidrich G.** Three-dimensional, nondestructive visualization of vertical root fractures using flat panel volume detector computer tomography: an ex vivo in vitro case report. *Int Endod J* 2005;38:904-911.
36. **Hassan B, Metska ME, DDS, Ozok AR, van der Stelt P, Wesselink PR.** Detection of vertical root fractures in endodontically treated teeth by a Cone Beam Computed Tomography scan. *J Endodont* 2009;35:719-722.
37. **Haueisen H, Ratka-Krüger P, Heidemann D.** Diagnostik vertikaler Wurzelfrakturen endodontisch behandelte Zähne. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999;54:249-252.
38. **Heidemann D.** Endodontie - Praxis der Zahnheilkunde. Urban & Fischer Verlag 2001; 4. Auflage, München-Jena.
39. **Hin ES, Wu MK, Wesselink PR, Shemesh H.** Effects of Self-Adjusting File, Mtwo, and ProTaper on the Root Canal Wall. *J Endodont* 2013; 39:262-264.
40. **Holcomb JQ, Pitts DL, Nicholls JI.** Further investigation of spreader loads required to cause vertical root fracture. *J Endodont* 1987;13:277-284.

41. **Huang D, Swanson EA, Lin CP.** Optical coherence tomography. *Science* 1991;254:1178-1181.
42. **Hülsmann M, Herbst U, Schäfer E.** Comparative study of root-canal preparation using Lightspeed and Quantec SC rotary NiTi instruments, *Int Endod J* 2003;36:748-756.
43. **Hülsmann M, Peters OA, Dummer MH.** Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endod Topics* 2005;19:30-76.
44. **Ingle JI.** A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1961;14:83-91.
45. **Iwamoto N, Ruse ND.** Fracture toughness of human dentin. *J Biomed Mater Res A* 2003;66:507-512.
46. **Jacob S.** FAMDENT PRACTICAL DENTISTRY HANDBOOK. 2006; Vol. 6+4: April – Juni.
47. **Jainaen A, Palamara JEA, Messer HH.** Effect of dentinal tubules and resin-based endodontic sealers on fracture properties of root dentin. *Dent Mater* 2009;25:73-81.
48. **Kahler B, Moule A, Stenzel D.** Bacterial contamination of cracks in symptomatic vital teeth. *Aust Endod J* 2000;26:115-118.
49. **Kaitsas V, Signore A, Fonzi L, Benedicenti S, Barone M.** Effects of Nd: YAG laser irradiation on the root canal wall dentin of human teeth: a SEM study. *Bull Group Int Rech Sci Stomatol Odontol* 2001;43:887-892.
50. **Kajan ZD, Taromsari M.** Value of cone beam CT in detection of dental root fractures. *Dentomaxillofac Radiol* 2012;41:3-10.
51. **Kell T, Azarpazhooh A, Peters OA, El-Mowafy O, Tompson B, Basrani B.** Torsional profiles of new and used 20/.06 GT series X and GT rotary endodontic instruments. *J Endodont* 2009;35:1278-1281.
52. **Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, Lee W.** Cyclic

- fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endodont* 2012;38:541-544.
- 53. Kramer E, Robra BP, Walther W, Heners M.** Vertikale Wurzelfrakturen an endodontisch behandelten Zähnen. *Dtsch Zahnärztl Z* 2008;63:330-337.
- 54. Landrigan MD, Flatley JC, Turnbull TL, Kruzic JJ, Ferracane JL, Hilton TJ, Roeder RK.** Detection of dentinal cracks using contrast-enhanced micro-computed tomography. *J Mater Mech Behav Biomed* 2010;3:223-227.
- 55. Layton CA, Marshall JG, Morgan LA, Baumgartner JC.** Evaluation of cracks associated with ultrasonic root-end preparation. *J Endodont* 1996;22:57-60.
- 56. Lehmann KM, Hellwig E, Wenz HJ.** Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde. Deutscher Zahnärzte Verlag 2012:42-43.
- 57. Lee JH, Park JB, Andreasen GF, Lakes RS.** Thermomechanical study of NiTi alloys. *J Biomed Mater Res* 1988;22:573-588.
- 58. Liu R, Kaiwar A, Shemesh H, Wesselink PR, Hou B, Wu MK.** Incidence of apical root cracks and apical dentinal detachments after canal preparation with hand and rotary files at different instrumentation lengths. *J Endodont* 2013;39:129-132.
- 59. Llana-Puy MC, Forner-Navarro L, Barbero-Navarro I.** Vertical root fracture in endodontically treated teeth: a review of 25 cases. *Oral Surg Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2001;92:553-555.
- 60. Loubele M, Bogaerts R, Van Dijck E.** Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *Eur J Radiol* 2009;71:461-468.
- 61. Machado ME, Sapia LA, Cai S, Martins GH, Nabeshima CK.** Comparison of two rotary systems in root canal preparation regarding disinfection. *J Endodont* 2010;36:1238-1240.

- 62. Machian GR, Peters DD, Lorton L.** The comparative efficiency of four types of endodontic instruments. *J Endodont* 1982;8:398-402.
- 63. Mehl C, Ludwig K, Steiner M, Kern M.** Fracture strength of prefabricated all-ceramic posterior inlay-retained fixed dental prostheses. *Dent Mater* 2010;26:67-75.
- 64. Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R.** The self-adjusting file (SAF). Part 1: Respecting the root canal anatomy- a new concept for endodontic files and its implementation. *J Endodont* 2010;6: 679-690.
- 65. Morfis A.S.** Vertical root fractures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1990; 69:631-635.
- 66. Morgan LF, Montgomery S.** An evaluation of the crown-down pressure-less technique. *J Endodont* 1984;10:491-498.
- 67. Muselmani B, Glockmann E, Sigusch BW.** Die instrumentelle Aufbereitung der Wurzelkanäle- manuell oder maschinell? *Zahnärztl Welt* 2008;117:560-568.
- 68. Özer SY, Ünlü G, Değer Y.** Diagnosis and treatment of endodontically treated teeth with vertical root fracture: three case reports with two-year follow-up. *J Endodont* 2011;37:97-102.
- 69. Pedullà E, Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Rapisarda E.** Influence of continuous or reciprocating motion on cyclic fatigue resistance of 4 different nickel-titanium rotary instruments. *J Endodont* 2013;39:258-261.
- 70. Peters OA, Boessler C, Paque F.** Root canal preparation with a novel nickeltitanium instrument evaluated with micro-computed tomography: canal surface preparation over time. *J Endodont* 2010;36:1068-1072.
- 71. Pereira ESJ, Peixoto IFC, Viana ACD, Oliveira II, Gonzalez BM, Buono VTL, Bahia MGA.** Physical and mechanical properties of a thermo-mechanically treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments. *Int Endod J* 2012;45: 469-474.

- 72. Pertot WJ, Camps J, Damiani MG.** Transportation of curved canals prepared with canal master U, canal master U niti, and stainless steal K-type files. *Med Oral Pathol Oral radiol Endod*1995;79; 504-509.
- 73. Pitts DL, Natkin E.** Diagnosis and treatment of vertical root fractures. *J Endodont* 1983;9:338–346.
- 74. Plotino G, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G.** Cyclic fatigue of Reciproc and WaveOne reciprocating instruments. *Int Endod J* 2012;45:614-618.
- 75. Rapisarda E, Tripi TR, Bonaccorso A.** [Thermoelastic analysis of nickel-titanium endodontic files]. *Minerva Stomatol* 2000;49: 93-99.
- 76. Roane J, Sabala C, Duncanson M.** The “balanced force” concept for instrumentation of curved canals. *J Endodont* 1985;11: 203-211.
- 77. Rödiger T, Hülsmann M, Nordmeyer S, Drebenstedt S.** Grundlagen der modernen Endodontie. Spitta Verlag 2009, Balingen.
- 78. Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S.** Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *Int Endod J* 2010;43:200-209.
- 79. Roggendorf MJ, Frankenberger R.** Maschinelle Nickel-Titan-Systeme im Überblick. *Quintessenz* 2012;63:31-37.
- 80. Rud J, Omnell KA.** Root fractures due to corrosion. *Scand J Dent Res* 1970;78: 397–403.
- 81. Schäfer E.** Root canal instruments for manual use. A review. *Endod Dent Traumatol* 1997;13:51-64.
- 82. Schäfer E, Erler M, Dammaschke T.** Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J* 2006;39:196-202.
- 83. Schäfer E, Erler M, Dammaschke T.** Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 2. Cleaning

- effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 2006;39:203-212.
- 84. Shemesh H, van Soest G, Wu MK, van der Sluis LW, Wesselink PR.** The ability of optical coherence tomography to characterize the root canal walls. *J Endodont* 2007;33:1369-1373.
- 85. Shemesh H, Bier CA, Wu MK, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR.** The effects of canal preparation and filling on the incidence of dentinal defects. *Int Endod J* 2009;42: 208-213.
- 86. Shemesh H, Wesselink PR, Wu MK.** Incidence of dentinal defects after root canal filling procedures. *Int Endod J* 2010;43: 995-1000.
- 87. Shemesh H, Roeleveld AC, Wesselink PR, Wu MK.** Damage to root dentin during retreatment procedures. *J Endodont* 2011;37:63-66.
- 88. Shemesh H, Cristescu RC, Wesselink PR, Wu MK.** The use of cone-beam computed tomography and digital periapical radiographs to diagnose root perforations. *J Endodont* 2011;37: 513-516.
- 89. Short JA, Morgan LA, Baumgartner C.** A comparison of canal centering ability of four instrumentation techniques. *J Endodont* 1997;23:503-507.
- 90. Sim TP, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K.** Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *Int Endod J* 2001;34: 120-132.
- 91. Solomonov M, Paqué F, Fan B, Eilat Y, Berman LH.** The challenge of C-shaped canal systems: A comparative study of the Self-adjusting file and ProTaper. *J Endodont* 2012;38:209-214
- 92. Sonntag D, Peters OA.** Effect of prion decontamination protocols of nickel-titanium rotary surfaces. *J Endodont* 2007;33:442-446.
- 93. Sundqvist G.** Taxonomy, ecology, and pathogenicity of the root canal flora. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1994;78:522–530.
- 94. Tamse A, Fuss Z, Lustig J, Ganor Y, Kaffe I.** Radiographic features of vertically fractured, endodontically treated maxillary premolars. *Oral Surg*

Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 1999;88: 348-352.

- 95. Tatsuta CT, Morgan LA, Baumgartner JG, Adey JD.** Effect of calcium hydroxide and four irrigation regimens on instrumented and uninstrumented canal wall topography. *J Endodont* 1999;25: 93-98.
- 96. Telli C, Gülkan P, Raab W.** Additional studies on the distribution of stresses during vertical compaction of gutta-percha in the root canal. *Br Dent J* 1999;187: 32-37.
- 97. Tepel J, Schäfer E, Hoppe W.** Properties of endodontic hand instruments used in rotary motion. Part 3. Resistance to bending and fracture. *J Endodont* 1997;23:141-145.
- 98. Testori T, Badino M, Castagnola M.** Vertical root fractures in endodontically treated teeth: a clinical survey of 36 cases. *J. Endodont* 1993;19: 87-91.
- 99. Thompson SA.** An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J* 2000;33:297-310.
- 100. Touré B, Faye B, Kane AW, Lo CM, Niang B, Boucher Y.** Analysis of reasons for extraction of endodontically treated teeth: a prospective study. *J Endodont* 2011; 37: 1012-1015.
- 101. Uzunoglu E, Aktemur S, Uyanik MO, Durmaz V, Nagas E.** Effect of ethylenediaminetetraacetic acid on root fracture with respect to concentration at different time exposures. *J Endodont* 2012;38:1110-1113.
- 102. Varela-Patiño P, Ibañez-Párraga A, Rivas-Mundiña B, Cantatore G, Otero XL, Martín-Biedma B.** Alternating versus continuous rotation: a comparative study of the effect on instrument life. *J Endodont* 2010;36: 157–159.
- 103. Walia HM, Brantley WA, Gerstein H.** An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endodont* 1988;14: 346-351.

- 104. Wilcox LR, Roskelley C, Sutton T.** The relationship of root canal enlargement to finger-spreader–induced vertical root fracture. *J Endodont* 1997;23:533-534.
- 105. Wolfart S, Ludwig K, Uphaus A, Kern M.** Fracture strength of all-ceramic posterior inlay-retained fixed partial dentures. *Dent Mater* 2007;23:1513–1520.
- 106. Wright HM Jr, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, Waller J, Pashley DH.** Identification of resected root-end dentinal cracks: a comparative study of transillumination and dyes. *J Endodont* 2004;30:712-715.
- 107. Yamashita JC, Tanomaru Filho M, Leonardo MR, Rossi MA, Silva LAB.** Scanning electron microscopy study of the cleaning ability of chlorhexidine as a root-canal irrigant. *Int Endod J* 2003;36: 391-394.
- 108. Yared G.** Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J* 2008;41:339–344.
- 109. Yared G.** Canal preparation with only one reciprocating instrument without prior hand filing: a new concept: http://www.vdw-reciproc.de/images/stories/pdf/GY_Artikel_en_WEB.pdf (2011)
- 110. Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan C.** Dentinal microcrack formation during root canal preparations by different NiTi rotary instruments and the Self-Adjusting File. *J Endodont* 2012;38:232-235.
- 111. Youssefzadeh S, Gahleitner A, Dorffner R, Bernhart T, Kainberger FM.** Dental vertical root fractures: value of CT in detection. *Radiology* 1999;210: 545-549.
- 112. Zehnder M, Schmidlin P, Sener B, Waltimo T.** Chelation in root canal therapy reconsidered. *J Endodont* 2005;31:817-820.

11 Abkürzungsverzeichnis:

| Abkürzung | Begriffserklärung |
|-----------|--|
| Abb. | Abbildung |
| AL | Arbeitslänge |
| CBCT | Cone beam computed tomography |
| CDPT | Crown-down- pressureless Technik |
| CHX | Chlorhexidinglukonat |
| CT | Computertomographie |
| DGZ | Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung |
| DGZMK | Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund - und Kieferheilkunde |
| EDTA | Ethylenediaminetetraaceticacid |
| ESE | European Society of Endodontology |
| FD-VCT | Flat panel volume detector computertomography |
| HB | Brinellhärte |
| ISO | International Organization for Standardization |
| Mm | Millimeter |
| MW | Mittelwert |
| m% | Massenprozent |
| µm | Mikrometer |
| NaCl | Natriumchlorit |
| NaOCl | Natriumhypochlorit |
| NiTi | Nickel-Titan |
| NiTiNOL | Nickel-Titan-Naval-Ordnance- Laboratory |
| N/cm | Newton/Zentimeter |
| OCT | Optische Kohärenztomographie |
| SD | Standard deviation |

| | |
|-------|------------------------|
| Tab. | Tabelle |
| U/Min | Umdrehungen/Minute |
| VRF | Vertical root fracture |
| WSR | Wurzelspitzenresektion |
| # | Größe |
| ° | Grad |
| % | Prozent |

12 Materialliste

| Artikel | Hersteller |
|--|-----------------------|
| Vorbereitung der Versuchszähne | |
| Thymol | Merck, Darmstadt |
| Diamantbohrer LOT 618021 | Komet |
| Diamanttrennscheibe/ 22 mm | Scheu |
| Scaler ST SU 204 | Hu-Friedy |
| INTRAMatic Lux 2 Winkelstück | KaVo |
| INTRAMatic Lux 3 Winkelstück | KaVo |
| Messlehre | KaVo |
| Miniatur-Zahnreinigungsbürstchen (Nylon) | pluradent |
| Herstellung der Silikonformen+ des simulierten Parodonts | |
| Silaplast FUTUR LOT 13041 | DETAX |
| Catp universal FUTUR PLUS LOT 130304 | DETAX |
| Silasoft direct LOT 14204 | DETAX |
| Automix 10:1 | DETAX |
| Skalpell No. 15 LOT 03039690 | Feather, Köln |
| Permanent Marker Lumocolor Art-Nr: 317-9 | Staedler, Nürnberg |
| Gips : Octa Dur | Hereaus Kulzer, Hanau |
| Einmalspritzen Luer Solo 2ml LOT 2D16048 | Braun, Melsungen |
| Aqua B Ecotainer LOT 0463A102 | Braun, Melsungen |
| Aufbereitung der Versuchszähne | |
| Spülkanülen: Endoneedle | Dr. J. Buquet |

| | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| LOT 11K06 | |
| Hypochlorit | Speiko, Münster |
| C-Pilotes-Endfeilen | VDW, München |
| LOT 1005000790 | |
| Reciproc #40/.06 | VDW, München |
| LOT 1102000994 | |
| Mtwo | VDW, München |
| LOT 113002797 #10/.04 | |
| LOT 1103001773 #15/.05 | |
| LOT 1102001831 #20/.06 | |
| LOT 1103000443 #25/.05 | |
| LOT 1103001774 #30/.05 | |
| LOT 1104001165 #35/.04 | |
| LOT 1103000438 #40/.04 | |
| VDW-Silver-Reciproc Endomotor | VDW, München |
| EndoPilot | Schlumbohm, Pinneberg |
| GT-Series X | Dentsply Maillefer, Ballaigues (CH) |
| LOT 021909548 #20/.04 | |
| LOT 102908192 #30/.04 | |
| LOT 1047116701 #40/.04 | |
| S-ApeX | FKG Dentaire |
| Safety-Tip | |
| LOT 17782 # 35 | |
| LOT 17965 # 20 / 50/ 60 | |
| LOT 17349 # 25 | |
| LOT17055 # 30 | |
| LOT 18068 # 70 / 80 | |
| LOT 17396 # 40 | |
| Fotodokumentation | |
| Digitalmikroskopkamera | Leica, Solms |
| DFC 420 | |
| Petrischale | |
| Blaulichtfilter | |

35KH2HF Generator für Leuchtstoff
röhren für Mikroskop
RST: P0023804

OPTOMETRON, Ismaning

Mikroskop

Leica, Solms

13 Verzeichnis der akademischen Lehrer

Meine akademischen Lehrer in Marburg waren die Damen und Herren Professoren und Dozenten:

Arweiler, Aumüller, Cetin, Coca, Flores-de-Jacoby, Frankenberger, Gente, Jablonsky-Momeni, Koolmann, Korbmacher-Steiner, Lotzmann, Löffler, Mengel, Mittag, Pieper, Ramaswamy, Roggendorf, Sonntag, Stachniss, Steiniger, Stoll, Wennemuth.

14 Danksagung

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Roland Frankenberger möchte ich herzlich für die Überlassung des Dissertationsthemas und die zuverlässige und nette Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit danken.

Herrn OA Dr. Matthias Roggendorf möchte ich für seine Ratschläge, Ideen und für seinen großen Einsatz danken. Danke, dass du immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hattest. Du warst eine sehr große Hilfe.

Meinen Eltern danke ich für ihre großzügige und liebevolle Unterstützung, die es mir ermöglicht hat das Zahnmedizinstudium zu beenden. Mama, dir gilt ein besonderer Dank für die Jagd nach Komma-Fehlern.

Meinem Freund Niklas Hartmann. Danke für deine Liebe und Unterstützung, fürs Suchen nach Rechtschreib-Fehlern und dein unermüdliches Motivieren.

