

Aus der Abteilung Präventive Zahnmedizin, Parodontologie
und Kariologie

(Komm. Direktor: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann)

im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Die Effizienz von D-RaCe- und ProTaper-Universal-Retreatment-Nickel-Titan-
Instrumenten und Handfeilen bei der Entfernung von Guttapercha aus
gekrümmten Wurzelkanälen**

Eine Micro-Computertomografie-Studie

INAUGURAL – DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

für Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Tim Hausdörfer

aus

Suhl

Göttingen 2012

Dekan:	Prof. Dr. med. M. P. Schön
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann
2. Berichterstatter/-in:	Prof. Dr. med. Dr. med. dent. K. Wiese
3. Berichterstatter/-in:	Priv.-Doz. Dr. med. dent. N. Gersdorff
Tag der mündlichen Prüfung:	12.11.2012

Die vorliegende Promotionsschrift war die Grundlage für folgende Veröffentlichung:

Rödig T, Hausdörfer T, Konietschke F, Dullin C, Hahn W, Hülsmann M (2012):

Efficacy of D-RaCe and ProTaper Universal Retreatment NiTi instruments and hand files in removing gutta-percha from curved root canals -a micro-computed tomography study

Int Endod J 45, 580-589

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Literaturübersicht.....	3
2.1. Ziele der Wurzelkanalbehandlung.....	3
2.2. Prognose und Misserfolg endodontischer Behandlungen	3
2.3. Wurzelkanalfüllung.....	5
2.3.1 Die kalte laterale Kompaktion	6
2.4. Revision	6
2.4.1. Ziele der Revision	6
2.4.2. Indikation für Revisionen.....	7
2.4.3. Prognose von Revisionsbehandlungen.....	8
2.5. Techniken zur Entfernung der Guttapercha	9
2.5.1. Handinstrumente und Nickel-Titan-Instrumente.....	9
2.5.2. D-RaCe.....	12
2.5.3 ProTaper und ProTaper Universal Retreatment	14
2.5.4. Anwendung von Lösungsmitteln	17
2.6. Beurteilung der Effektivität und Sicherheit von Revisionstechniken	18
2.7 Die Micro-Computertomografie	19
2.7.1. Aufbau und Funktionsweise des Micro-CT	19
2.7.2. Das Micro-CT in der Endodontologie	22
3. Ziel der Untersuchung	24
4. Material und Methoden.....	25
4.1. Versuchsaufbau	25
4.2. Zahnauswahl.....	26
4.3. Präparationsprotokoll	29
4.4. Wurzelkanalfüllung.....	30
4.5. Der Micro-CT Scan	31

4.6. Volumetrie	34
4.7. Revision	36
4.8. Statistische Auswertung	39
5. Ergebnisse	40
5.1. Auswertung der Gruppeneinteilung	40
5.2. Deskriptive Angaben	41
5.3. Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)	41
5.4 Zeit vom Erreichen der Arbeitslänge bis zum Ende der Revision (T2)	43
5.5. Zeit für die gesamte Revision (T-gesamt)	45
5.6. Dentinabtrag während der Revision	47
5.7. Wurzelkanalfüllungsreste nach der Revision	49
5.8. Apikal extrudiertes Material	53
5.9. Prozedurale Fehler	54
6. Diskussion	55
6.1. Diskussion der Methode	55
6.1.1. Gruppeneinteilung	55
6.1.2. Revisionstechnik	57
6.1.3. Berechnung des verbleibenden Wurzelkanalfüllmaterials und des Dentinabtrags	60
6.2. Diskussion der Ergebnisse	63
6.2.1. Wurzelkanalfüllungsreste	63
6.2.2. Zahnhartsubstanzverlust	65
6.2.3. Extrudierter Debris	66
6.2.4 Arbeitssicherheit	67
6.2.5 Arbeitszeit	69
7. Schlussfolgerungen	71
8. Zusammenfassung	72
9. Literaturverzeichnis	73

10. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis:	92
11. Anhang: Tabelle zur numerischen Zusammenfassung	96
12. Materialliste	98

1. Einleitung

Eine Wurzelkanalbehandlung wird beim Auftreten von Schmerzen und/oder bei der Entwicklung oder der Persistenz einer apikalen Parodontitis als Misserfolg eingestuft. Die orthograde Revision einer nicht erfolgreichen Primärbehandlung stellt eine der größten technischen Herausforderungen in der Endodontie dar. In diesem Zusammenhang ist die Entfernung des vorherigen Wurzelkanalfüllmaterials meist schwierig und zeitintensiv (Baratto-Filho et al. 2002).

Entscheidend für die Revision sind die Entfernbarekeit des Wurzelkanalfüllmaterials, die Zahnanatomie und die zur Entfernung verwendeten Instrumente und Lösungsmittel. Guttapercha ist das am häufigsten verwendete und am meisten untersuchte Füllmaterial. Seine Entfernbarekeit wurde bereits in vielen Studien untersucht (Baratto-Filho et al. 2002, Barletta et al. 2008, Gergi & Sabbagh 2007, Gu L et al. 2008, Ring et al. 2009). In mehreren vorangegangenen Revisionsstudien wurden rotierende Nickel-Titan-Instrumente (NiTi) mit Handinstrumenten aus Edelstahl verglichen (Hülsmann & Stotz 1997, Hülsmann & Bluhm 2004, Gu L et al. 2008, Hammad et al. 2008). Dabei wurden viele dieser Studien an geraden Wurzelkanälen durchgeführt (Hülsmann & Bluhm 2004, Huang et al. 2007, Saad et al. 2007, Gu L et al. 2008, Hammad et al. 2008, Taşdemir et al. 2008b, Roggendorf et al. 2010), während sich nur wenige Untersuchungen mit der Revisionsbehandlung in gekrümmten Kanälen beschäftigten (Ferreira et al. 2001, Schirrmeister et al. 2006a, Barletta et al. 2008, Gergi & Sabbagh 2007, Çelik Ünal et al. 2009).

In der Regel wird für die Beurteilung einer endodontischen Behandlung eine konventionelle Röntgenaufnahme angefertigt. Auch zur Kontrolle der vollständigen Entfernung des alten Wurzelkanalfüllmaterials werden Röntgenaufnahmen verwendet, wobei zusätzlich eine visuelle Kontrolle mit Hilfe eines Operationsmikroskops möglich ist (Schirrmeister et al. 2006b).

Die Micro-Computertomografie (Micro-CT) ist mittlerweile als valide Methode zur Analyse unterschiedlicher endodontischer Verfahren etabliert (Duncan & Chong 2010), aber nur wenige Studien verwendeten diese Methode zur Beurteilung der Effektivität unterschiedlicher Revisionstechniken in geraden Wurzelkanälen (Hammad et al. 2008, Roggendorf et al. 2010).

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, die Effektivität zweier maschineller NiTi-Revisionssysteme und von Handinstrumenten hinsichtlich der Entfernung von Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen zu untersuchen.

Hierfür wurden Micro-CT-Scans vor und nach der Revision durchgeführt, um die Reste an Wurzelkanalfüllmaterial und die Zahnhartsubstanzverluste durch die jeweiligen Techniken zu bestimmen. Darüber hinaus wurden die Arbeitszeit sowie prozedurale Fehler ermittelt.

2. Literaturübersicht

2.1. Ziele der Wurzelkanalbehandlung

Die Endodontologie beschäftigt sich mit Diagnostik und Therapie pulpaler und periapikaler Erkrankungen. Die Hauptursachen für die Entstehung dieser Erkrankungen stellen Bakterien und deren Stoffwechselprodukte sowie dentale Traumata dar (Ferraz et al. 2001, Nair 2004).

Die wichtigsten Ziele der endodontischen Therapie sind die Eliminierung der Bakterien und deren Toxine sowie die Entfernung des irreversibel geschädigten oder nekrotischen Pulpagewebes (Frentzen et al. 2004). Dies muss durch eine mechanische Präparation, eine gründliche Desinfektion mit Berücksichtigung der Wurzelkanalanatomie und eine bakterien-dichte Obturation der entstandenen Hohlräume gewährleistet werden (Ponti et al. 2002, Nair et al. 2005). Eine wandständige Wurzelkanalfüllung soll den in den Dentintubuli verbliebenen Bakterien das Substrat entziehen und eine Reinfektion durch ein koronales oder apikales Leakage verhindern (Löst et al. 1992). Eine bakterien-dichte koronale Versorgung nach Beendigung der endodontischen Behandlung soll den Wiedereintritt von Bakterien in das Wurzelkanalsystem verhindern und somit zum langfristigen Erfolg der Wurzelkanalbehandlung beitragen (Ng et al. 2008).

2.2. Prognose und Misserfolg endodontischer Behandlungen

Der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung wird durch eine klinische und röntgenologische Symptommfreiheit definiert. Eine vollständige Heilung besteht bei klinischer Symptommfreiheit und einem röntgenologisch durchgängigen Parodontalspalt (European Society of Endodontology 2006). Klinische Symptommfreiheit und eine radiologisch sichtbare Verkleinerung der endodontisch bedingten Läsion kennzeichnen eine unvollständige Heilung. Beim Vorliegen klinischer Symptome einer röntgenologisch nicht nachweisbaren Verringerung einer Parodontitis apicalis oder sogar eine Neubildung einer apikalen Läsion wird von einem Misserfolg gesprochen.

Radiologisch diagnostizierbare externe progressive Resorptionen sind ebenfalls Anzeichen einer ausbleibenden Heilung (European Society of Endodontology 2006).

Studien von Kerekes & Tronstad (1979) und Byström et al. (1987) zeigten, dass die Erfolgsquote einer korrekt durchgeführten Wurzelkanalbehandlung bei 80% bis über 90% liegt.

Laut einer Stellungnahme der DGZMK (Weiger et al. 2001) zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen sind folgende Einflussgrößen und prognostische Faktoren für eine erfolgreiche Behandlung verantwortlich: der Zahntyp, anatomische Varianten, klinische Symptome, die Größe der apikalen Läsion, die Art der medikamentösen Einlagen, die Homogenität, die Wandständigkeit und die apikale Extension der Wurzelkanalfüllung. Zum Erhalt des endodontischen Erfolges trägt eine geeignete koronale Restauration bei, die einen bakteriendichten Verschluss ermöglicht und die Frakturgefahr des Zahnes reduziert.

Eine primäre Wurzelkanalbehandlung kann bei Auftreten klinischer und/oder radiologischer Symptome (European Society of Endodontology 2006) als Misserfolg gewertet werden. Die Gründe für einen Misserfolg liegen in der Komplexität des Wurzelkanalsystems, den möglichen bakteriellen quantitativ und qualitativ unterschiedlich ausgeprägten Infektionen des Endodonts, sowie in der Limitation der verfügbaren Instrumente, Behandlungstechniken und Medikamente (Duncan & Chong 2010).

Eine Hauptursache für den endodontischen Misserfolg ist die Persistenz von Mikroorganismen innerhalb des Wurzelkanalsystems oder der periradikulären Region (Nair et al. 1990, 2005). Extraradikuläre Infektionen können ebenfalls zu einem Misserfolg führen (Siqueira 2001). Zu den extraradikulären Infektionen zählen beispielsweise eine Aktinomykose, ein extraradikulärer Biofilm, infizierte Taschenzysten und nach apikal extrudierter, infizierter Debris. Aber auch intrakanaläre Ursachen, wie z. B. unbehandelte Wurzelkanalabschnitte, ein koronales Leakage durch eine undichte Restauration mit Neuzutritt von Mikroorganismen und Fremdkörperreaktionen können zu einem Misserfolg führen (Hülsmann et al. 2005). Mills (1999) fasste ebenfalls die Vielfältigkeit der Ursachen für einen Misserfolg zusammen. Als präoperative Gründe für den Misserfolg nannte er palatinal-radikuläre Furchen, Dentikel, ungewöhnliche Varianten der Wurzelkanalanatomie, ein nicht

abgeschlossenes Wurzelwachstum sowie die Kalzifizierung der Wurzelkanäle und der Pulpakammer. Operative Gründe für den Misserfolg sind nach Mills (1999) ein unzureichender Zugang zum Kanalsystem, eine insuffiziente Desinfektion, Instrumentenfrakturen, Perforationen, eine überextendierte Zugangskavität, Stufenbildungen, Elbows und Zips, iatrogen blockierte Wurzelkanäle durch Debris, die Qualität der Obturation, das Füllungsmaterial, nicht präparierte und gereinigte Wurzelkanäle, Überinstrumentierung und eine Überextension der Wurzelkanalfüllung. Als postoperative Ursachen für das Scheitern einer Wurzelkanalbehandlung gab er Trauma, Frakturen, undichte oder fehlende koronale Restaurationen, Stiftfrakturen und Stiftperforationen, apikale oder laterale Resorptionen und vertikale Wurzelfrakturen an.

2.3. Wurzelkanalfüllung

Die Funktion der Wurzelkanalfüllung besteht im bakteriendichten Verschluss des endodontischen Systems, um den Eintritt von Mikroorganismen aus dem Parodont und der Mundhöhle zu unterbinden (Saunders & Saunders 1994). Die ideale Wurzelkanalfüllung ist gut kompaktiert, verschließt alle Foramina mit Zugang zum Parodont, endet an der apikalen Konstriktion und passt sich dem instrumentierten Kanal an (Michanowicz et al. 1989).

Grossmann (1940) fasste die Eigenschaften eines Wurzelkanalfüllmaterials zusammen. Demnach sollte es leicht anwendbar und sterilisierbar sein und den Wurzelkanal vertikal und lateral verschließen. Außerdem sollte es biokompatibel, bakteriostatisch, röntgenopak und formstabil, aber auch während Revision leicht zu entfernen sein.

Für die Wurzelkanalfüllung stehen verschiedene und vielfältige Techniken zur Verfügung. Zu den kalten Fülltechniken zählen Stifttechniken, wie z. B. die Einstifttechnik, die laterale Kondensation und die Insertion von Silberstiften. Weiterhin existieren warme, thermoplastische Fülltechniken, wie die warme laterale Kompaktion, die warme vertikale Kompaktion, die Guttaperchainjektionstechnik, die thermomechanische Kompaktion und die trägerbasierten Füllungstechniken (Wesselink 2003).

2.3.1 Die kalte laterale Kompaktion

Die laterale Kompaktion ist die am weitesten verbreitete Fülltechnik (Schäfer 2000). Diese Technik gilt nach wie vor als Goldstandard, mit der andere Fülltechniken verglichen werden (Dummer et al. 1994, Gillhooly et al. 2000, Jacobson et al. 2002).

Bei der lateralen Kompaktion benetzt man zunächst einen Hauptstift in der Größe des zuletzt eingesetzten Präparationsinstruments mit Sealer. Dieser Guttapercha-Masterpoint wird bis auf Arbeitslänge in den Kanal eingebracht und mit einem Spreader an die Wurzelkanalwand adaptiert. Ein weiterer, mit Sealer benetzter und der Größe des Spreaders entsprechender Zusatzstift wird in den freien Raum nachgeschoben. Weitere akzessorische Guttaperchastifte werden solange in den Kanal inseriert, bis der Spreader nicht tiefer als in das koronale Wurzelkanaldrittel eingebracht werden kann (Hülsmann 2008a).

2.4. Revision

2.4.1. Ziele der Revision

Mithilfe einer Revisionsbehandlung sollen klinische und röntgenologische Symptome einer Parodontitis apicalis beseitigt (Heidemann et al. 2004) und Ursachen, die bei der Erstbehandlung zum Misserfolg führten, korrigiert werden (Weiger et al. 2001). Stabholz & Friedman (1988) gaben an, dass das Ziel der Revision in einer vollständigen Entfernung des alten Füllmaterials und der Erschließung und Reinigung des gesamten Wurzelkanalsystems liegt. Darüber hinaus sollen Bakterien und die als Substrat dienenden Gewebereste entfernt werden (Mandel & Friedman 1992). Bisher unbehandelte Wurzelkanäle sollten während der Revision präpariert, desinfiziert und gefüllt werden (Friedman & Stabholz 1986). Dies kann sich unter Umständen recht problematisch gestalten, da das Auffinden solcher Kanäle häufig schwierig ist und der Erfolg der Therapie auch von der Erfahrung, dem Geschick und der Geduld des Zahnarztes abhängt. Ist eine chemo-mechanische Präparation eines Wurzelkanals nicht möglich, können alternative Therapiemaßnahmen, wie beispielsweise eine Wurzelamputation oder Hemisektion in Erwägung gezogen werden (European Society of Endodontology 2006). Nach der Beseitigung des

infizierten Gewebes und des Füllmaterials sowie einer gründlichen Desinfektion des Kanalsystems erfolgt der bakteriendichte Verschluss mit einem biokompatiblen und formstabilen Wurzelfüllmaterial. Die dichte koronale Restauration soll zusätzlich einer Reinfektion vorbeugen (Löst et al. 1992).

Während der Revisionsbehandlung können Komplikationen auftreten, zu denen unter anderem Perforationen, Instrumentenfrakturen (Schirrmeister et al. 2006a, Çelik Ünal et al. 2009), das Überpressen von Füllmaterial (Schirrmeister et al. 2006a, Huang et al. 2007), die Nichtentfernbarkeit des Füllmaterials (Duncan & Chong 2010), ein Nichterreichen der Arbeitslänge und postoperative Beschwerden (Trope 1991) zählen. Darüber hinaus kann die Heilung einer apikalen Läsion ausbleiben oder sich postoperativ eine Parodontitis apicalis entwickeln.

2.4.2. Indikation für Revisionen

Bei der Entscheidung für die Revision einer Wurzelkanalbehandlung müssen sowohl die Risiken als auch die Prognose berücksichtigt werden. Der Zahnarzt muss unter Berücksichtigung seiner Fähigkeiten und seiner Erfahrungen entscheiden, ob durch eine Revisionsbehandlung eine Verbesserung der Ausgangssituation möglich ist. Therapieoptionen, wie chirurgische Behandlungen, Implantatversorgungen oder prothetische Rekonstruktionen müssen dem Patienten vorgestellt und mit ihm individuell diskutiert werden. Hierbei sind die Erwartungshaltung und Wünsche, aber auch die Bereitschaft des Patienten zur Kostenübernahme wesentliche Aspekte der Therapieplanung. Laut einer Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (Heidemann et al. 2004) besteht eine Indikation für eine Revision, wenn eine neu entstandene endodontisch bedingte Parodontitis apicalis vorhanden ist. Dies manifestiert sich in röntgenologisch sichtbaren periradikulären oder periapikalen Aufhellungen, einem verbreiteten Parodontalspalt, sowie klinischen Symptomen, z. B. Spontanschmerz, Perkussions- und Aufbissemphindlichkeit, schmerzhafter Palpation der Apikalregion, Abszessbildung oder Schwellungen (European Society of Endodontology 2006). Eine klinisch und röntgenologisch insuffiziente Wurzelkanalfüllung stellt ebenfalls eine Indikation für eine Revision dar (Friedman & Stabholz 1986). Eine Wurzelkanalfüllung wird als insuffizient gewertet,

wenn eine mangelhafte Homogenität der Füllung vorliegt oder ein nicht kompatibles Füllmaterial verwendet wurde (Heidemann et al. 2004). Auch kann eine Revision von röntgenologisch fragwürdigen Wurzelkanalfüllungen erfolgen, wenn eine neue koronale Restauration geplant ist (Sundqvist et al. 1998). Laut einer Stellungnahme der DGZMK (Heidemann et al. 2004) sollte eine Revision erfolgen, wenn eine Wurzelkanalfüllung dem Mundhöhlenmilieu exponiert war. In einem solchen Fall ist mit einer Reinfektion des Kanalsystems durch die im Speichel befindlichen Bakterien zu rechnen. Progressive externe entzündliche Resorptionen stellen ebenfalls eine Indikation für eine Revisionsbehandlung dar (Heidemann et al. 2004).

2.4.3. Prognose von Revisionsbehandlungen

Eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung besteht bei klinischer Symptombefreiheit und einem röntgenologisch durchgängigen Parodontalspalt (European Society of Endodontology 2006). Sjögren et al. (1990) stellten fest, dass die Erfolgsquote bei endodontischen Revisionen bei 60% liegt. Gorni & Gagliani (2004) differenzierten den Erfolg in Abhängigkeit von bestimmten klinischen Situationen, wobei die durchschnittliche Erfolgsquote bei 69,03% lag. Zähne, bei denen es während der Erstbehandlung zu einer Veränderung der Kanalmorphologie kam, konnten nur in 47% der Fälle erfolgreich therapiert werden. Beim Vorliegen einer unveränderten Kanalmorphologie stieg der Behandlungserfolg auf 86,8%. Wenn keine Behandlungsfehler auftraten und ein Erreichen der Arbeitslänge möglich war, betrug die Erfolgsquote bis zu 87%. Die Autoren zeigten, dass die Prognose der Revision von einer Veränderung der Wurzelkanalanatomie während der Primärbehandlung abhängt. Van Nieuwenhuysen et al. (1994) belegten, dass in 86% der Fälle mit Hilfe der Revisionsbehandlung eine deutliche Verbesserung der Wurzelkanalfüllung im Vergleich zur Ausgangssituation möglich war. 71% der klinisch symptomatischen Wurzeln wurden erfolgreich behandelt. Der Erfolg der Revisionsbehandlung wird zum einen durch mikrobielle und zum anderen durch technische Faktoren beeinflusst (Duncan & Chong 2010).

In einer aktuellen Studie von Ng et al. (2011) wurde der Erfolg einer Revisionsbehandlung mit 80% angegeben. Der wichtigste prognostische Einflussfaktor war

das Vorliegen einer präoperativen Parodontitis apicalis, wobei eine kleine Ausdehnung zu einer besseren Prognose führte (Ng et al. 2011). Pro Millimeter röntgenologischer Ausdehnung der Parodontitis apicalis verringert sich der Behandlungserfolg um 14%. Eine gute Gängigkeit der Kanäle, das Erreichen des Foramen apicale und eine optimale Desinfektion verbesserten die Prognose einer Revisionsbehandlung. Weitere Faktoren, wie z. B. das Vermeiden einer Perforation und einer Extrusion von Füllmaterial, begünstigen ebenfalls die Prognose. Als letzten wichtigen Faktor gaben Ng et al. (2011) eine zufriedenstellende koronale Restauration an.

2.5. Techniken zur Entfernung der Guttapercha

Die orthograde Revision schafft einen erneuten Zugang zum Wurzelkanalsystem und zum Foramen apicale. Die vollständige Entfernung der vorhandenen Wurzelkanalfüllung ermöglicht eine umfassende Desinfektion, die erneute Präparation des Wurzelkanals und die anschließende Obturation (Stabholz & Friedman 1988). Bislang wurden verschiedene Techniken zur Entfernung von Guttapercha untersucht, z. B. Handinstrumente (Friedman et al. 1990, Hülsmann & Bluhm 2004, Schirrmeister et al. 2006a, Gergi & Sabbagh 2007, Çelik Ünal et al. 2009) und rotierende Instrumente (Friedman et al. 1990, Schirrmeister et al. 2006a, Gergi & Sabbagh 2007, Çelik Ünal et al. 2009). Unterstützend wurden ebenfalls Ultraschall und Hitze (Wilcox 1989), sowie Lösungsmittel verwendet (Ferreira et al. 2001, Hülsmann & Bluhm 2004, Gergi & Sabbagh 2007, Gu L et al. 2008, Çelik Ünal et al. 2009).

2.5.1. Handinstrumente und Nickel-Titan-Instrumente

Handinstrumente bestehen aus einem Arbeitsteil, einem Schaft und dem Griff. Entsprechend der ISO-Norm beträgt die Länge des Arbeitsteils 16 mm und die Konizität 2%, d.h., die Durchmesserdifférenz des Arbeitsteils vom Anfang bis zum Ende beträgt 0,32 mm (Hülsmann 2008b). Der Schaft variiert zwischen 5 und 15 mm. Die Griffe sind farblich markiert und mit der Nummer der entsprechenden ISO-Größe

versehen. Zu den Standardinstrumenten gehören Exstirpationsnadeln, Reamer (Synonym: Kerr-Bohrer, Erweiterer), K-Feilen und Hedström-Feilen. Reamer und K-Feilen besitzen einen drei- oder viereckigen Querschnitt und werden durch Verwinden hergestellt. Je nach Größe der Instrumente haben Reamer 8-16 Schneiden mit je 10-30° Schneidekantenwinkel und K-Feilen 24-36 Schneiden mit je 25-40° Schneidekantenwinkel. Reamer arbeiten am effektivsten bei leichten Drehbewegungen und eignen sich zum Erschließen des Wurzelkanals. Durch das Herausfräsen runder Rohlinge entstehen Hedström-Feilen mit einem Schneidekantenwinkel von etwa 60-65°. Die effektivste Einsatzart sind Zugsbewegungen aus dem Kanal heraus. Hedström-Feilen sind hinsichtlich des Materialabtrags die effektivsten Instrumente (Hülsmann 2008b). Bei der Anwendung sind Aspekte wie Bruchsicherheit, Schneideleistung und Elastizität der Instrumente von besonderer Bedeutung. Edelmetallinstrumente zeigen mit steigender ISO-Größe eine Zunahme des Biege widerstandes und der Steifheit (Camps & Pertot 1994). Bei der Bearbeitung gekrümmter Wurzelkanäle führt dies zunehmend zu einer Begradigung des ursprünglichen Kanalverlaufes. Perforationen, Stufenbildungen, begradigte apikale Bereiche und der Verlust der Arbeitslänge sind häufige Folgen (Schäfer & Lohmann 2002).

Neue Revisionstechniken, wie die Anwendung von Nickel-Titan-Systemen, werden stets mit Handinstrumenten verglichen (Ferreira et al. 2001, Schirrmeister et al. 2006a, Barletta et al. 2008, Só et al. 2008, Aydin et al. 2009, Betti et al. 2009).

Präparationssysteme aus einer Nickel-Titan-Legierung (NiTi) führten in den letzten Jahren zu einer Erleichterung der endodontischen Behandlung. Studien von Hülsmann et al. (2005) und Paqué et al. (2005) zeigten, dass Nickel-Titan-Systeme eine reproduzierbare Formgebung, speziell bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle, erzielen. Der Vorteil bei der Anwendung rotierender NiTi-Systeme liegt zudem in der Zeitersparnis (Rangel et al. 2005).

Nickel-Titan-Feilen werden durch maschinelle Fräsung eines Rohlings hergestellt. Die Schneidleistung von NiTi-Instrumenten ist im Vergleich zu Stahlinstrumenten geringer (Tepel et al. 1995). Der geringe Elastizitätsmodul und der sich daraus ergebende Memory-Effekt, ein pseudoelastisches Verhalten, sind typisch für diese Instrumente. Der sogenannte Memory-Effekt bedeutet, dass sich das Instrument nach Verformung ohne sichtbare Deformation wieder in die Ausgangsposition

zurückstellt. Da der E-Modul der NiTi-Instrumente niedriger als der von Edelmetallinstrumenten ist, wird besonders die Anwendung in gekrümmten Wurzelkanälen empfohlen (Camps & Pertot 1994).

Die Mehrzahl der Nickel-Titan-Feilen besitzt nichtschneidende Instrumentenspitzen (Batt-Spitze) (Hülsmann 2008b). Darüber hinaus werden Komplikationen, wie beispielsweise Perforationen oder Kanalbegradigungen, reduziert (Short et al. 1997). Die Konizitäten der NiTi-Instrumente entsprechen in der Regel nicht der ISO-Norm und betragen 4-20% oder die Instrumente weisen variierende Konizitäten innerhalb ihrer Schneide auf. Ein weiteres Konstruktionsmerkmal stellt die variierende Länge des Arbeitsteiles dar. So werden zum Beispiel kurze Arbeitsteile mit einer höheren Konizität zur Präparation koronaler Kanalanteile benutzt. Lange Arbeitsteile mit geringer Konizität verwendet man für die apikale Präparation. Charakteristisch für die einzelnen Systeme sind auch die Querschnittsformen der Instrumente. Ein U-förmiger Querschnitt liegt beispielsweise bei den Systemen ProFile (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) und GT Rotary (Dentsply Maillefer) vor. FlexMaster- (VDW, München), RaCe- (FKG Dentaire SA, La Chaux-de-Fonds, Schweiz) oder Hero642 (Micro Méga, Oberursel) -Instrumente besitzen einen Dreikantquerschnitt mit konvexen Außenflächen (Hülsmann 2008). Bei der Anwendung sollten die Angaben der jeweiligen Hersteller bezüglich Umdrehungsgeschwindigkeit, Drehmoment und Benutzungshäufigkeit beachtet werden. Bislang wurde eine Vielzahl von Nickel-Titan-Systemen für die Revision von Wurzelkanalfüllungen untersucht (Bramante & Betti 2000, Imura et al. 2000, Sae-Lim et al. 2000, Hülsmann & Bluhm 2004, Schirrmeister et al. 2006a, Zmener et al. 2006, Barletta et al. 2008, Gu L et al. 2008, Çelik Ünal et al. 2009).

Untersuchungen ergaben, dass die Reinigungswirkung von Hedström-Feilen bei einer Revision den rotierenden Instrumenten überlegen ist (Hülsmann & Stotz 1997, Betti & Bramante 2001, Betti et al. 2009). Einige Studien zeigten diesbezüglich keinen Unterschied zwischen Handinstrumenten und NiTi-Feilen (Gergi & Sabbagh 2007, Schirrmeister et al. 2006a) oder sogar eine bessere Reinigungswirkung mit rotierenden Instrumenten (Gu L et al. 2008). Der Zeitbedarf für eine Revision mit Handfeilen ist gegenüber rotierenden Instrumenten erhöht (Hülsmann & Stotz 1997, Betti & Bramante 2001, Zmener et al. 2006, Gu L et al. 2008, Betti et al. 2009). Schirrmeister et al. (2006a) verglichen Hedström-Feilen mit verschiedenen Nickel-

Titan-Systemen für die Entfernung von Wurzelkanalfüllungen aus Guttapercha in gekrümmten Wurzelkanälen. Im Vergleich zu ProTaper und FlexMaster traten beim Einsatz von Hedström-Feilen weniger Instrumentenfrakturen auf. Außerdem zeigte diese Studie, dass RaCe ein effizientes und sicheres System für die Entfernung von Guttapercha ist.

Eine vergleichende Untersuchung von Hand- und Nickel-Titan-Instrumenten bezüglich der effektiven Entfernung von Guttapercha ergab, dass mit keiner der verwendeten Techniken eine vollständige Entfernung des Füllmaterials möglich war (Barrieshi-Nusair 2002). Hinsichtlich der verbliebenen Menge an Sealer und Guttapercha ergab sich kein signifikanter Unterschied. Auch die Studie von Kostı et al. (2006) konnte keinen deutlich erkennbaren Unterschied, bezüglich der Reinigungswirkung zwischen Hedström-Feilen und dem rotierenden ProFile-System während der Revision von Guttapercha und vier verschiedenen Sealern, feststellen.

2.5.2. D-RaCe

RaCe (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz) ist ein rotierendes Nickel-Titan-Präparationssystem, wobei das Akronym für "reamer with alternating cutting edges" steht. Die Instrumente besitzen eine nicht schneidende Sicherheitsspitze, die eine gute Zentrierung und Führung des Instrumentes im Wurzelkanal bewirkt. Alternierende Schneidekanten sollen ein Verschrauben und einen blockierenden Effekt verhindern (Hülsmann 2008b) sowie den Drehwiderstand minimieren. Die scharfen Schneidekanten gewährleisten eine optimale Schneideleistung und verbessern den Abtransport der Gewebereste. Durch eine elektrochemische Oberflächenbehandlung der Instrumente soll der Torsions- und Metallermüdungswiderstand erhöht, sowie die Reinigung und Sterilisation erleichtert werden.

Zand et al. (2007) untersuchten die Effizienz der Wurzelkanalpräparation von NiTi-K-Feilen im Vergleich zu rotierenden FlexMaster- und RaCe-Instrumenten. Sie stellten fest, dass die RaCe-Instrumente über die gesamte Kanalwand signifikant weniger Smear layer hinterließen als NiTi-K-Feilen. Bei FlexMaster zeigten sich signifikant weniger Debris und Smear layer als bei RaCe- und K-Feilen.

Zarrabi et al. (2006) verglichen manuelle Präparationstechniken mit den rotierenden NiTi-Systemen ProFile, RaCe und FlexMaster bezüglich extrudierten Debris. Es zeigte sich, dass mit RaCe signifikant weniger Debris extrudiert wurde als mit den manuellen Techniken oder FlexMaster.

Schirrmeister et al. (2006a) analysierten die Effektivität von Handinstrumenten und FlexMaster, ProTaper und RaCe hinsichtlich der Entfernung von Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen. Demzufolge hinterließ RaCe signifikant weniger Füllmaterial als FlexMaster. Außerdem wies RaCe ein geringeres Risiko für Instrumentenfrakturen als FlexMaster und ProTaper auf. Diese Studie zeigte, dass RaCe ein effizientes und sicheres System für die Revision von Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen darstellt.

Die Firma FKG entwickelte das weiterführende NiTi-System BioRaCe. Dieses unterscheidet sich von RaCe durch andere Instrumentengrößen, -konizitäten und Sequenzen. Dieses System soll eine effiziente und sichere Wurzelkanalpräparation mit wenigen Instrumenten ermöglichen. Die koronale Präparation erfolgt mit der Feile BR0 bei 500-600 U/min⁻¹. Zum Erreichen der Arbeitslänge werden die Feilen BR1, BR2 und BR3 benutzt. Für die apikale Erweiterung dienen die Instrumente BR1 bis BR7, wobei bei starken Krümmungen nur bis BR4 oder BR5 präpariert werden sollte.

Folgende Instrumente sind im Basis-Set:

BR0 = 25/.08

BR1 = 15/.05

BR2 = 25/.04

BR3 = 25/.06

BR4 = 35/.04

BR5 = 40/.04

BR6 = 50/.04

BR7 = 60/.02.

Die Firma FKG entwickelte zusätzlich ein rotierendes NiTi-Revisionssystem mit der Bezeichnung D-RaCe, das laut Herstellerangaben für die Entfernung von Wurzel-

kanalfüllmaterialen wie Guttapercha, trägerbasierten Obturationssystemen, Pasten und kunststoff-basierten Materialien geeignet ist.

Das D-RaCe-System besteht aus zwei Instrumenten, wobei die erste Feile (DR1) über eine aktive Spitze verfügt, eine Größe von 30 und eine Konizität von 0.10 besitzt. Diese Feile dient der Entfernung des Füllmaterials im koronalen Kanaldrittel und sollte mit wenig Druck bei 1000 U/min^{-1} in das Wurzelkanalfüllmaterial eingeführt werden. Die zweite Feile (DR2) besitzt eine Sicherheitsspitze und dient der Entfernung des Füllmaterials im mittleren und apikalen Drittel. Das DR2-Instrument (Größe 25, .04 Konizität) wird mit einer Geschwindigkeit von 600 U/min^{-1} eingesetzt, bis kein Füllmaterial in den Schneiden sichtbar und die Arbeitslänge erreicht ist. Um Ermüdungsfrakturen zu vermeiden, sollte DR2 nur einmal verwendet werden. In der aktuellen Literatur ist keine Studie zu D-RaCe-Instrumenten auffindbar.

2.5.3 ProTaper und ProTaper Universal Retreatment

Das ProTaper Universal System (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) besteht aus sechs Instrumenten, drei Shaping-Feilen (SX, S1, S2) für den koronalen und mittleren Kanalbereich und drei Finishing-Feilen (F1, F2, F3) für die apikale Präparation. Nachträglich wurden die Feilen F4 und F5 in das Sortiment aufgenommen, um eine weitere Apikalpräparation zu ermöglichen.

Das Basis-Set besteht aus folgenden Instrumenten:

SX = 19/variierende Konizität von .035 bis .19

S1 = 17/variierende Konizität von .02 bis .11

S2 = 20/variierende Konizität von .04 bis .115

F1 = 20/.07

F2 = 25/.08

F3 = 30/.09

F4 = 40/.06

F5 = 50/.05.

Die Instrumente verfügen über eine nicht schneidende Instrumentenspitze, einen dreieckigen, leicht konvexen Querschnitt und einen aktiven Schneidewinkel von 30°. Die Länge der Arbeitsteile kann zwischen 21, 25 und 31 mm gewählt werden.

Die ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen (PTUR) dienen der Entfernung von Füllungsmaterial aus dem Wurzelkanal. Diese drei Feilen sind jeweils für ein bestimmtes Wurzelkanaldrittel bestimmt. Die Feile D1 (30/.09) besitzt eine schneidende Spitze zum effektiven Eindringen in das koronale Füllungsmaterial. Die Instrumente D2 (25/.08) und D3 (20/.07) dienen der Revision von Füllmaterial im mittleren und apikalen Kanaldrittel und verfügen über keine aktiven Spitzen. Die Instrumente, die speziell im mittleren und koronalen Drittel arbeiten, sind weniger flexibel als solche, die für das apikale Drittel verwendet werden. Durch die erhöhte Flexibilität der Instrumente soll das Risiko einer Kanaltransportation verringert werden (Hussne et al. 2011).

Çelik Ünal et al. (2009) verglichen die Effizienz von PTUR mit K-Feilen, Hedström-Feilen (Dentsply Maillefer), R-Endo (Micro-Mega) und ProFile, bezüglich der Entfernung von Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen. Das Resultat dieser Studie war, dass nach manueller Instrumentation signifikant geringere Reste des Wurzelfüllmaterials verblieben als nach Verwendung von ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen. Die für die Revision benötigte Zeit war mit PTUR signifikant geringer als bei der Arbeit mit ProFile. Innerhalb der PTUR-Gruppe wurden mehrere Behandlungsfehler festgestellt. Fünf Instrumente (3mal D3, 2mal D2) frakturierten und es traten zwei laterale Perforationen auf.

Hammad et al. (2008) untersuchten mit Hilfe des Micro-CTs die Reste mehrerer Füllmaterialien nach Revisionsbehandlungen, wobei PTUR-Instrumente oder manuelle K-Feilen verwendet wurden. Es konnte gezeigt werden, dass K-Feilen effizienter Guttapercha entfernen als die PTUR-Feilen. Dieser Unterschied war allerdings nicht signifikant.

Shemesh et al. (2011) überprüften den Einfluss von Revisionsbehandlungen auf das Auftreten von Defekten an der Wurzelkanalwand. 200 Unterkiefer-Prämolaren wurden mit ProTaper bis F4 präpariert und mit Guttapercha und AH 26 (Dentsply DeTrey, Konstanz) gefüllt. Die Revision erfolgte entweder mit PTUR- oder Hedström-Feilen. Anschließend wurden die Zähne horizontal zersägt und unterschiedliche

Defekte in der Wurzelkanalwand analysiert. Dabei wurden in beiden Gruppen Frakturen des Wurzelkanal Dentins festgestellt, wobei der Unterschied nicht signifikant war. Die Revision mit Hedström-Feilen dauerte im Vergleich zu den PTUR-Feilen signifikant länger.

Marfisi et al. (2010) testeten in einer In-vitro-Studie die Effizienz von PTUR-Feilen im Vergleich zu Mtwo-Retreatment- (Sweden & Martina, Padova, Italien) und Twisted-Feilen (Sybron Dental Specialities, Orange, CA, USA) für die Revision von Gutta-percha und Resilon (Resilon Research LLC, Madison, CT, USA). Keine der getesteten Methoden konnte die Wurzelkanalfüllungen vollständig entfernen. Die Revision mit MTwo-Instrumenten war signifikant schneller als mit PTUR- und Twisted-Feilen.

Bramante et al. (2010) untersuchten die Wärmefreisetzung, die benötigte Zeit und die Sauberkeit von ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen und Mtwo R (VDW, München) bei der Revision in geraden Wurzelkanälen. Beide Techniken hinterließen Debris im Wurzelkanal. Die Revision mit PTUR benötigte weniger Zeit (nicht signifikant), produzierte jedoch die größte Rotationswärme.

Ring et al. (2009) stellten in einer Ex-vivo-Studie fest, dass die Entfernung von Guttapercha mit PTUR-Feilen signifikant länger dauert als mit EndoSequence (Brasseler, Savannah, GA, USA). Bezüglich der Effektivität der Revision bestand kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Systemen.

Sò et al. (2008) testeten die Effizienz von PTUR- und Handfeilen bei der Entfernung von Wurzelkanalfüllungen aus Guttapercha und zwei unterschiedlichen Sealern, AH plus (Dentsply De Trey, Konstanz) und EndoFill (Dentsply Ind e Com Ltda, Petrópolis, RJ, Brasilien). Die mit EndoFill und Guttapercha gefüllten Wurzelkanäle wiesen nach der Revision mit ProTaper signifikant mehr Füllungsreste im zervikalen Drittel als die mit Handinstrumenten behandelten Kanäle auf. Die Techniken unterschieden sich allerdings nicht signifikant hinsichtlich der Füllungsreste im apikalen Drittel.

Gu L et al. (2008) testeten an 60 extrahierten Oberkiefer-Inzisivi die Effizienz von PTUR- und Hedström-Feilen in Kombination mit Gates-Glidden-Bohrern. Mit keiner der untersuchten Techniken konnten die Kanalwände vollständig gereinigt werden. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die Revision mit PTUR-Feilen eine

effiziente Methode für die Entfernung von lateral verdichteter Guttapercha und AH Plus bei geraden Oberkiefer-Schneidezähnen darstellt.

Gergi & Sabbagh (2007) verglichen ProTaper, R-Endo (Micro-Mega, Besancon, France) und Hedström-Feilen bei der Entfernung von Guttapercha in gekrümmten Wurzelkanälen. Sie schlussfolgerten, dass keines der Instrumente den Kanal vollständig reinigt.

In der Studie von Schirrmeister et al. (2006a) wurden ProTaper, RaCe, FlexMaster und Handfeilen hinsichtlich der Effektivität bei Revisionen an 60 gekrümmten Wurzelkanälen getestet. Es stellte sich heraus, dass RaCe und Handinstrumente den Kanal signifikant besser reinigen als ProTaper. Allerdings erreichte ProTaper die Arbeitslänge schneller als RaCe und FlexMaster. Innerhalb der ProTaper-Gruppe kam es zu mehr prozeduralen Fehlern als in der RaCe- und der Hedström-Gruppe. Es frakturierten weder RaCe- noch Hedström-Feilen, wohingegen in der ProTaper-Gruppe fünf Instrumentenfrakturen (d. h. = 2,7% der Instrumente) auftraten. Viermal frakturierte die Feile F2 und einmal F3. In zwei Wurzelkanälen in der ProTaper-Gruppe wurde eine Perforation festgestellt, wobei dies 9,1% der mit ProTaper instrumentierten Wurzelkanäle entspricht.

2.5.4. Anwendung von Lösungsmitteln

Sollte die Revision durch zu stark verdichtetes Wurzelkanalfüllmaterial erschwert sein, kann der Einsatz von Lösungsmitteln hilfreich sein. Hierbei stehen Eukalyptol, Halothan, Chloroform, Xylol, Terpentin, Tetrahydrofuran und D-Limonen (Schirrmeister 2006) zur Auswahl. Studien von Tamse et al. (1986) und Wilcox (1995) zeigten, dass Chloroform ein sehr effektives Lösungsmittel für Guttapercha ist. Der Gebrauch wird jedoch diskutiert, da es im periradikulären Gewebe lokal toxisch wirkt und als karzinogen eingestuft ist (Barbosa et al. 1994). Ribeiro et al. (2007) untersuchten die Biokompatibilität von Chloroform und Eukalyptol und stellten dabei fest, dass beide Lösungsmittel in einer Konzentration von 2,5, 5 und 10 µl/ml zytotoxisch wirken. Laut Hunter et al. (1991) sind Halothane und Eukalyptol zur Erweichung von Guttapercha geeignet und stellen eine Alternative zu Chloroform dar. Scelza et al. (2008) und Horvath et al. (2009) konnten nachweisen, dass durch

die Anwendung von Chloroform und Eukalyptol während der Revisionsbehandlung mehr Guttapercha- und Sealerreste an den Wurzelkanalwänden und in den Dentintubuli zu finden waren als in den ohne Lösungsmittel behandelten Proben. Diese Reste des Wurzelkanalfüllmaterials können die Desinfektion des Wurzelkanals erschweren. Hülsmann & Bluhm (2004) kamen zu dem Schluss, dass der Einsatz von Eukalyptol die Arbeitszeit einer Revision verkürzt.

2.6. Beurteilung der Effektivität und Sicherheit von Revisionstechniken

Für die Beurteilung der Sicherheit und Effektivität verschiedener Revisionstechniken werden in der Literatur folgende Kriterien berücksichtigt:

Es wird der Zeitaufwand gemessen, der bis zum Erreichen der Arbeitslänge (entspricht T1) benötigt wird. Weiterhin wird die Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials gemessen (entspricht T2). In der zahnärztlichen Praxis zählt ein geringerer Zeitaufwand für die Revision zu den wirtschaftlichen Aspekten. Viele Studien benutzten die Zeitmessungen als Indikator für die Effizienz einer Revisionstechnik (Bramante & Betti 2000, Barrieshi-Nusair 2002, Hülsmann & Bluhm 2004, Schirrmeister et al. 2006a, Zmener et al. 2006, Saad et al. 2007, Gu L et al. 2008, Çelik Ünal et al. 2009).

Eine möglichst vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials ist ein Kriterium für die Effektivität einer Revisionstechnik. Dadurch gelingt es, die bakteriell besiedelten und infizierten Bereiche des Wurzelkanalsystems gründlich zu reinigen und zu desinfizieren. Zur Beurteilung der Wurzelkanalfüllreste wird in Studien die digitale Auswertung von Röntgenbildern angewendet (Ferreira et al. 2001, Schirrmeister et al. 2006b, Gergi & Sabbagh 2007). Die Zähne können auch durch Clearing-Techniken transparent gemacht werden (Schirrmeister et al. 2006a, Hammad et al. 2008, Taşdemir et al. 2008a). Alternativ wurden die Wurzeln longitudinal gespalten und mit Fotografien (Zmener et al. 2006, de Mello Junior et al. 2009) oder mit Hilfe der Elektronenmikroskopie (Somma et al. 2008, Ring et al. 2009) analysiert. Auch kombinierte Untersuchungen mit Röntgenaufnahmen und anschließenden Wurzelsektionen wurden durchgeführt (Hülsmann & Stotz 1997, Betti & Bramante 2001, Saad et al. 2007). In der aktuellen Literatur sind lediglich

zwei Revisionsstudien zu finden, in denen die Reste des Füllmaterials mit Hilfe eines Micro-CTs ermittelt wurden (Hammad et al. 2008, Roggendorf et al. 2010).

Ein weiteres Kriterium für die Qualität der Wurzelkanalpräparation ist die Menge des nach apikal extrudierten Materials. Extrudiertes Füllmaterial kann zu Irritationen des apikalen Gewebes führen. Auch infizierte Dentinspäne sind in der Lage, eine Entzündung des Periapex auszulösen und somit eine Parodontitis apicalis oder Flare-ups zu verursachen (Seltzer & Naidorf 1985). In In-vitro-Untersuchungen kann extrudierter Debris in Behältern gesammelt und gewogen werden (Ladley et al. 1991, Huang et al. 2007).

Für die Vermeidung unerwünschter Zwischenfälle während der Revisionsbehandlung ist ein systematisches Vorgehen unumgänglich. Mögliche Komplikationen, wie Instrumenten- und Wurzelfrakturen sowie Perforationen, können den Behandlungsverlauf erschweren oder zu einer Gefährdung des Therapieerfolges führen. Während die Entfernung abgebrochener Instrumente einen deutlich erhöhten Zeitaufwand in Anspruch nimmt, muss der Zahn beim Vorliegen einer Wurzellängsfraktur extrahiert werden (European Society of Endodontology 2006).

2.7 Die Micro-Computertomografie

2.7.1. Aufbau und Funktionsweise des Micro-CT

Seit den 80er Jahren stellt die Micro-Computertomografie (Micro-CT) (Feldkamp et al. 1989) eine Weiterentwicklung der bereits in der Klinik etablierten Computertomografie (CT) dar, die auf der Durchstrahlung des Objektes aus verschiedenen Richtungen mit Röntgenstrahlen beruht. Hierbei wird die Strahlungsintensität zwischen der am Detektor gemessenen Strahlung und der ausgesendeten Strahlung verglichen. Diese Differenz gibt Aufschluss über die Abschwächung der Strahlen in den untersuchten Geweben und Materialien. Der ermittelte Schwächungskoeffizient wird auf der Hounsfield-Skala angegeben und stellt verschiedene Grauwerte dar. Alle ermittelten Daten werden über einen Algorithmus zu einem Volumendatensatz zusammengefügt. Anhand dieses Datensatzes ist es möglich, zweidimensionale Schnittbilder in verschiedenen Ebenen sowie dreidimensionale Ansichten zu

rekonstruieren. Feldkamp et al. (1984) entwickelten hierfür den Algorithmus, um mehrere zweidimensionale Projektionen in eine dreidimensionale Rekonstruktion umzuwandeln. Das CT unterscheidet sich vom Micro-CT durch die Auflösung der resultierenden Bilder und durch das Design der Anlage. Die Entwicklung der Micro-Computertomografie zielt auf eine detaillierte Darstellung der Mikroanatomie der untersuchten Objekte ab. Dafür ist eine höhere Ortsauflösung zwischen 5 und 50 μm erforderlich (Feldkamp et al. 1989), die mit einem CT nicht erzielt werden kann. Ganzkörper-CT-Geräte ergeben eine isotrope Ortsauflösung von 1 mm (Engelke et al. 1999). Um eine höhere Auflösung zu erreichen, sind Strahlungsquellen mit sehr kleinen Fokusgrößen notwendig. Statt der Röntgenröhren werden beim Micro-CT entweder Synchrotronstrahlungsquellen oder optimierte Fein- und Mikrofokusröhren mit Transmissions- oder Reflektionsanoden eingesetzt, um die Fokusgröße zu minimieren. Ein weiterer Unterschied zum CT ist das rotierende Objekt im Micro-CT, wohingegen sich in einem CT die Röhre um das Objekt dreht. Des Weiteren ist eine Verringerung der Fokusgröße mit einer Reduktion der Röhrenleistung verbunden. Dadurch ist die Steigerung der Intensität bei gleichzeitiger Verkleinerung des Fokus nicht kompatibel. Dies impliziert, dass beim Micro-CT-Verfahren kleinere Proben-durchmesser verwendet werden und dass im Vergleich zu einem CT wesentlich längere Messzeiten resultieren, die je nach Auflösung im Minuten- oder Stundenbereich liegen (Engelke et al. 1999). Neben der geringen Röhrenleistung spielt ebenfalls die Größe der generierten Datensätze eine Rolle und beschränkt daher die Probengröße. So entspricht ein Volumendatensatz mit 512^3 Bildpunkten einer Größe von 270 Megabyte (MB). 1024^3 Bildpunkte würden 2150 MB entsprechen. Die Speicherung und Visualisierung solcher großen Datensätze stellt eine technische Herausforderung dar (Engelke et al. 1999).

In der vorliegenden Studie wurde das General Electric Medical Systems microCT scanner Locus SP (Ontario, Kanada) angewendet. Der Micro-Computertomograf besteht aus einem Kabinett, einer Konsole und der Kontrollbox. Das Kabinett fasst die Röntgenröhre, den Objektträger und den Detektor. Die Röntgenröhre erzeugt die Röntgenstrahlen, die durch den Strom an Intensität und durch die angelegte Spannung im Energiespektrum reguliert werden können. Die Filter kontrollieren das Energiespektrum der Strahlung. Die Metallfilter entsprechen den Farbfiltern in Kameras und absorbieren bestimmte Wellenlängen der Strahlung. Für das Entstehen einer gleichmäßigeren Strahlung werden die gering energetischen Röntgenstrahlen

absorbiert. Zur Änderung des Energiespektrums wurde bei diesem Micro-CT ein Filterrad mit vier unterschiedlichen Filtern eingebaut. Die Blende (Shutter) kontrolliert die Belichtungszeit und bestimmt somit, wie lange der Detektor mit den Röntgenstrahlen belichtet wird. Die zu analysierende Probe befindet sich auf einem rotationsfähigen Objektträger (rotating stage, siehe Abbildung 2.1), der sich in $0,1^\circ$ -Schritten drehen kann. Der Detektor besteht aus einem Szintillator und einer CCD-Kamera, die über Fiberglasleitungen miteinander verbunden sind. Das Cäsiumiodid des Szintillators luminesziert beim Auftreten der Röntgenstrahlen. Diese Lumineszenzsignale werden von der Kamera erfasst.

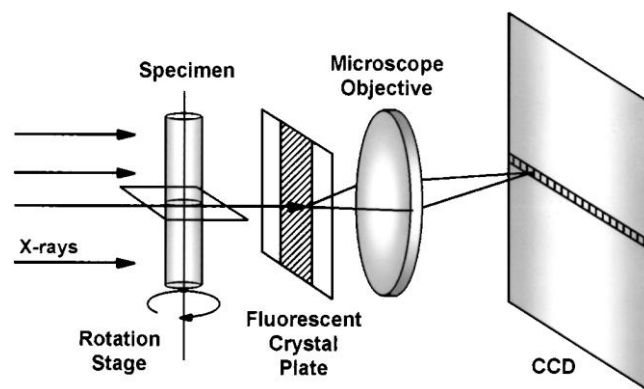


Abb. 2.1: Schema der Micro-Computertomografie (Abbildung aus Jorgensen et al. 1998, S. 1104)

Über die Konsole, bestehend aus dem Bildschirm und Computer, werden Scan-Prozess und diese Scan-Parameter eingestellt. Des Weiteren erfolgt die Rekonstruktion der Datensätze über diese Konsole. Die Kontrollbox kontrolliert die Spannung und den Strom, reguliert das Ein- und Ausschalten der Röntgenstrahlen sowie die Temperatur des Detektors. Die für den Scan benötigte Software stammt von GE Healthcare (Ontario, Kanada) und umfasst das „X-Ray warm up“ und „X-plore Scan Control-Programm“, mit deren Hilfe die Energieleistung der Röntgenstrahlen kontrolliert und das Scan-Protokoll eingestellt wird. Hierbei können die Spannung, der Strom, die Scan-Technik, die Pixelgröße, usw. eingestellt werden. Für die Navigation des Objektes innerhalb der Konsole wird ein Röntgenbild vor dem eigentlichen Scan erzeugt (Fluoro) um die richtige Ausrichtung der Probe und die Einstellparameter zu überprüfen. Eine Rekonstruktionshilfe („Reconstruction Utility“) rekonstruiert die zweidimensionalen Schnitte zu einem dreidimensionalen Bild. „Micro View“ ist die Ansichtsoftware von GE Healthcare, die eine Ansicht der einzelnen Scan-Projektionen ermöglicht. Die Schnittbilder der dreidimensionalen

Rekonstruktionen können in drei Ebenen betrachtet werden. Die Hard- und Software-Beschreibungen sind den Herstellerangaben entnommen. Durch weitere Tools dieser Software lassen sich Detaildarstellungen und Histogramme erstellen sowie die Volumetrie durchführen.

Gegenüber histologischen Untersuchungsmethoden weist das Micro-CT mehrere Vorteile auf. Es sind nicht destruktive Analysen möglich, wodurch eine aufwändige Probenpräparation entfällt und Strukturparameter sowie dreidimensionale Parameter, wie die Volumenbestimmungen, direkt und ohne Modellannahmen ermittelt werden können. Die Daten liegen digital vor und die Proben können für weitere Untersuchungen verwendet werden.

2.7.2. Das Micro-CT in der Endodontologie

Die Entwicklung neuerer Computertomografie-Techniken, zum Beispiel das Micro-CT, weisen vielfältige Möglichkeiten für In-vitro-Studien mit endodontologischer Fragestellung auf, da diese Technik non-invasiv ist und eine dreidimensionale Darstellung der anatomischen Strukturen ermöglicht.

Das Micro-CT findet seine Anwendung in endodontischen Studien auf den Gebieten der Zahnanatomie, der Wurzelkanalpräparation, der Wurzelkanalfüllung und der Revisionsbehandlung.

Peters et al. (2000) analysierten mit Hilfe des Micro-CTs die Komplexität des Kanalsystems von Oberkiefermolaren. Das Ergebnis seiner Untersuchung ergab dessen Eignung für experimentelle und anatomische Wurzelkanalstudien.

Gu Y et al. (2010) nutzten diese Technik für die dreidimensionale Ausmessung der Wurzelkanalkrümmung dreiwurziger Unterkiefermolaren. Gu L et al. (2009) analysierten in einer Micro-CT-Studie die Anatomie von Kanalsthmen in den mesialen Wurzeln von Unterkiefermolaren. Dadurch gelang den Autoren die Einteilung in drei verschiedenen Isthmentypen, wie den flossenartigen („fin-shaped isthmus“), den netzartigen („web-shaped isthmus“) und den bandartigen („ribbon-shaped isthmus“) Typ.

Einige Studien nutzten das Micro-CT für die Analyse von Wurzelkanalpräparationen (Peters et al. 2001, 2003, Cheung et al. 2008, Paqué et al. 2009, Moore et al. 2009, Paqué et al. 2010, Yin et al. 2010). Die Scans wurden jeweils vor und nach der Präparation durchgeführt. Dabei konnte in einer dreidimensionalen Darstellung das Kanalvolumen ermittelt werden, welches sich nach der Präparation verändert hatte. Zusätzlich konnten der Dentinabtrag, die Kanalbegradigungen, die Kanaltransportationen und die Bereiche ermittelt werden, die nicht präpariert wurden (Peters et al. 2001, Moore et al. 2009). Paqué et al. (2009) untersuchten mit Hilfe des Micro-CTs sechs verschiedene Präparationstechniken zur Beurteilung des apikalen Kanaldrittels. Dadurch konnten die NiTi-Systeme ermittelt werden, welche die größte bzw. kleinste Volumenzunahme verursachten und die meisten Kanalbereiche unpräpariert ließen.

Die Studie von Jung et al. (2005) ergab, dass das Micro-CT eine sehr genaue und nicht destruktive Methode zur Beurteilung von Wurzelkanalfüllungen ist. Die histologischen Querschnitte der wurzelkanalgefüllten Zähne wurden mit den Aufnahmen und rekonstruierten Bildern des Micro-CT verglichen. Hierbei ermittelte man sehr genaue qualitative und quantitative Übereinstimmungen. Hammad et al. (2009) verglichen mit Hilfe des Micro-CT verschiedene Wurzelkanalfüllmaterialien hinsichtlich der Hohlräume zwischen der Wurzelinnenfläche und dem Füllmaterial.

Hammad et al. (2008) und Roggendorf et al. (2010) nutzten das Micro-CT zur Ermittlung der Wurzelkanalfüllungsreste nach einer Revisionsbehandlung. Der Scan der Wurzeln erfolgte jeweils nach der Obturation und der Revision. Mit Hilfe dieser non-invasiven Methode ist eine genaue Ermittlung der Füllungsreste möglich. Die Volumina der Wurzelkanalfüllungen und der Zahnhartsubstanz können vor und nach der Revision in mm^3 angegeben und dargestellt werden. Somit lässt sich die Effektivität einzelner Revisionstechniken beurteilen. Roggendorf et al. (2010) konnten mit dieser Methode nachweisen, dass die zu revidierenden Kanäle für eine effektive Entfernung der Füllungsreste um zwei Größen mehr als die initiale Präparationsgröße erweitert werden sollten. Eine Studie von Wiseman et al. (2011) ermittelte mit dem Micro-CT die Effektivität einer ultraschallaktivierten Spülung zur Entfernung von Kalziumhydroxid aus Wurzelkanälen. Mit Hilfe dieser Untersuchungsmethode konnte das Volumen von Kalziumhydroxid und deren prozentuale Anteile im Kanalsystem von extrahierten Unterkiefermolaren festgestellt werden.

3. Ziel der Untersuchung

Das Ziel dieser In-vitro-Studie bestand darin, zwei verschiedene Nickel-Titan-Systeme und eine manuelle Technik zur Entfernung von Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen miteinander zu vergleichen. Es sollte eine Methode ermittelt werden, die sicher und effizient das Wurzelkanalfüllmaterial entfernt und somit für den klinischen Alltag geeignet ist. Dabei wurden folgende Parameter überprüft:

1. Ermittlung des Restvolumens von Wurzelkanalfüllmaterial nach der Revision
2. Ermittlung des Dentinabtrages nach der Revision
3. Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge
4. Zeit für die Entfernung der gesamten Guttapercha
5. Ermittlung extrudierten Materials
6. Zwischenfälle (Instrumentenfrakturen, Perforationen, Blockaden, Stufenbildungen, usw.).

4. Material und Methoden

4.1. Versuchsaufbau

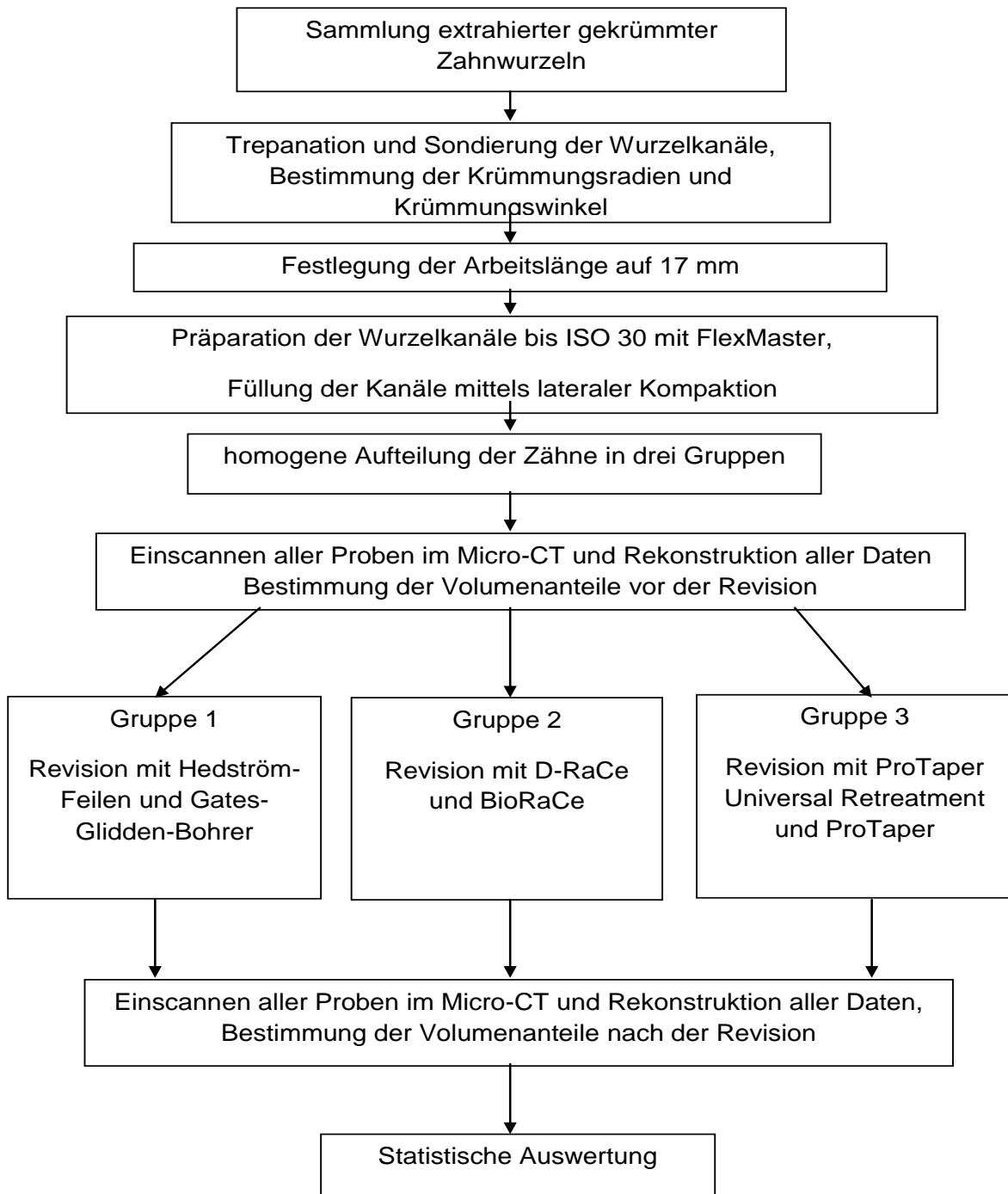


Abb. 4.1: Versuchsaufbau

4.2. Zahnauswahl

Für die Studie wurden 112 extrahierte, menschliche Zähne gesammelt und mit einem wasserfesten Textmarker nummeriert. Die Zähne wiesen keine vorherige Wurzelkanalbehandlung und keine Risse in der Zahnhartsubstanz auf. Weitere Einschlusskriterien waren kariesfreie Wurzeln mit abgeschlossenem Wurzelwachstum und intaktem Apex sowie eine sichtbare Wurzelkrümmung. Zähne mit S-förmigen Wurzelkrümmungen, mit obliterierten Kanalsystemen und mit internen Resorptionen wurden ausgeschlossen.

Von den Unterkiefermolaren wurden ausschließlich mesiale Wurzeln verwendet, die zwei separate Wurzelkanäle aufwiesen. Wurzeln, bei denen ein Isthmus mit einem Reamer der ISO-Größe 10 tastbar war, wurden ausgeschlossen. Die distale Wurzel wurde mit einem rotierenden Diamantschleifer (Komet, Lemgo) unter Wasserkühlung abgetrennt. Bei den Oberkiefermolaren wurden gekrümmte mesiobukcale und/oder palatinale Wurzeln verwendet. Alle verwendeten Prämolaren wiesen nur eine separate Wurzel auf. Insgesamt wurden 57 gekrümmte Wurzeln von 33 Unterkiefer- und 18 Oberkiefer-Molaren sowie 6 Unterkiefer-Prämolaren verwendet. Die Zähne wurden während der gesamten Untersuchung in Leitungswasser feucht gehalten. Es wurden sämtliche Füllungen sowie Karies, Zahnstein und Konkremente entfernt.

Nach Anlegen der Zugangskavitäten mit einem Diamantschleifer wurden die Wurzelkanaleingänge mithilfe eines Batt-Bohrers (Komet) unter Wasserkühlung dargestellt. Die Kanäle wurden mit Reamern ISO-Größen 08 und 10 (VDW, München) auf Gängigkeit überprüft. Bei Vorliegen von zwei Wurzelkanälen in einer Wurzel wurde nur ein Kanal für die Untersuchung verwendet und die Lage des Kanals mit einem wasserfesten Stift auf der Wurzelaußenseite markiert. Anschließend wurde ein Reamer der ISO-Größe 15 in den Kanal eingeführt, bis die Instrumentenspitze am Foramen apicale sichtbar war.

Die Wurzeln wurden mit folgenden Einstellungen in bucco-lingualer (bl) und mesio-distaler (md) Richtung digital geröntgt (Trophy, Croissy-Beoubourg, Frankreich): Strom 4 mA, Spannung 70 kV, Belichtungszeit 0,05 sec. Die Bilder wurden mittels der Merlin Software (Version 2.1, medical digital concepts, Duisburg) betrachtet. Es wurden sowohl der Krümmungswinkel nach Schneider (1971) als auch der

Krümmungsradius nach Schäfer et al. (2002) in bucco-lingualer und in mesio-distaler Projektion mithilfe der Image J Software (NIH, Bethesda, MD, USA) ermittelt. Für die Berechnung dieser beiden Parameter war die Festlegung des Abbildungsmaßstabs notwendig. Dafür wurde bei jeder Röntgenaufnahme ein röntgenopaker Zylinder mit einer Länge von 9,85 mm mit belichtet. Das Bild wurde mit einer Auflösung von 900 x 641 Pixeln analysiert. Nach Markierung der drei von Schneider (1971) angegebenen Punkte wurden die Koordinaten angezeigt und der Krümmungswinkel mithilfe der folgenden Formel berechnet:

Krümmungswinkel:
$$(\alpha) = 180 - (\text{ARCCOS}(\frac{((X1-X2)*(X3-X2)+(Y1-Y2)*(Y3-Y2))}{\sqrt{((X1-X2)^2+(Y1-Y2)^2)} \cdot \sqrt{((X3-X2)^2+(Y3-Y2)^2)}}) * 180 / \text{PI}()$$

Punkt A = (X1, Y1)

Punkt B = (X2, Y2)

Punkt C = (X3, Y3)

Punkt A entspricht dem Kanaleingang, Punkt B dem Beginn der Krümmung des Wurzelkanals und Punkt C dem röntgenologischen Apex. Somit befindet sich der gerade Anteil des Kanals zwischen den Punkten A und B und der gekrümmte Teil zwischen B und C (siehe Abb. 4.2).

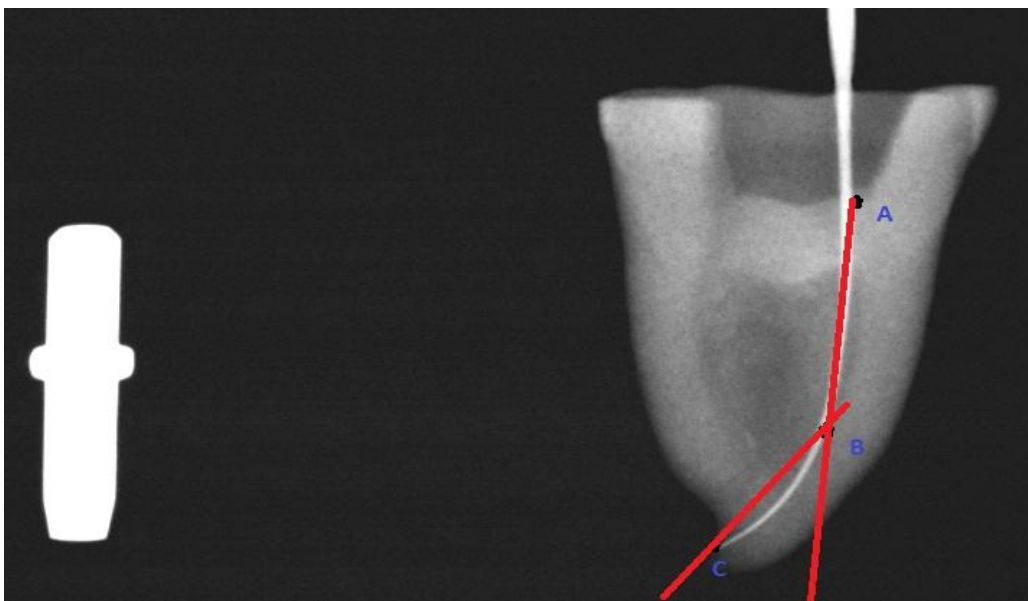


Abb. 4.2: Bestimmung des Krümmungswinkels nach Schneider (1971)

Der Krümmungsradius wurde anhand der festgelegten Punkte und des ermittelten Krümmungswinkels mithilfe des Bogenmaßes (Schäfer et al. 2002) und folgender Formel berechnet: $r = \frac{s}{2 \sin \alpha}$, (s entspricht dem Abstand zwischen Punkt A und Punkt B).

$$\text{Krümmungsradius} = \sqrt{(X_3 - X_2)^2 + (Y_3 - Y_2)^2} / 2 \cdot \sin(\text{Krümmungswinkel} \cdot \pi / 180)$$

Zusätzlich wurde bei jedem Röntgenbild der röntgenopake Zylinder als Referenz vermessen, um den genauen Abbildungsmaßstab zu errechnen und diesen bei der Analyse von Winkel und Radius zu berücksichtigen. Dabei wurden sowohl Krümmungswinkel als auch –radien unabhängig von zwei kalibrierten Zahnärzten bestimmt und anschließend die Mittelwerte beider Messungen errechnet. Insgesamt wurden pro Wurzelkanal vier Parameter berechnet (Krümmungsradius und –winkel sowohl in bucco-lingualer und mesio-distaler Projektion) und in einer Excel-Tabelle zusammengefasst. Dabei wurden ausschließlich Zähne verwendet, die mindestens aus einer Richtung einen Winkel über 20° und einen Krümmungsradius unter 12 mm aufwiesen.

Anschließend wurde ein Reamer der ISO-Größe 10 (VDW) bis zum Foramen apicale in den Wurzelkanal eingebracht und die Zahnkrone abgetrennt, so dass eine standardisierte Wurzelkanallänge von 18 mm resultierte. Die Arbeitslänge wurde 1 mm kürzer auf 17 mm festgelegt.

Anschließend erfolgte unter Berücksichtigung der Krümmungswinkel und –radien die homogene Aufteilung der Wurzeln in drei Gruppen. Für die Einteilung wurden sowohl beide Winkel als auch beide Radien berücksichtigt, so dass sich kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen ergab (biometrische Auswertung). Jede der drei Gruppen bestand aus insgesamt 19 Zahnwurzeln (11 Wurzeln unterer Molaren, 6 Wurzeln oberer Molaren und zwei Unterkiefer-Prämolarenwurzeln). Die Mittelwerte der einzelnen Zahngruppe und die gesamten Durchschnittswerte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

	Gruppe1				Gruppe2				Gruppe3			
Zahngruppe	Winkel bl	Radius bl	Winkel md	Radius md	Winkel bl	Radius bl	Winkel md	Radius md	Winkel bl	Radius bl	Winkel md	Radius md
UK Molaren	27,9	8,1	19,3	12,7	26,9	10,4	20,1	12,6	28,6	7,5	16,2	16,8
OK Molaren	22,9	7,7	18,7	21,3	24,1	7,6	16,4	15,6	22,2	15,3	21	9,1
Prämolaren	21,2	10,7	15,5	6,8	20,6	10,8	19,7	11,2	22,2	7	15,2	9,3
gesamt	25,6	8,2	18,7	14,8	25,4	9,5	18,9	13,4	25,9	9,9	17,6	13,5

Tabelle 4.1: Homogene Einteilung der Gruppen nach Krümmungsradius und -winkel

4.3. Präparationsprotokoll

Die Präparation der Wurzelkanäle erfolgte mittels Gates-Glidden-Bohrern (Komet, Lemgo) und FlexMaster-Nickel-Titan-Instrumenten (FM) (VDW), wobei die Arbeitslänge (AL) auf 17 mm standardisiert wurde. Die Nickel-Titan-Instrumente wurden mit dem Endo IT professional Motor (VDW) mit 280 U/min^{-1} betrieben. Nach jedem Instrument erfolgte eine Spülung mit 2 ml 1%igem Natriumhypochlorit (Hedinger, Stuttgart) durch eine 5 ml Spritze mit einer Spülkanüle mit einem Außendurchmesser von 0,3 mm (NaviTip, Ultradent, South Jordan, UT, USA). Die Abschlusspülung erfolgte mit 5 ml 20%igem EDTA (Ilege artis Pharma, Dettenhausen) und mit 5 ml 1%igem Natriumhypochlorit. Die Spülkanüle wurde dabei auf Arbeitslänge minus 2-3 mm eingebracht.

Die Präparation erfolgte standardisiert nach folgendem Protokoll (Tabelle 4.2.):

Instrument	Arbeitslänge (AL)
Gates-Glidden-Bohrer Größe 3	AL - 12 mm
Gates-Glidden-Bohrer Größe 2	AL - 10 mm
FM 30/.06	AL - 8 mm
FM 25/.06	AL - 6 mm
FM 20/.06	AL - 4 mm
FM 30/.04	AL - 2 mm
FM 25/.04	AL
ggf. FM 20/.04	AL
ggf. FM 20/.02	AL
ggf. FM 25/.02	AL
FM 30/.02	AL

Tabelle 4.2: Standardisierte Reihenfolge der Arbeitsschritte mit FlexMaster-Instrumenten (FM) bei der Wurzelkanalpräparation

Nach der Abschlusspülung wurden die Wurzelkanäle mit Papierspitzen der ISO-Größe 20 bis 30 getrocknet.

4.4. Wurzelkanalfüllung

Anschließend erfolgte die Obturation der präparierten Wurzelkanäle mittels lateraler Kompaktion von Guttapercha (VDW) und AH Plus Sealer (Dentsply DeTrey, Konstanz). Der auf Arbeitslänge eingepasste Masterpoint (ISO-Größe 30) wurde mit Sealer benetzt und in den Kanal eingebracht. Unter Verwendung eines Fingerspreaders mit der ISO-Größe 20 wurde die Guttapercha lateral verdichtet, wobei Guttaperchaspitzen der ISO-Größe 15 als Zusatzstifte verwendet wurden. Der Füllvorgang wurde beendet, wenn der Spreader nur noch weniger als 5 mm in den Kanal eingebracht werden konnte. Die Guttapercha wurde mit einem erhitzten

Plugger am Kanaleingang abgetrennt und nochmals verdichtet. Die Länge der Wurzelkanalfüllung betrug dabei $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Die Qualität der Obturation wurde jeweils mit Hilfe einer mesio-distalen und bucco-lingualen Röntgenaufnahme überprüft. Bei sichtbaren Inhomogenitäten wurden die Hohlräume mit akzessorischen Guttaperchastiften und Sealer aufgefüllt und eine erneute Röntgenkontrolle aus zwei Ebenen durchgeführt. Da bei sechs Zähnen weiterhin Inhomogenitäten der Wurzelkanalfüllung festgestellt wurden, erfolgte das Aussortieren dieser Proben. Anschließend bestand jede Gruppe aus 19 Wurzelkanälen. Die Wurzelkanäle wurden provisorisch mit Cavit (3M ESPE, Seefeld) verschlossen und bis zur vollständigen Aushärtung des Sealers für zwei Wochen bei 37 °C gelagert.

4.5 Der Micro-CT Scan

Der Micro-Computertomograf der Firma GE Medical Systems (Ontario, Kanada) wurde für das Einscannen und die dreidimensionale Rekonstruktion der Proben verwendet (siehe Abb. 4.3).



Abb. 4.3: Micro-Computertomograf, eXplore locus SP micro-CT (GEHC, Ontario, Kanada)

Da in dem verwendeten Objektträger vier getrennte Kammern vorhanden waren, wurden jeweils vier Proben gleichzeitig gescannt (Abbildung 4.4).



Abb. 4.4: Kammer mit Objektträger und Filtrerrad

Für eine Identifikation der Proben wurde unter jeder Kammer ein röntgenologisch sichtbarer Markierungspunkt eingefräst. Somit war es möglich, den jeweiligen Zahn der entsprechenden Kammer zuzuordnen, wobei dieser Vorgang protokolliert wurde. Anschließend wurden die Einstellungsparameter und die Position der Objekte durch eine kurze Röntgenaufnahme, einen Übersichtsscan, überprüft. Nach Positionierung des Filters wurde der Scannvorgang gestartet und die Scannummer mit Namen und Datum eingegeben. Zur vollständigen Erfassung des gewünschten Objektes, war eine Korrektur durch eine Mittenverschiebung des Objektträgers notwendig. Danach erfolgte der Scan mit folgenden Parametern:

Einstellungsparameter:	Röhrensannung:	90 kV
	Stromstärke:	0,08 mA
	Anzahl der Ansichten:	900
	Belichtungszeit:	1600 msec
	Scan-Technik:	360 Grad
	Detektor-Modus:	2 x 2
	Effektive Pixelgröße:	0,029 mm.

Die ermittelten Projektionen wurden auf der Festplatte des angeschlossenen Computers, unter Angabe der jeweiligen Probennummer, des Benutzernamens und des Scan-Datums, gespeichert. Die ersten Bilder sind Grob-Datensätze (MiniVol) und dienen einer dreidimensionalen Ansicht des Objektes. Diese MiniVol zeigen ein Fünftel der gewünschten Auflösung. Dieser grobe Datensatz wurde in die vier einzelnen Zähne zerlegt und die Koordinaten der jeweils markierten Proben gespeichert. Danach erfolgte die Überführung in ein Rekonstruktionsfenster sowie eine Speicherung unter der Nummer des entsprechenden Zahnes. Jedes dieser Bilder wurde einzeln durch eine Hochauflösungs-Software (Reconstruction Utility, GE) mit einer Auflösung von 29 μm rekonstruiert. Die Analyse der Datensätze erfolgte mittels der MicroView Software, Version 2.1.2. (GE Medical Systems, Abbildung 4.5).

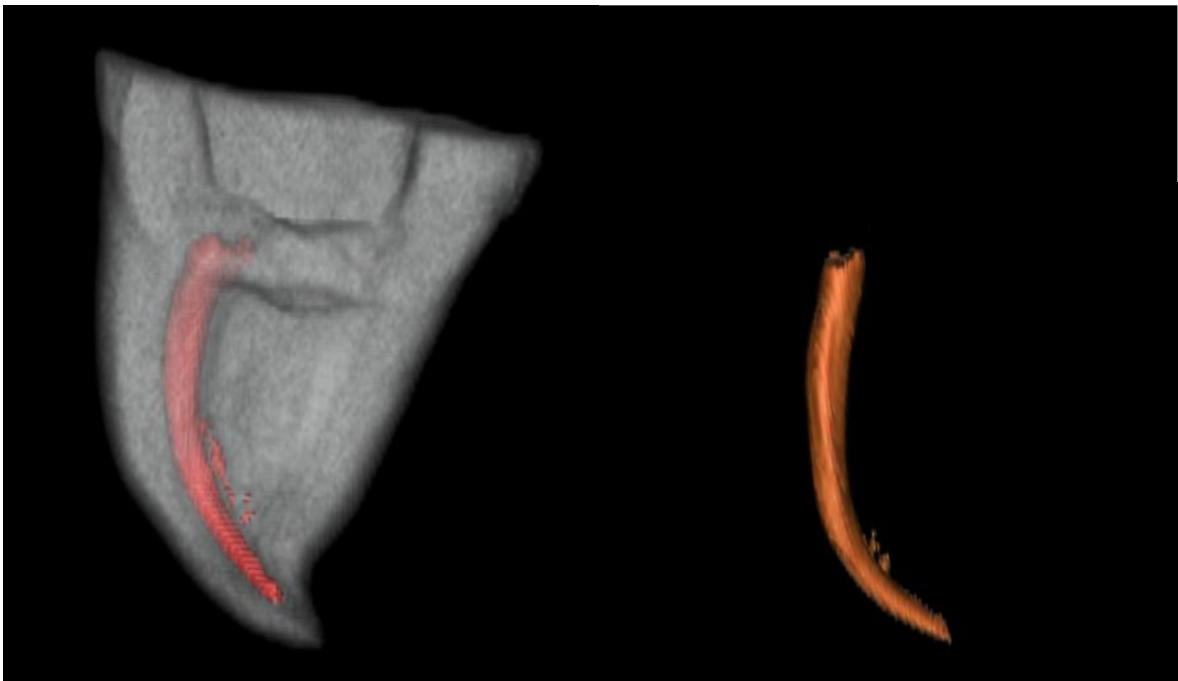


Abb. 4.5: Dreidimensionale Ansicht eines Zahnes mit Wurzelkanalfüllung links und die Darstellung der Wurzelkanalfüllung rechts mit MicroView 2.1.2 (GEHC)

Die rekonstruierten Tomogrammdaten wurden auf einer externen Festplatte gespeichert.

4.6. Volumetrie

Für die Volumenbestimmung für Zahnhartsubstanz und Wurzelkanalfüllung wurden die zu untersuchenden Zähne innerhalb der Tomogrammdaten als ROI (Region Of Interest) markiert. Das ROI umfasste jeweils eine einzelne Probe, inklusive des Wurzelfüllmaterials (Abbildung 4.6).

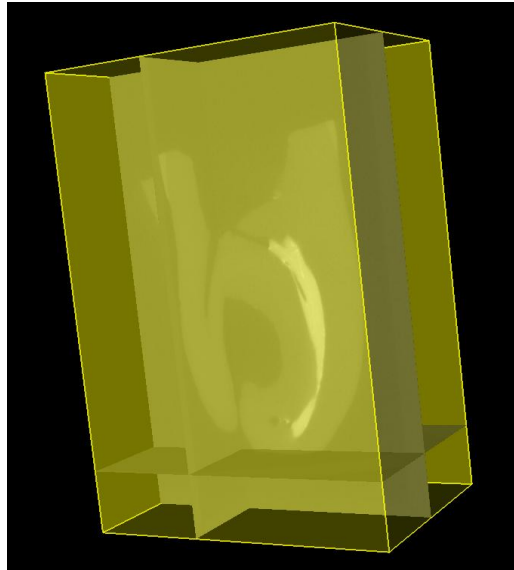


Abb. 4.6: Erstellung eines ROI (Region Of Interest) um den zu analysierenden Zahn mit Hilfe der MicroView-Software 2.1.2

Anschließend wurde ein Histogramm für die markierte Region erstellt (Abbildung 4.7).

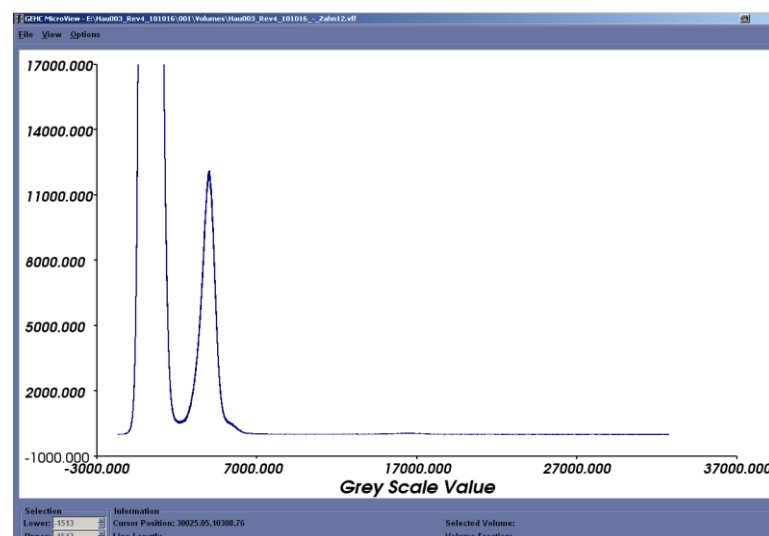


Abb. 4.7: Histogramm der durch das ROI gefassten Region

Dieses Histogramm besteht aus mehreren Kurven, wobei die unterschiedlichen Grauwerte des zu untersuchenden Zahnes die Größe der Kurve bestimmen. Da Schmelz, Dentin, Luft und Wurzelkanalfüllmaterial unterschiedliche Abschwächungskoeffizienten aufweisen, konnten die einzelnen Bestandteile des Zahnes separat dargestellt werden. Hierfür wurden die Umkehrpunkte der Kurven und der Endpunkt des Graphen festgelegt und die jeweiligen Anteile markiert. Diese Auswertung wurde unabhängig von zwei kalibrierten Zahnärzten vorgenommen. Die markierten Kurven konnten durch die Option „Highlight selected region“ dargestellt werden (Abbildung 4.8). Der eingefärbte Opazitätsbereich des Histogramms ermöglichte eine Volumenbestimmung und die Darstellung des markierten Bereichs in den rekonstruierten Bildern. Dadurch wurde nochmals überprüft, ob das ermittelte Volumen auch dem betreffenden Bereich des Zahnes entsprach. Diese Volumenmessungen wurden sowohl für die Wurzelkanalfüllung als auch für die Zahnhartsubstanz durchgeführt. Die Daten wurden in einer Excel-Tabelle (siehe Anhang) zusammengefasst und die Mittelwerte aus den Werten beider Untersucher berechnet. Der Scan und die Volumetrie erfolgten für jede Probe prä- und postoperativ.

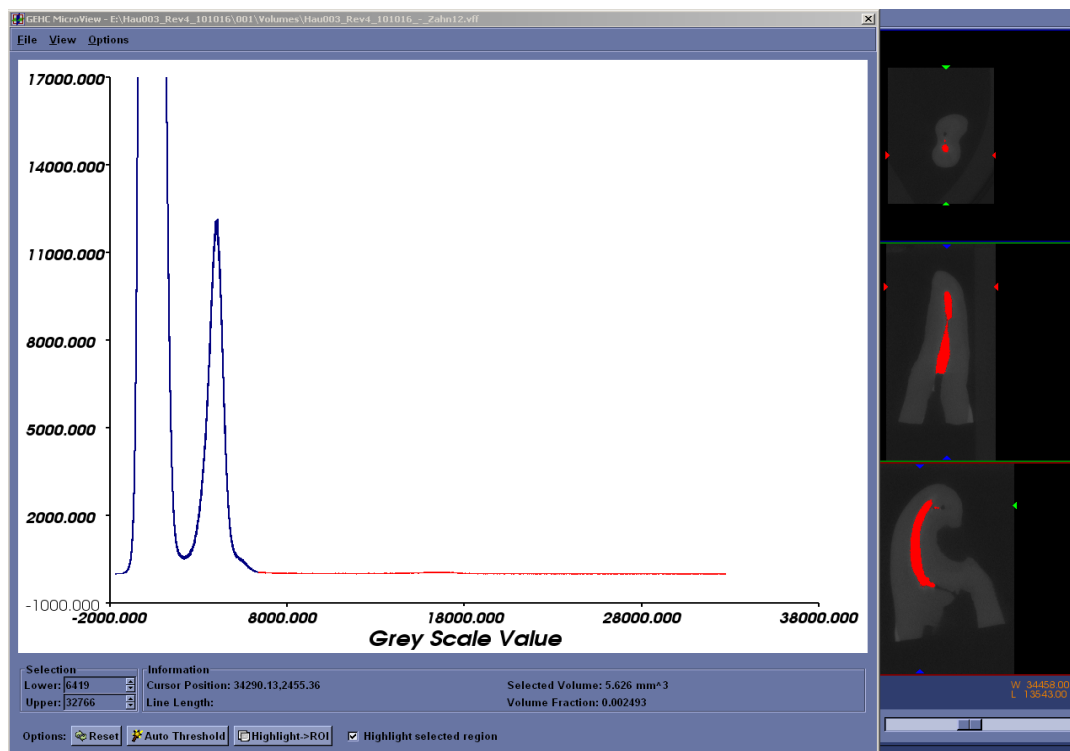


Abb. 4.8: Ermittlung des Volumens der Wurzelkanalfüllung durch eine rote Markierung der entsprechenden Anteile im Histogramm und die Überprüfung in den rekonstruierten Bildern (rechts im Bild)

4.7 Revision

Die Entfernung der Guttapercha erfolgt mittels dreier verschiedener Techniken:

1. Gruppe: Gates-Glidden-Bohrer (Dentsply Maillefer) und Hedström-Feilen (VDW)
2. Gruppe: D-RaCe- und BioRaCe-NiTi-Instrumente (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz)
3. Gruppe: ProTaper-Universal-Retreatment- und ProTaper-NiTi-Instrumente (Dentsply Maillefer).

Das Ziel dieser Studie war es, die Effektivität und die Sicherheit der jeweiligen Revisionstechnik zu untersuchen. Dafür wurde die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) und die Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials bestimmt (T2). T-gesamt entspricht dem gesamten Zeitaufwand, der für die Revision benötigt wurde, inklusive T1 und T2. Die Spülzeit und die Dauer für den Instrumentenwechsel wurden nicht berücksichtigt. Die Zeitmessung erfolgte digital mit einer Stoppuhr. Die apikale Präparation endete in allen drei Gruppen mit einem Instrument der ISO-Größe 40 und betrug demnach zwei Größen mehr als der ursprüngliche Präparationsquerschnitt (ISO-Größe 30).

Die Revision wurde beendet, wenn Füllmaterial weder am Instrument, im Wurzelkanal noch in der Spülflüssigkeit mit bloßem Auge erkennbar war. Zum initialen Erweichen der Guttapercha wurde ein Tropfen Eukalyptol (Klinikumsapotheke Göttingen) für zwei Minuten auf die Wurzelkanalfüllung appliziert. Nach jedem Instrumentenwechsel wurden die Wurzelkanäle mit 2 ml NaOCl (1%) (Hedinger, Stuttgart) per Hand mit einer Kanülengröße von 0,3 mm (NaviTip, Ultradent, South Jordan, UT, USA) gespült. Ein Instrumentenwechsel erfolgte, wenn ein weiteres Vordringen in den Wurzelkanal nicht möglich war. Jedes Instrument wurde für vier Wurzelkanäle verwendet. Eine Ausnahme bildete die DR2-Feile (D-RaCe), die laut Herstellerangaben für eine einmalige Verwendung vorgesehen ist. Deformierte Instrumente wurden bereits vor viermaliger Verwendung ausgetauscht.

Der extrudierte Debris wurde mit einer Ja/Nein-Entscheidung notiert.

Weiterhin wurden prozedurale Fehler, wie z. B. Perforationen, Wurzellängsfrakturen sowie Instrumentenfrakturen, notiert. Beim Auftreten einer Instrumentenfraktur,

wurde das Fragment mit Hedström-Feilen entfernt, die dafür benötigte Zeit aber nicht zur Arbeitszeit addiert. Zum Abschluss der Behandlung erfolgte eine Spülung mit 5 ml EDTA (Lege artis, Dettenhausen) und 5 ml NaOCl mit einer Spülkanüle mit dem Außendurchmesser von 0,3 mm (NaviTip) und die Trocknung der Kanäle mit Papierspitzen.

Die Revisionen wurden von einem mit den jeweiligen Systemen vertrauten Behandler durchgeführt. Alle rotierenden Instrumente wurden nach Herstellerangaben betrieben. Die Revisionsprotokolle sind den Tabellen 4.3, 4.4 und 4.5 zu entnehmen.

Gruppe 1: Revision mit Gates-Glidden-Bohrern und Hedström-Feilen:

Instrument	Umdrehungszahl	Einsatzlänge
Gates-Glidden-Bohrer III	2000 Umin ⁻¹	AL – 8 mm
Gates-Glidden-Bohrer II	2000 Umin ⁻¹	AL – 6 mm
Hedström-Feile 30/.02	Crown down	Ggf. auf AL
Hedström-Feile 25/.02	Crown down	Ggf. auf AL
Hedström-Feile 20/.02	Crown down	AL
Hedström-Feile 25/.02	Apikale Aufbereitung	AL
Hedström-Feile 30/.02	Apikale Aufbereitung	AL
Hedström-Feile 35/.02	Apikale Aufbereitung	AL
Hedström-Feile 40/.02	Apikale Aufbereitung	AL

Tabelle 4.3: Arbeitsschritte der Revision mit Hedström-Feilen und Gates-Glidden-Bohrern (AL=Arbeitslänge)

Gruppe 2: Revision mit D-RaCe- und Bio-RaCe-Feilen:

Instrument	Umdrehungszahl und Drehmoment	Einsatzlänge
DR1 (D-RaCe)	800 Umin ⁻¹ – 150 gcm	AL – 6 mm
DR2 (D-RaCe)	800 Umin ⁻¹ – 70 gcm	AL
BR3: 25/.06	600 Umin ⁻¹ – 100 gcm	AL
BR4: 35/.04	600 Umin ⁻¹ – 100 gcm	AL
BR5: 40/.04	600 Umin ⁻¹ – 100 gcm	AL

Tabelle 4.4: Arbeitsschritte der Revision mit D-RaCe (DR) und BioRaCe (BR), (AL=Arbeitslänge)

Gruppe 3: Revision mit ProTaper Universal Retreatment und ProTaper:

Instrument	Umdrehungszahl und Drehmoment	Einsatzlänge
D1: Größe 30	300 Umin ⁻¹ – 183 gcm	AL – 7 mm
D2: Größe 25	300 Umin ⁻¹ – 145 gcm	AL – 3,5 mm
D3: Größe 20	300 Umin ⁻¹ – 88 gcm	Al
F2 (ProTaper)	300 Umin ⁻¹ – 145 gcm	Al
F3 (ProTaper)	300 Umin ⁻¹ – 183 gcm	Al
F4 (ProTaper)	300 Umin ⁻¹ – 183 gcm	Al

Tabelle 4.5: Arbeitsschritte der Revision mit ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen (D1-D3) und ProTaper-Feilen (F2-F4), (AL=Arbeitslänge)

Alle rotierenden Instrumente wurden mit dem EndoIT Professional Motor (VDW) betrieben. Nach Abschluss der Revisionen wurden die Wurzelkanäle getrocknet und

die Proben erneut mit Hilfe des Micro-CT eingescannt. Die Rekonstruktionen und Auswertungen der Bilder erfolgten nach dem bereits beschriebenen Prinzip.

4.8 Statistische Auswertung

Die Gruppeneinteilung erfolgte durch eine parametrische Varianzanalyse. Die Ergebnisse wurden mit ANOVA, einer Varianzanalyse, analysiert und mit Tukey Kramer im Paarvergleich adjustiert. Für die Analyse wurde das SAS 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) verwendet.

5. Ergebnisse

5.1. Auswertung der Gruppeneinteilung

Die Zähne wurden entsprechend der Krümmungswinkel und –radien in bukkolingualer und mesio-distaler Richtung in drei gleiche Gruppen aufgeteilt. Die Homogenität dieser vier Parameter wurde parametrisch mit einer ANOVA Varianzanalyse überprüft. Es wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Wurzelkanalkrümmung (bl: $p = 0,9739$, md: $p = 0,8787$) und des Krümmungsradius (bl: $p = 0,7646$, md: $p = 0,953$) zwischen den drei Gruppen festgestellt. Die mittlere Wurzelkanalkrümmung betrug $25,6^\circ$ in bukko-lingualer (bl) und $18,4^\circ$ in mesio-distaler (md) Richtung. Der mittlere Krümmungsradius betrug in bukko-lingualer Richtung $9,2$ mm und in mesio-distaler Richtung $13,9$ mm. Jeder Zahn wies mindestens aus einer Richtung einen Krümmungswinkel von über 20° und einen Krümmungsradius von unter 12 mm auf. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Gruppe	Winkel (bl) in ° Mean \pm SD	Radius (bl) in mm Mean \pm SD	Winkel (md) in ° Mean \pm SD	Radius (md) in mm Mean \pm SD
HF	$25,6 \pm 6,7$	$8,2 \pm 1,9$	$18,7 \pm 6,7$	$14,8 \pm 19,3$
D-R	$25,4 \pm 6,9$	$9,5 \pm 5,3$	$18,9 \pm 10,2$	$13,4 \pm 8,3$
PTR	$25,9 \pm 8,1$	$9,9 \pm 11,5$	$17,6 \pm 7,2$	$13,6 \pm 15,6$
p – Wert	0,9739	0,7646	0,8787	0,953

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Mittelwerte (Mean), Standardabweichungen (SD) und Signifikanzen von Krümmungswinkel und Krümmungsradien der drei experimentellen Gruppen (bl = bukko-linguale Richtung, md = mesio-distale Richtung, HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

5.2. Deskriptive Angaben

Alle Daten wurden nach einer ANOVA (Varianzanalyse) analysiert und mit dem Tukey-Kramer-Test im Paarvergleich adjustiert.

5.3. Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)

In Abbildung 5.1 ist die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) für die drei Revisionstechniken grafisch dargestellt.

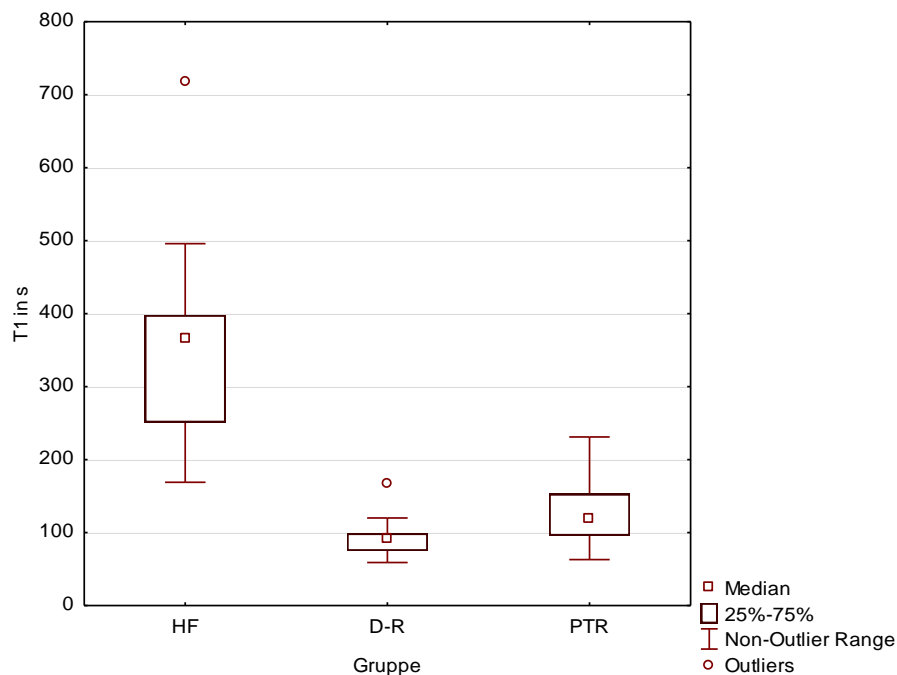


Abb. 5.1: Box-Plot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge

(HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Der durchschnittliche Zeitaufwand war mit D-RaCe-Instrumenten (92,0 s) geringer als mit ProTaper-Feilen (129,2 s). Im Durchschnitt fiel der Zeitbedarf (T1) bei der Revision mit Hedström-Feilen (349,8 s) größer aus als bei den beiden anderen

Gruppen. Die Abbildung 5.2 zeigt die Mittelwerte der einzelnen Revisionstechniken für die Zeit T1.

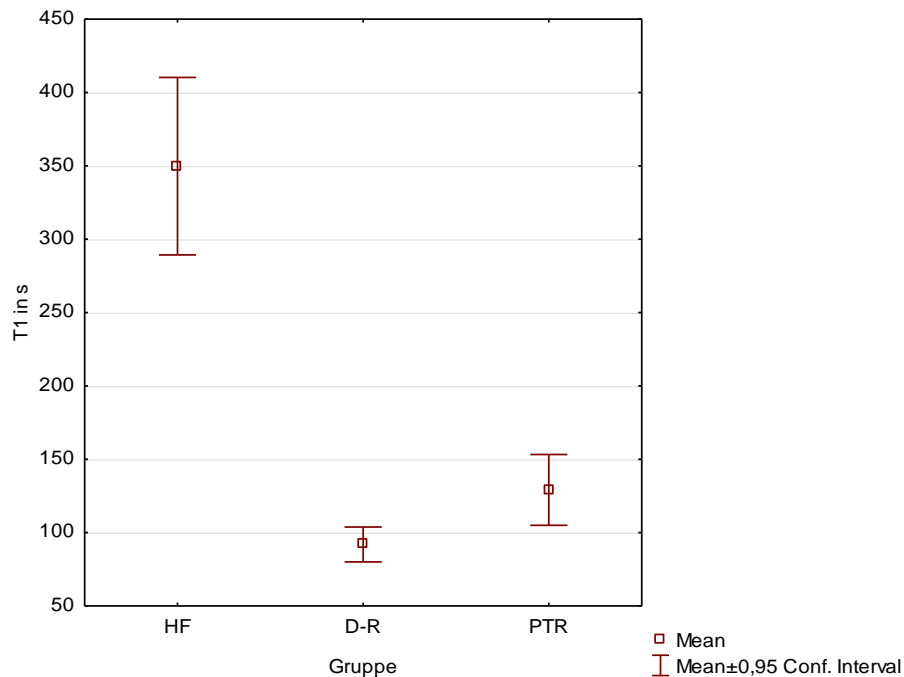


Abb. 5.2: Mean-Plot-Diagramm für die Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Der Paarvergleich der Gruppen mit Hilfe des Tukey-Kramer-Tests ergab eine signifikant kürzere Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (AL) mit D-RaCe-Instrumenten im Vergleich zu ProTaper-Instrumenten ($p = 0,0144$). Die Verwendung von ProTaper-Feilen ermöglicht wiederum ein signifikant schnelleres Erreichen der AL als mit Hedström-Feilen ($p < 0,0001$). In der Kreuztabelle 5.2 sind die signifikanten Unterschiede fett hervorgehoben.

	HF	D-R
PTR	p < 0,0001	p = 0,0144
D-R	p < 0,0001	

Tabelle 5.2: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der T1-Werte (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

5.4 Zeit vom Erreichen der Arbeitslänge bis zum Ende der Revision (T2)

In Abbildung 5.3 sind die Werte für die Zeit T2 grafisch dargestellt. Dies entspricht der Zeit vom Erreichen der Arbeitslänge bis zum Ende der Revision inklusive der Präparation bis Größe 40.

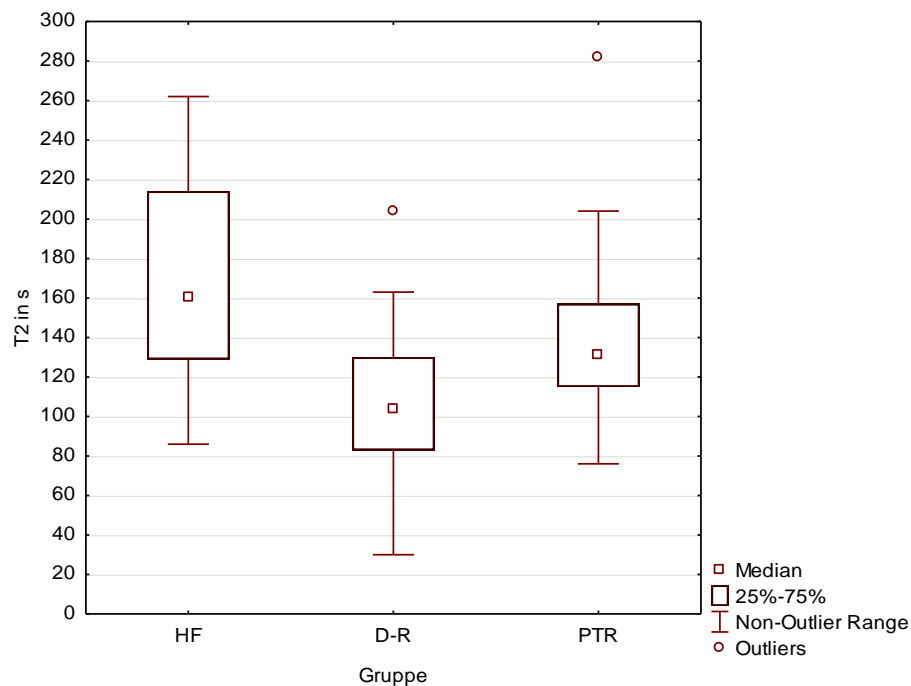


Abb. 5.3: Box-Plot-Diagramm für die Zeit T2 (in s) bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Der durchschnittliche Zeitaufwand (T2) ist bei der Verwendung von D-RaCe/Bio-RaCe-Instrumenten (108 s) geringer als mit ProTaper-Retreatment/ProTaper-

Instrumenten (142,8 s) und mit Handfeilen (167,36 s). Die Mittelwerte sind in Abbildung 5.4 grafisch dargestellt.

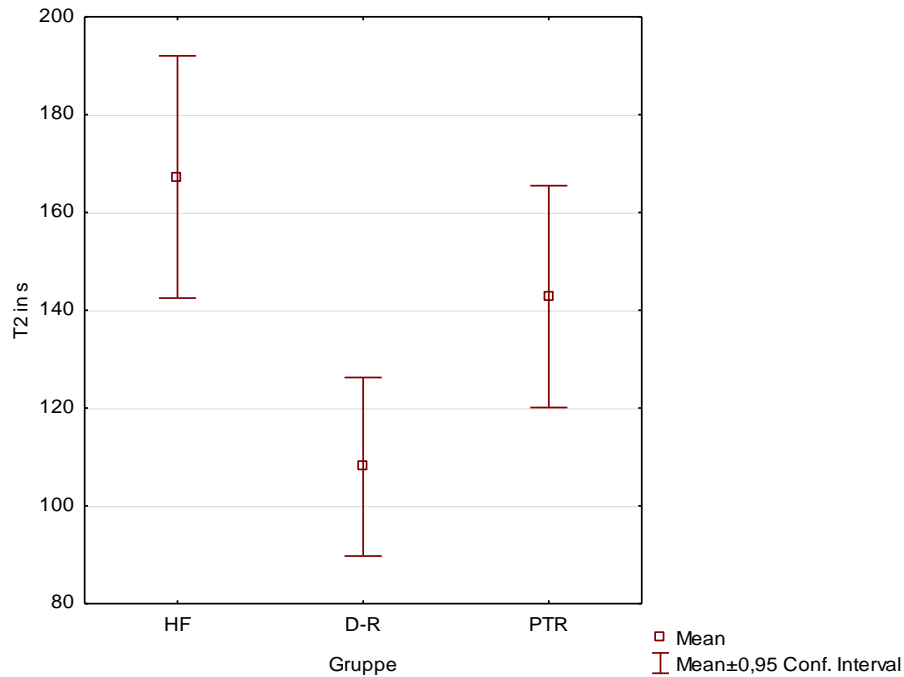


Abb. 5.4: Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T2 (in s) bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

D-RaCe-/BioRaCe-Instrumente schnitten bezüglich der Zeit T2 signifikant besser ab als Hedström-Feilen ($p = 0,0005$) und ProTaper-Retreatment-/ProTaper-Instrumente ($p = 0,0394$). Keinen signifikanten Unterschied gab es zwischen den Revisionen mit Handfeilen und ProTaper ($p = 0,2847$). Die Tabelle 5.3 zeigt die signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen.

	HF	D-R
PTR	$p = 0,2847$	$p = 0,0394$
D-R	$p = 0,0005$	

Tabelle 5.3: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der Zeit vom Erreichen der AL bis zur Beendigung der Revision (T₂) (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

5.5. Zeit für die gesamte Revision (T-gesamt)

In der Abbildung 5.5 ist die Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung mit den drei verschiedenen Instrumenten (T-gesamt) dargestellt.

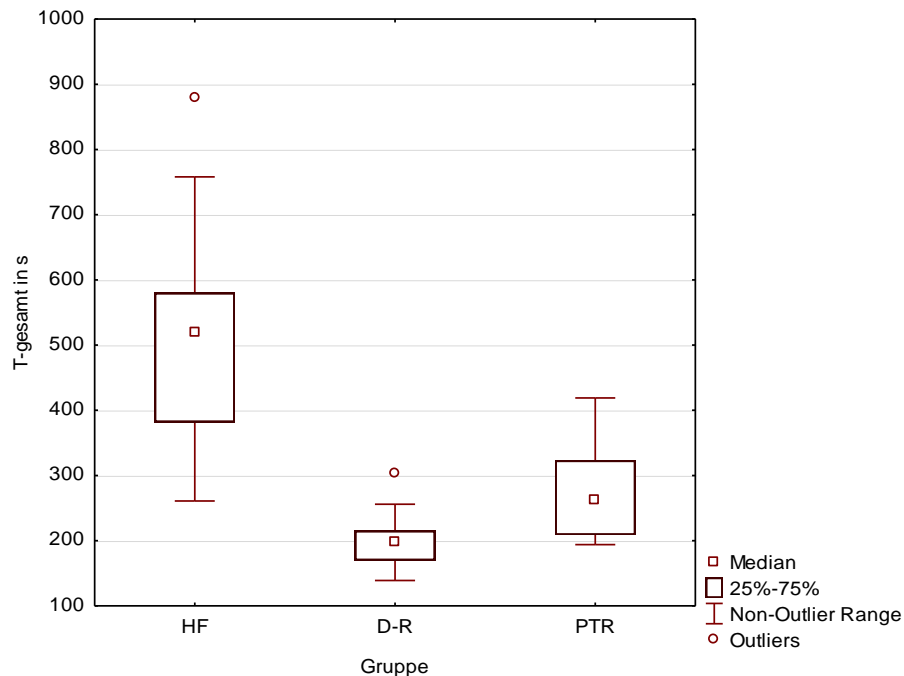


Abb. 5.5: Box-Plot-Diagramm für die Zeit T-gesamt (in s) für die gesamte Revisionsbehandlung

(HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Der durchschnittliche Zeitaufwand betrug mit Hedström-Feilen 517,1 s, mit D-RaCe-Instrumenten 200,0 s und mit ProTaper-Feilen 272,0 s (Abbildung 5.6).

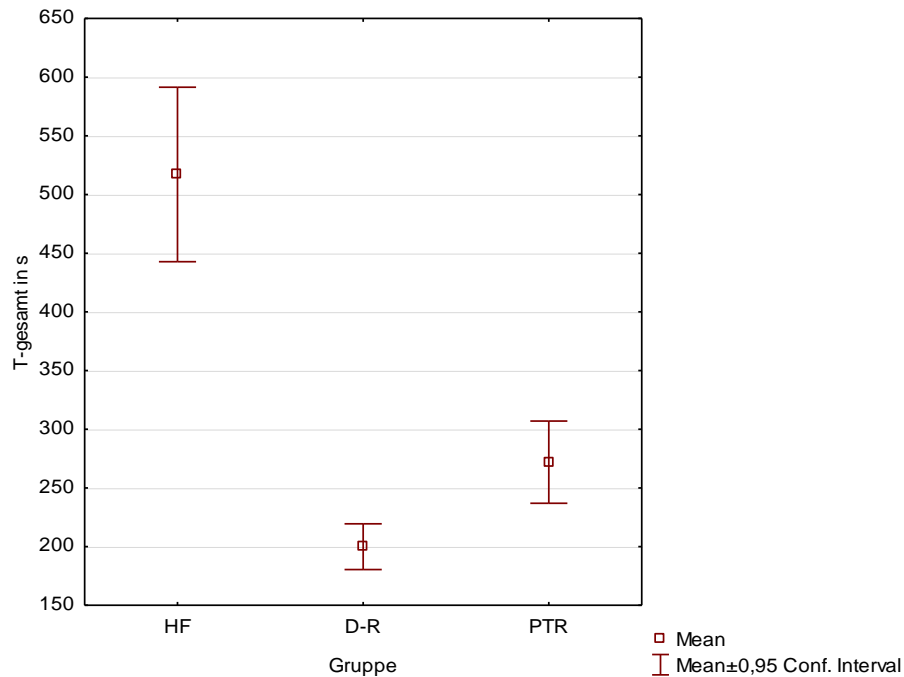


Abb. 5.6: Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T-gesamt (in s) für die gesamte Revisionsbehandlung

(HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung (T-gesamt) war mit BioRaCe-Instrumenten signifikant kürzer als mit Hedström-Feilen ($p < 0,0001$) und mit ProTaper-Instrumenten ($p = 0,0012$). Die Entfernung der Wurzelkanalfüllung dauerte mit Handinstrumenten signifikant am längsten ($p < 0,0001$). Die Kreuztabelle 5.4 zeigt die Signifikanzen.

	HF	D-R
PTR	p < 0,0001	p = 0,0012
D-R	p < 0,0001	

Tabelle 5.4: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der gesamten Revisionszeit (T-gesamt) (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Tabelle 5.5 fasst alle Mittelwerte und Standardabweichungen bezüglich der gemessenen Zeiten T1, T2 und T-gesamt zusammen.

	HF (Mean \pm SD)	DR (Mean \pm SD)	PTR (Mean \pm SD)
T1 in s	349,8 \pm 125,6	92 \pm 24,7	129,2 \pm 50,1
T2 in s	167,3 \pm 51,4	108 \pm 37,9	142,8 \pm 47,1
T-gesamt in s	517,1 \pm 154,2	200 \pm 40,4	272 \pm 72,7

Tabelle 5.5: Übersicht der Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (SD) bezüglich der Zeiten T1, T2 und T-gesamt (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

5.6. Dentinabtrag während der Revision

Die Abbildung 5.7 stellt den Dentinabtrag während der Revision (in mm³) grafisch dar.

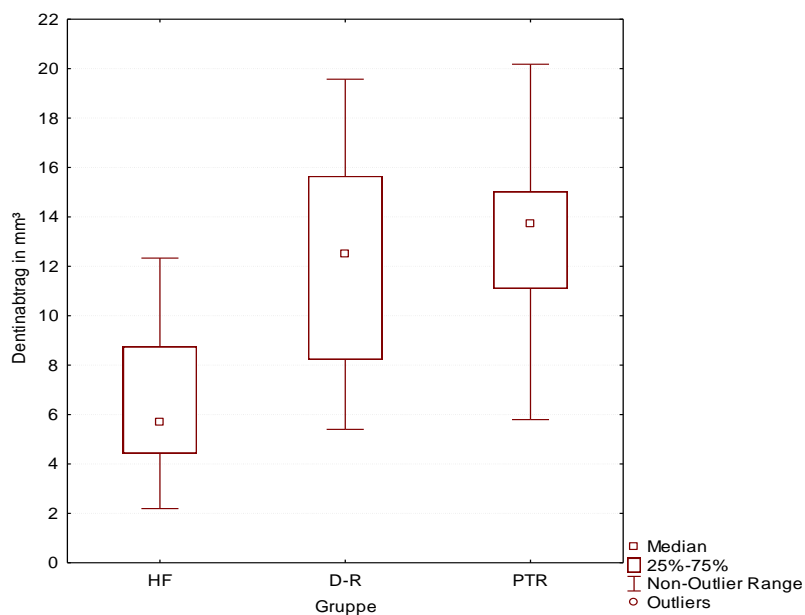


Abb. 5.7: Box-Plot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags (in mm³) während der Revision

(HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Auswertung der am Micro-CT erstellten Bilder erfolgte mittels der MicroView-Software (GE). Daraus ergibt sich, dass der geringste Substanzverlust bei der Revision mit Hedström-Feilen (durchschnittlich 6,33 mm³) lag, gefolgt von D-RaCe-/BioRaCe-Instrumenten mit 12,03 mm³. Der größte durchschnittliche Dentinverlust wurde nach der Anwendung der ProTaper-Feilen (mit 13,14 mm³) ermittelt. Die Mittelwerte und Konfidenzintervalle sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

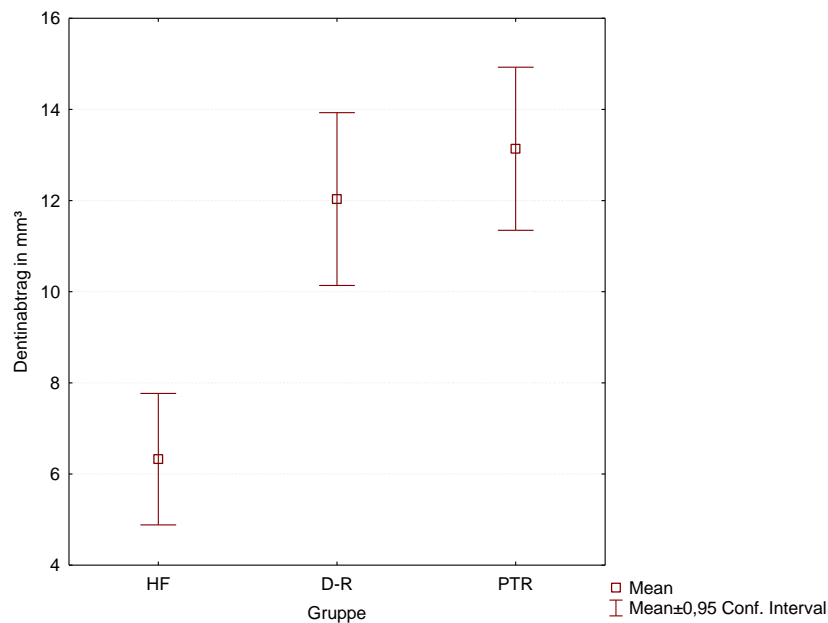


Abb. 5.8: Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags (in mm³) während der Revision (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Tabelle 5.6 zeigt die Mittelwerte des Zahnhartsubstanzverlustes (in mm³) sowie die Standardabweichungen.

	HF (Mean ± SD)	DR (Mean ± SD)	PTR (Mean ± SD)
Dentinabtrag (in mm ³)	6,33 ± 3	12,03 ± 3,94	13,14 ± 3,71

Tabelle 5.6: Übersicht der Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (SD) bezüglich des Dentinabtrages in mm³ (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Revision mit Hedström-Feilen trug im Vergleich zu D-RaCe-Instrumenten und den ProTaper-Feilen signifikant weniger Dentin ab ($p < 0,0001$). Es bestand kein signifikanter Unterschied bezüglich des Dentinabtrags zwischen ProTaper und D-RaCe ($p < 0,6491$). In der Tabelle 5.7 sind die signifikanten Unterschiede hervorgehoben.

	HF	D-R
PTR	$p < 0,0001$	$p = 0,6491$
D-R	$p < 0,0001$	

Tabelle 5.7: Übersicht der Signifikanzen bezüglich des Dentinabtrags (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

5.7. Wurzelkanalfüllungsreste nach der Revision

Die Abbildung 5.9 stellt die verbliebenen Wurzelkanalfüllungsreste (in mm^3) nach der Revision grafisch dar.

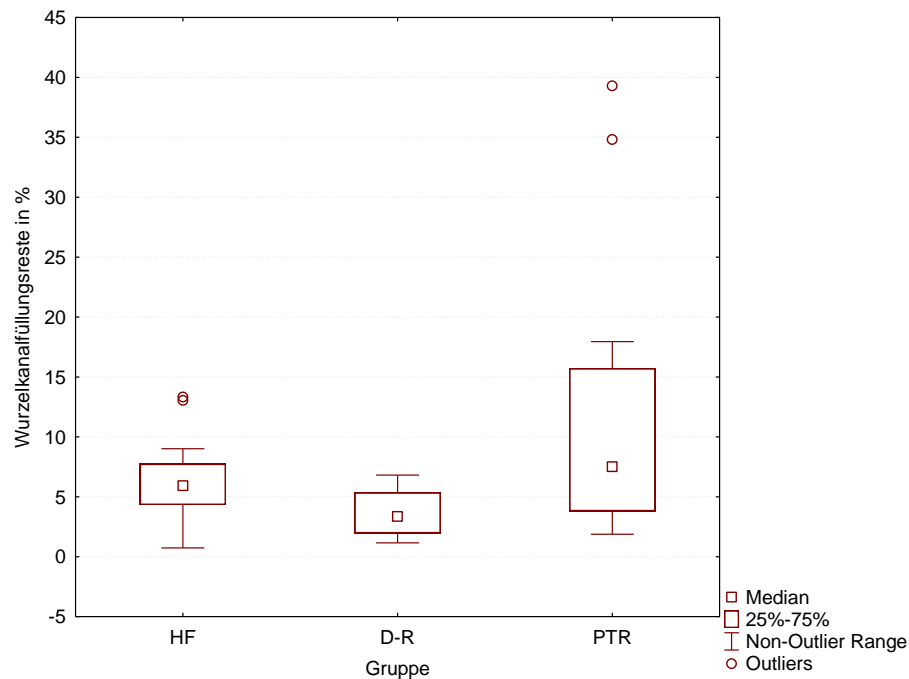


Abb. 5.9: Box-Plot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste (in %) nach der Revision

(HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Auswertung der am Micro-CT erstellten Daten zeigte die geringsten Reste an verbleibendem Füllmaterial nach der Revision mit D-RaCe-/BioRaCe-Instrumenten. Der Mittelwert betrug in dieser Gruppe 3,67%. Nach der Anwendung der Handinstrumente wurde im Durchschnitt 6,22% restliches Füllungsmaterial ermittelt. Der Gebrauch von ProTaper-Feilen hinterließ mit 11,31% die meisten Reste an Guttapercha und Sealer. Keine Revisionstechnik konnte Guttapercha und Sealer vollständig entfernen. Die Abbildung 5.10 zeigt die grafische Darstellung der Mittelwerte.

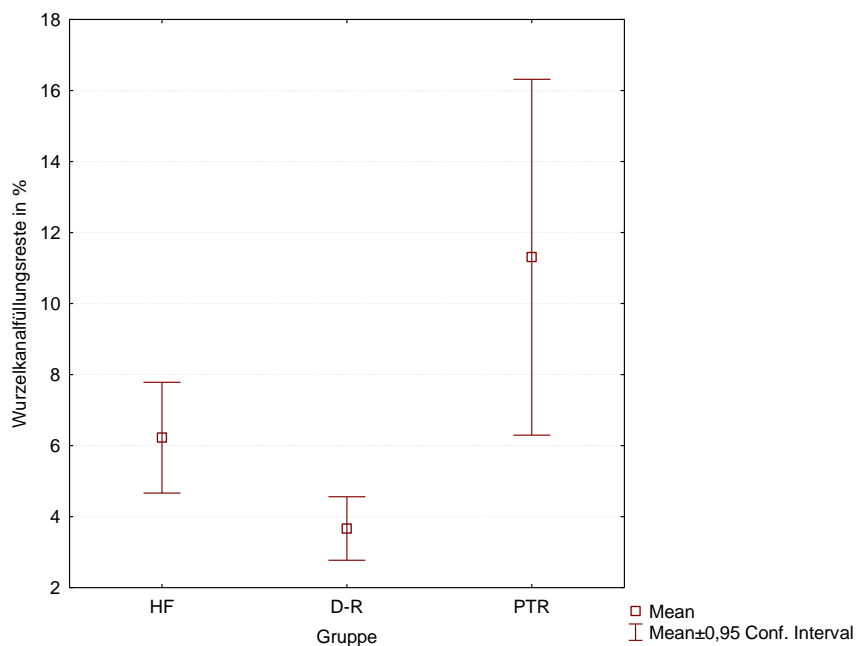


Abb. 5.10: Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung der Mittelwerte von Wurzelkanalfüllungsresten (in %) nach der Revision (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Mittelwerte und die dazu berechneten Standardabweichungen sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

	HF (Mean ± SD)	DR (Mean ± SD)	PTR (Mean ± SD)
Wurzelkanalfüllungsreste in %	6,22 ± 3,24	3,67 ± 1,86	11,31 ± 10,4

Tabelle 5.8: Übersicht der Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (SD) bezüglich der Wurzelkanalfüllungsreste (in %)

(HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Revision mit D-RaCe-Instrumenten hinterließ im Vergleich zu ProTaper-Instrumenten und Hedström-Feilen signifikant weniger Füllmaterial im Wurzelkanal ($p = 0,0073$, $p = 0,0115$). Es bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den Handinstrumenten und den ProTaper-Feilen ($p = 0,1137$). Die Ergebnisse der Paarvergleiche (Tukey-Kramer) sind in der Kreuztabelle 5.9 dargestellt.

	HF	D-R
PTR	$p = 0,1137$	$p = 0,0073$
D-R	$p = 0,0115$	

Tabelle 5.9: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der Wurzelkanalfüllungsreste

(HF=Hedström-Feile, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper)

Die Abbildungen 5.11, 5.12 und 5.13 zeigen dreidimensional rekonstruierte Micro-CT-Bilder vor und nach der Revision. Für jede Revisionstechnik wurde stellvertretend ein Beispiel ausgewählt, das ungefähr den Mittelwerten der Wurzelkanalfüllungsreste entspricht.

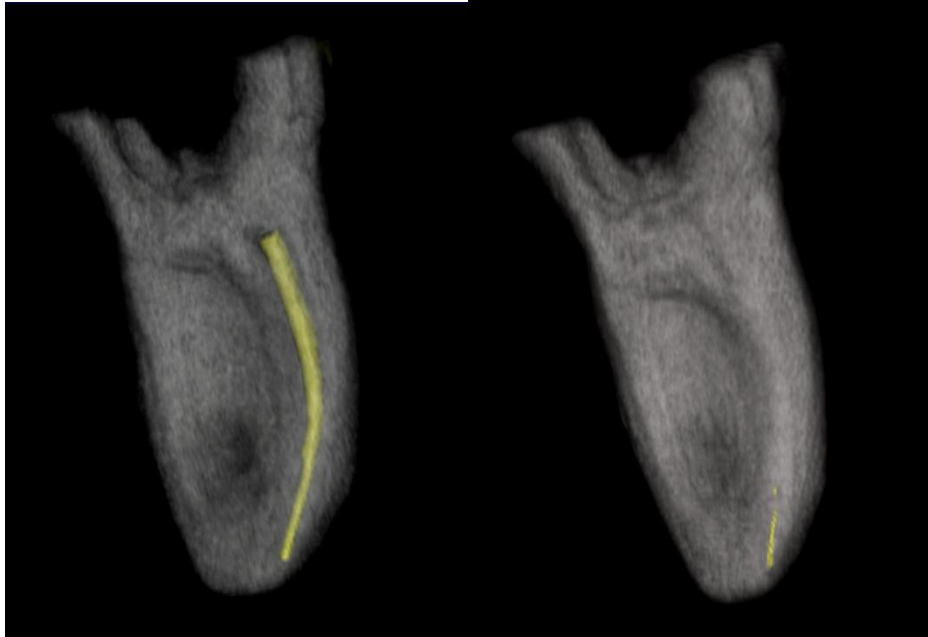


Abb. 5.11: Darstellung der gelb markierten Wurzelkanalfüllung vor (links) und nach (rechts) der Revision mit Hedström-Feilen

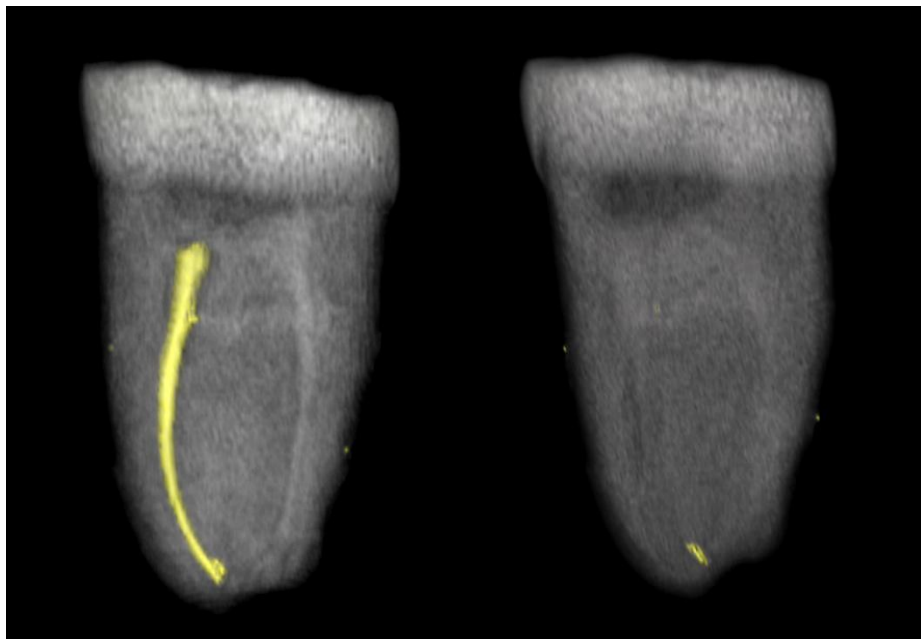


Abb. 5.12: Darstellung der gelb markierten Wurzelkanalfüllung vor (links) und nach (rechts) der Revision mit D-RaCe/BioRaCe



Abb. 5.13: Darstellung der gelb markierten Wurzelkanalfüllung vor (links) und nach (rechts) der Revision mit ProTaper Retreatment und ProTaper

5.8. Apikal extrudiertes Material

Der apikal extrudierte Debris wurde visuell ermittelt und mit einer Ja/Nein-Entscheidung bewertet.

Während der Revision mit Handinstrumenten kam es bei fünf Zähnen zu einer sichtbaren Extrusion von Debris.

Bei der Anwendung von D-RaCe- und ProTaper-Instrumenten wurden jeweils bei drei Proben apikal extrudierter Debris festgestellt.

5.9. Prozedurale Fehler

Während der Revision mit Handinstrumenten ereigneten sich keine prozeduralen Fehler. Es musste lediglich eine Hedström-Feile der ISO-Größe 30 aufgrund einer Deformation während der vierten Anwendung ausgetauscht werden.

Bei der Anwendung der D-RaCe- und Bio-RaCe-Instrumente wurden fünf Instrumentenfrakturen festgestellt. Es frakturierten drei DR2-Feilen (D-RaCe) bei einmaliger Anwendung. Weiterhin frakturierten zwei BR3-Feilen (Bio-RaCe), wobei eine Fraktur bei der dritten und eine bei der vierten Anwendung auftrat.

Beim Gebrauch von ProTaper-Universal-Retreatment- und ProTaper-Feilen wurden vier Instrumentenfrakturen ermittelt. Dabei frakturierten zwei D3-Feilen (ProTaper Universal Retreatment), einmal bei der zweiten und einmal bei der vierten Anwendung. Außerdem frakturierten zwei F2-Feilen (ProTaper), jeweils bei der dritten Anwendung. Die Abbildung 5.14 zeigt die zwei Instrumentenfrakturen. Weiterhin trat eine laterale Perforation auf (Abbildung 5.15).



Abb. 5.14: Instrumentenfraktur D2 (D-RaCe) links und D3 (ProTaper Retreatment) rechts



Abb. 5.15: Perforation innerhalb der ProTaper-Retreatment/ProTaper-Gruppe

6. Diskussion

6.1. Diskussion der Methode

Das Ziel der vorliegenden Studie war der Vergleich dreier unterschiedlicher Revisionstechniken an gekrümmten Wurzelkanälen.

Der Versuchsaufbau erfolgte in Anlehnung an die Studien von Çelik Ünal et al. (2009), Schirrmeister et al. (2006a) und Gergi & Sabbagh (2007). Die Bestimmung des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials und des Dentinabtrags wurde mit Hilfe von dreidimensionalen Micro-CT-Aufnahmen vorgenommen (Barletta et al. 2008, Roggendorf et al. 2010).

6.1.1. Gruppeneinteilung

Für diese Studie wurden ausschließlich gekrümmte menschliche Wurzelkanäle verwendet. Die Mehrzahl der bisherigen In-vitro-Studien zur Effektivität unterschiedlicher Revisionsmethoden wurden an geraden Wurzelkanälen durchgeführt, da diese einfacher zu standardisieren sind (Imura et al. 2000, Betti & Bramante 2001, Hülsmann & Bluhm 2004, Masiero & Barletta 2005, Kostic et al. 2006, Kfir et al. 2012). Für eine verbesserte Standardisierung der Proben wurden in einer Untersuchung von Hayakawa et al. (2010) künstliche Wurzelkanäle in Plastikblöcken verwendet. Dies spiegelt allerdings nicht die klinische Situation wieder, da menschliche Zähne eine komplexe Anatomie mit Isthmen, Seitenkanälen und Ramifikationen aufweisen. Es gilt allgemein, dass die Revision an gekrümmten Wurzeln eine technisch größere Herausforderung darstellt als die an geraden Kanälen. Intraoperative Zwischenfälle wie z. B. Instrumentenfrakturen oder Stufenbildungen treten bei gekrümmten Wurzelkanälen häufiger auf und die Reinigung und Bearbeitung der Kanalwände ist deutlich erschwert. Es gibt in der Literatur nur wenige Studien, die verschiedene Revisi-
stechniken an gekrümmten Wurzelkanälen untersuchten (Ferreira et al. 2001, Schirrmeister et al. 2006a, Barletta et al. 2008, Gergi & Sabbagh 2007, Aydin et al. 2009, Çelik Ünal et al. 2009).

Zur Standardisierung der Versuchsbedingungen wurden für jede Gruppe gekrümmte Wurzelkanäle von je elf Unterkiefermolaren, sechs Oberkiefermolaren und zwei Prämolaren zugeordnet. Da Wurzelkanäle dreidimensionale Krümmungen aufweisen, wurde jeder Zahn sowohl aus mesio-distaler als auch aus bucco-lingualer Richtung geröntgt. Anschließend wurden Krümmungsradius und -winkel aus beiden Projektionsrichtungen von zwei kalibrierten Zahnärzten digital bestimmt. Der Winkel wurde nach der Methode von Schneider (1971) und der Radius nach Schäfer et al. (2002) ermittelt. Dies ist allerdings nur eine geometrische Hypothese für die erleichterte Darstellung der Wurzelkanalkrümmung und für die Einteilung in gerade, moderat und stark gekrümmte Kanäle (nach Schneider 1971). Andere Autoren benutzten ebenfalls diese Methoden für die Bestimmung der Wurzelkanalkrümmungen und -radien (Gergi & Sabbagh 2007, Çelik Ünal et al. 2009, Gu Y et al. 2010).

Durch die Ermittlung der Mittelwerte von beiden Untersuchern konnten kleinere individuelle Abweichungen in der Festlegung der Bezugspunkte ausgeglichen werden. Demnach wurden für jeden Wurzelkanal zwei Winkel und zwei Radien berechnet, die bei der Einteilung der Zähne in drei homogene Gruppen berücksichtigt wurden. Die statistische Auswertung zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei verschiedenen experimentellen Gruppen. Jeder Zahn wurde von koronal auf eine einheitliche Arbeitslänge von 18 mm gekürzt und es erfolgte eine standardisierte Präparation mit rotierenden NiTi-Instrumenten (FlexMaster, VDW). Im Gegensatz zu künstlichen Wurzelkanälen war aufgrund der individuellen Wurzelkanalanatomie eine vollständige Standardisierung der Proben jedoch ausgeschlossen. Zwei kalibrierte Zahnärzte beurteilten die Wurzelkanalfüllungen in Bezug auf Homogenität und Länge. Inhomogene Wurzelkanalfüllungen wurden nachträglich verdichtet und nach erneuter Röntgenkontrolle evaluiert. Zähne, die nicht bis auf Arbeitslänge gefüllt waren, d.h. deren Wurzelkanalfüllung (WKF) mehr als 1 mm kürzer als die vorher ermittelte Arbeitslänge waren, wurden aussortiert. Erst nachdem diese Zähne aussortiert worden waren, erfolgte die Gruppeneinteilung bezüglich der Winkel und der Radien. Somit wurde versucht, für jede Gruppe die gleichen Voraussetzungen bezüglich der Wurzelkanalkrümmung, Präparation und Obturation zu schaffen.

6.1.2. Revisionstechnik

Im Idealfall sollte bei einer Revision das Füllmaterial vollständig entfernt werden. Dadurch ist eine effektive Desinfektion des Wurzelkanalsystems möglich, um verbliebene Mikroorganismen zu eliminieren (Stabholz und Friedmann 1988). In der vorliegenden Studie wurden drei Revisionstechniken hinsichtlich Effektivität und Arbeitssicherheit bei der Revision von Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen untersucht.

Guttapercha wurde als Füllmaterial verwendet, da es sich um das am häufigsten gebrauchte und akzeptierte Wurzelkanalfüllmaterial handelt. Die Guttapercha-Stifte wurden in Kombination mit einem Sealer verwendet. Die Methode, Guttapercha aus einem Wurzelkanal zu entfernen, ist von der Qualität der Wurzelkanalfüllung abhängig. Während sich bei einer Einstifttechnik die Entfernung der Guttapercha meist einfach darstellt, ist es bei einer gut verdichteten WKF nicht möglich, das Füllmaterial in toto zu entfernen. Für diese Studie wurden die Guttapercha-Stifte, ähnlich wie in vergleichbaren Untersuchungen, mittels kalter lateraler Kompaktion verdichtet (Taşdemir et al. 2008b, Horvath et al. 2009, Kfir et al. 2012). Die Kontrolle der Qualität und Homogenität erfolgte mit Röntgenaufnahmen aus zwei unterschiedlichen Richtungen.

Die Wurzelkanalfüllungen wurden mit zwei maschinell betriebenen NiTi-Systemen und mit Handinstrumenten revidiert, wobei die NiTi-Feilen speziell für die Revision entwickelt wurden. Die Effektivität von ProTaper-Instrumenten wurde bereits in mehreren Studien bewertet und mit anderen Revisionssystemen verglichen (Gu L et al. 2008, Só et al. 2008, Ring et al. 2009). Allerdings wurde nur eine Studie mit den ProTaper-Universal-Retreatment-Instrumenten (PTUR) an gekrümmten Wurzelkanälen durchgeführt (Çelik Ünal et al. 2009). Eine vergleichende Studie zur Revision mit D-RaCe- und Bio-RaCe-Instrumenten (D-R) ist in der aktuellen Literatur nicht verfügbar.

Es wurden ausschließlich unbenutzte Instrumente verwendet, die bei sichtbarer Deformation oder spätestens nach der Anwendung in vier Wurzelkanälen ausgetauscht wurden. Für jede einzelne Revisionstechnik wurde in Absprache mit dem Hersteller ein Versuchsprotokoll angelegt. Durch Vorversuche wurde die

fachgerechte Anwendung der Systeme eingeübt. Der Einsatz aller rotierender Instrumente erfolgte mit dem drehmoment- und drehzahlgesteuerten Endo IT-Motor mit den vom Hersteller programmierten individuellen Werten für jedes einzelne Instrument. Der Vergleich verschiedener Revisionstechniken ist notwendig, da einige rotierende Systeme weniger Füllmaterialreste im Wurzelkanal hinterlassen als andere (Hülsmann & Bluhm 2004, Zmener et al. 2006), das heißt, sie arbeiten effektiver. Manche benötigen weniger Zeit und sind deshalb wirtschaftlicher (Schirrmeister et al. 2006a, Zmener et al. 2006, Gu L et al. 2008,). Bei einigen Systemen treten häufiger prozedurale Fehler, wie Instrumentenfrakturen, Stufenbildungen oder apikale Blockaden, auf (Imura et al. 2000, Schirrmeister et al. 2006a, Çelik Ünal et al. 2009), die auf eine geringere Arbeitssicherheit der Instrumente hinweisen.

Bei einer gut verdichteten Wurzelkanalfüllung ist die initiale Penetration der Instrumente häufig erschwert. Es ist hilfreich, die Guttapercha vor der Revision mit Hitze oder einem Lösungsmittel zu erweichen.

Einige vorangegangene Studien benutzten Chloroform als effektives Lösungsmittel (Sae-Lim et al. 2000, Ferreira et al. 2001). Allerdings gilt Chloroform als gesundheitsbedenklich, da es bei Kontakt mit periapikalem Gewebe zytotoxisch wirkt. Weiterhin wurde Chloroform als kanzerogen eingestuft und stellt ein potentiell Risiko für das zahnärztliche Behandlungsteam dar (Wenneberg & Ørstavik 1989). In der vorliegenden Untersuchung wurde Eukalyptol als Lösungsmittel verwendet, da es eine gute Biokompatibilität aufweist. Die Studie von Hülsmann & Bluhm (2004) zeigte, dass die Anwendung von Eukalyptol den Zeitbedarf für die Revision verkürzt. Dafür ist pro Revision nur eine kleine Menge von etwa 1 ml an Lösungsmittel notwendig (Duncan & Chong 2011). Ein allgemeines Problem beim Einsatz von Lösungsmitteln ist, dass angelöste Guttapercha- und Sealer-Reste an der Wurzelkanalwand die Dentintubuli verschließen (Scelza et al. 2008, Horvath et al. 2009). Eine dünne Guttapercha-Schicht an der Kanalwand vermindert die Wirkung antimikrobieller Spüllösungen während der Revision (Wilcox & Juhlin 1994).

Das Ende der Revision ist klinisch sowie auch experimentell schwierig zu standardisieren. In einigen Studien wurde die Revision beendet, wenn kein Füllmaterial mehr am letzten Instrument zu sehen war (Bramante & Betti 2000, Saad et al. 2007). In einer anderen Studie wurde die Revision bei Erreichen der Arbeitslänge

beendet und wenn kein weiteres Material mehr entfernt werden konnte (Taşdemir et al. 2008a). Die Studie von Roggendorf et al. (2010) zeigte, dass die Füllungsreste sich signifikant verringern, wenn der Wurzelkanal nach der Revision um zwei ISO-Größen mehr als bei der initialen Präparation erweitert wird. In der vorliegenden Studie wurde der apikale Wurzelkanalquerschnitt daher nach der Revision um zwei zusätzliche Größen weiter präpariert als die ursprüngliche apikale Größe. Weiterhin galt die Revision als beendet, wenn kein Füllmaterial im Wurzelkanal, in der Spülflüssigkeit und am letzten Instrument mit bloßem Auge sichtbar war. Auch die Verwendung eines Operationsmikroskops (OPM) wäre möglich gewesen, da die Vergrößerung und die gute Beleuchtung bei einer Revision vorteilhaft sind. Einige Studien setzten ein dentales OPM unterstützend zur Revision ein (Schirrmeyer et al. 2006b, de Mello Junior et al. 2009). Allerdings wurden diese Studien an geraden Wurzelkanälen durchgeführt, die von orthograd gut einsehbar waren. Es muss in zukünftigen Untersuchungen geklärt werden, inwiefern die Effektivität einer Revisionstechnik an gekrümmten Wurzelkanälen bei Verwendung eines OPM gesteigert werden kann.

Die Messung der Arbeitszeit stellt ebenfalls ein Kriterium zum Vergleich der Effektivität der verschiedenen Revisionssysteme dar. Es wurde sowohl die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) als auch bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung und der Erweiterung des Kanals um zwei Größen (T2) gemessen. Die gesamte Arbeitszeit (T-gesamt) wurde durch das Addieren von T1 und T2 berechnet. In mehreren Studien wurde ebenfalls die Arbeitszeit bestimmt, um die Revision mit verschiedenen rotierenden Instrumenten und Handinstrumenten miteinander zu vergleichen (Bramante & Betti 2000, Hülsmann & Bluhm 2004, Masiero & Barletta 2005).

Neben der Effektivität eines Systems ist es ebenso wichtig, dessen Sicherheit zu überprüfen. Hierbei spielen Instrumentenfrakturen, Stufenbildungen, apikale Blockaden, Perforationen und Wurzelfrakturen eine große Rolle. Vorangegangene Studien zeigten, dass die Arbeitssicherheit einzelner Revisionssysteme unterschiedlich zu bewerten ist (Betti & Bramante 2000, Schirrmeyer et al. 2006a, Çelik Ünal et al. 2009). Unter bestimmten Bedingungen können Nickel-Titan-Instrumente im Vergleich zu Edelmetallinstrumenten eine höhere Frakturanfälligkeit zeigen. Dazu zählen Ermüdungserscheinungen des Materials (Gambarini 2001), der Grad der

Wurzelkanalkrümmung (Zelada et al. 2002), das Instrumentendesign (Schirrmeister et al. 2006a) und die spezielle Revisionstechnik (Zelada et al. 2002). In unserer Studie wurden Instrumentenfrakturen und Perforationen als prozedurale Fehler notiert.

Apikal extrudierter Debris während einer Wurzelkanalbehandlung oder Revision kann zu postoperativen Beschwerden (Flare ups) führen (Seltzer & Naidorf 1985). Ladley et al. (1991) und Huang et al. (2007) sammelten während der Revision den apikal extrudierten Debris in kleinen Behältern, Stahlkronen oder Eppendorf-Röhrchen, und ermittelten das Gewicht des extrudierten Debris. In unserer Studie wurde apikal extrudierter Debris mit einer Ja/Nein-Entscheidung bewertet. Dadurch konnte nicht genau differenziert werden, ob ausschließlich Sealer oder Sealer in Kombination mit Guttapercha extrudiert wurde. Es besteht des Weiteren die Möglichkeit, die Menge extrudierten Materials mit Hilfe von Mikrobalance-Waagen zu messen. Allerdings können Messfehler durch zu geringe Mengen an Debris oder Feuchtigkeit entstehen (Tanalp et al. 2006). Es ist nicht belegt, dass unterschiedliche Mengen an Extrusionen zu differentiellen klinischen Symptomen führen (Al-Omari & Dummer 1995).

6.1.3. Berechnung des verbleibenden Wurzelkanalfüllmaterials und des Dentinabtrags

Das Ziel der meisten Studien zur Wurzelkanalrevision ist die Bestimmung der Effektivität einer Revisionstechnik bzw. der Vergleich verschiedener Systeme untereinander (Duncan & Chong 2010). Dabei ist die Ermittlung des verbliebenen Füllungsmaterials einer der wichtigsten Parameter.

In der Literatur wurden bisher verschiedene Methoden verwendet, um das nach einer Revision verbliebene Füllungsmaterial zu ermitteln. Eine Möglichkeit besteht beispielsweise in der quantitativen Auswertung digitaler Röntgenbilder mit einer Bildbearbeitungssoftware (Masiero & Barletta 2005, Gergi & Sabbagh 2007). Ein Nachteil der röntgenologischen Auswertung ist die zweidimensionale Darstellung einer dreidimensionalen Struktur. Auch „Clearing Techniken“, bei denen Zähne durch verschiedene Chemikalien transparent gemacht und mit digitaler Bildverarbeitung analysiert wurden, zeigten dieses Defizit (Schirrmeister et al. 2006a). In anderen

Studien wurden die Wurzeln vertikal gespalten und Bilder für eine digitale Auswertung angefertigt (Hassanloo et al. 2007, Taşdemir et al. 2008a) oder die Füllungsreste nach einem Scoresystem bewertet (Hülsmann & Bluhm 2004). Bei der Längsspaltung der Wurzeln besteht allerdings die Gefahr, dass bei diesem Prozess Füllmaterial verloren geht und damit eine Beeinträchtigung der Genauigkeit dieser Methode einhergeht (Barletta et al. 2008).

Mithilfe des Micro-CT ist eine dreidimensionale Darstellung des Wurzelkanalfüllmaterials möglich (Barletta et al. 2008, Hammad et al. 2008, Roggendorf et al. 2010). Außerdem ist eine quantitative Ermittlung und Visualisierung des Dentinabtrags während der primären Wurzelkanalpräparation möglich (Peters et al. 2000, 2001). Die Vorteile des Micro-CT sind vielfältig. Es werden digitale Daten generiert, die als zwei- oder dreidimensionale Bilder rekonstruiert werden können. Weiterhin ist die Methode zerstörungsfrei, so dass Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten einer Untersuchung durchgeführt werden können. Dies verhindert eine aufwändige Präparation der Materialien und die Proben können nach dem Scan eine weitere Anwendung finden. Neu entwickelte Softwareprogramme ermöglichen die Verwendung der gewonnenen Datensätze für mehrere Analysen, wie z.B. für Volumetrie oder Anatomie. Nachteile des Micro-CTs sind die langen Scan-Zeiten sowie die großen Datensätze in einem Bereich von mehreren hundert Megabyte pro Rekonstruktion. Auch dient diese Untersuchungsmethode hauptsächlich In-vitro-Untersuchungen und ist ausschließlich für kleine Objekte geeignet. Probengröße und Auflösung hängen ca. über einen Faktor 1000 zusammen: Bei einer zu erzielenden Auflösung von 10 μm ist die maximale Probengröße auf 1 cm begrenzt. In der vorliegenden Studie wurde die Volumetrie des Wurzelkanalfüllmaterials und der Zahnhartsubstanz durch eine Festlegung der Umkehrpunkte unterschiedlicher Linien im Histogramm durchgeführt. Jeder Zahn besitzt ein unterschiedliches Histogramm bzw. unterschiedliche Grauwerte. Es konnten keine allgemeingültigen Werte bezüglich der Graustufen verwendet werden. Dies ist durch die unterschiedlichen Demineralisationsprozesse und verschiedene Lagerungen der Zähne nach der Extraktion sowie durch geringe Variationen im Scanprozess zu erklären. Somit entstand für jeden Zahn ein individuelles Histogramm, welches sich bezüglich der Grauwerte und des Abschwächungskoeffizienten von den übrigen Zähnen unterschied. Für die Volumetrie war es wichtig, die Bereiche im Histogramm zu ermitteln, die den Grauwerten der Wurzelkanalfüllung und der Zahnhartsubstanz

entsprechen. Im Histogramm stellen sich diese Bereiche als Kurven dar, die durch Umkehrpunkte und den Endpunkt des Graphen begrenzt werden. Die Festlegung der Umkehrpunkte des Graphen im Histogramm erfolgte visuell. Um Ungenauigkeiten bei der Festlegung dieser Punkte möglichst gering zu halten, wurden die markierten Bereiche mit der Option „Highlight selected“ in zweidimensionalen Schnittbildern gekennzeichnet und überprüft, so dass nur die zu ermittelnden Strukturen markiert waren. Um die Abweichungen weiter zu reduzieren, wurde dieser Arbeitsschritt von einem zweiten kalibrierten Zahnarzt durchgeführt und die Mittelwerte aus beiden Berechnungen ermittelt.

Eine Fehlerquelle während der Auswertung eines Micro-CT-Bildes stellen Artefakte dar, die Störungen im Untersuchungsbefund ohne physiologische bzw. pathologische Korrelation verursachen können. So entstehen zum Beispiel Bewegungsartefakte, wenn sich die Proben während des Scan-Vorganges in ihrer Lage verändern. Dies wurde durch die Stabilisierung der Zähne mit Hilfe von nicht röntgenopaken Schaumstoffpellets im Objektträger minimiert. Allerdings könnte eine Erschütterung des Micro-CT während des Scanprozesses ebenfalls zu solchen Artefakten führen. Eine weitere Fehlerquelle bei der Auswertung digitaler Bilder ist der Partialvolumeneffekt. Dieser besagt, dass dem mittleren Voxel an der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Gewebeschichten (Wurzelkanalfüllmaterial und Zahnhartsubstanz) Eigenschaften zugeordnet werden, die den benachbarten, einander gegenüberliegenden Voxeln entsprechen. Bei der Auswertung der digitalen Bilder kommt dem Voxel mit dem Partialvolumeneffekt die strahlungsschwächere Eigenschaft zu. Das heißt, dass das Volumen für eine Gewebeschicht auf Kosten der benachbarten Gewebeschicht zu groß gemessen werden würde. Abbildungen von stark kontrastreichen Gewebeschichten oder Grenzflächen fördern den Partialvolumeneffekt. Dadurch sind diagnostische Fehlinterpretationen möglich (Hathcock & Stickle 1993). Bei kontrastreichen Gewebeabschnitten sollte die Schichtdicke möglichst klein gewählt werden, um den Partialvolumeneffekt gering zu halten. In dieser Studie wurde eine Voxelgröße von 29 Mikrometern gewählt, um eine möglichst kleine Schichtdicke zu erzielen. Mittlerweile ist es mit Hilfe von Synchronstrahlen möglich, Auflösungen bis zu 2 Mikrometern zu erzielen. Frühere Studien zeigen jedoch, dass Auflösungen von 20 bis 39 Mikrometern Voxelgröße ausreichen, um die Kanalgeometrie zu beurteilen (Peters et al. 2001, Bergmans et al.

2001, Gu Y et al. 2010). Außerdem führen höhere Auflösungen zu einer erheblichen Verlängerung der Rekonstruktionszeit sowie zu einer Vergrößerung der Datensätze.

6.2. Diskussion der Ergebnisse

6.2.1. Wurzelkanalfüllungsreste

In der vorliegenden Studie wurden in jedem Zahn restliche Wurzelkanalfüllmaterialreste detektiert. Eine vollständige Entfernung des Füllmaterials war mit keiner der untersuchten Revisionsmethoden möglich. Frühere Studien bestätigten, dass eine vollständige Entfernung der Wurzelkanalfüllung nicht möglich war (Zmener et al. 2006, Gergi & Sabbagh 2007, Hammad et al. 2008, Marfisi et al. 2010, Mollo et al. 2011). Daher wurde untersucht, mit welcher Methode am meisten Guttapercha und Sealer entfernt werden können. Der prozentuale Anteil an restlichem Wurzelkanalfüllmaterial war in der vorliegenden Studie mit 3,67-11,31% geringer als in anderen Studien an gekrümmten Wurzelkanälen (Barletta et al. 2008, Aydin et al. 2009, Çelik Ünal et al. 2009). Bei der Revision mit D-RaCe in Kombination mit BioRaCe-Feilen wurden signifikant die geringsten Reste mit durchschnittlich 3,67%, ermittelt. Bei der Anwendung von Handinstrumenten zeigte sich durchschnittlich 6,22% verbliebendes Füllmaterial. Die Revision mit PTUR-Instrumenten in Kombination mit ProTaper-Feilen hinterließ signifikant das meiste Füllmaterial (11,31%). Die Revisionsstudie von Çelik Ünal et al. (2009) analysierte Füllungsreste in gekrümmten Wurzelkanälen mit Hilfe von Röntgenbildern aus zwei unterschiedlichen Richtungen. Insgesamt wurde dabei 11-27% verbliebenes Füllmaterial ermittelt. Dabei konnte nur auf den Röntgenbildern in bucco-lingualer Projektion ein signifikanter Unterschied zwischen Handinstrumenten und PTUR-Feilen festgestellt werden. Die größere Menge restlichen Füllmaterials bei Çelik Ünal et al. (2009) ist darauf zu schließen, dass die Wurzelkanäle nach der Revision nicht weiter aufbereitet wurden, wie in der vorliegenden Studie. Andere Autoren stellten bei der Revision gekrümmter Wurzelkanäle keinen signifikanten Unterschied in der Reinigungswirkung zwischen Handinstrumenten und ProTaper fest (Gergi & Sabbagh 2007, Schirrmeister et al. 2006a). In einer Micro-CT-Studie an geraden Wurzelkanälen wurde die Revision von Guttapercha mit ProTaper-Retreatment-Feilen und Hand-K-Feilen verglichen (Hammad et al. 2008). Der höchste durch-

schnittliche Prozentsatz an Füllmaterialresten betrug in der ProTaper-Gruppe 5,7% und in der Gruppe der Handinstrumente 1,7%, wobei der Unterschied zwischen beiden Revisionstechniken nicht signifikant war. In einer weiteren Untersuchung an geraden Wurzelkanälen wurde mit ProTaper-Retreatment-Feilen signifikant weniger Füllungsmaterial im Kanal hinterlassen als mit Hedström-Feilen (Gu L et al. 2008).

Die unterschiedlichen Ergebnisse von Hammad et al. (2008) und Gu L et al. (2008) im Vergleich zur vorliegenden Studie sind durch die verschiedenen Wurzelkanalkrümmungen der Proben erklärbar. Beide Studien wurden an geraden Wurzelkanälen durchgeführt, während in dieser Untersuchung gekrümmte Wurzelkanäle verwendet wurden. Bei gekrümmten Kanälen ist die Revision von Füllungsmaterial deutlich erschwert (Duncan & Chong 2010).

In der Literatur findet sich keine vergleichende Studie zur Effektivität von D-RaCe-Instrumenten. In der vorliegenden Untersuchung verblieb nach Revision mit D-RaCe in Kombination mit BioRaCe-Feilen signifikant weniger Wurzelkanalfüllmaterial als bei den beiden anderen Revisionstechniken. In der Studie von Schirrmeister et al. (2006a) konnten nach der Revision gekrümmter Kanäle mit RaCe-Instrumenten signifikant weniger Guttapercha- und Sealer-Reste festgestellt werden als nach der Verwendung von Hedström-Feilen, FlexMaster- und ProTaper-Feilen. Als mögliche Ursachen für dieses Ergebnis wurden die gute Formbarkeit, die alternierenden Schneidekanten und die speziell elektrochemisch behandelte Oberfläche der RaCe-Instrumente angegeben. Ein weiterer Grund für die bessere Reinigungswirkung der D-RaCe-Instrumente im Vergleich zu PTUR-/ProTaper-Feilen könnte in der höheren Umdrehungszahl dieser Instrumente liegen. Während D-RaCe-Instrumente mit 800 Umin^{-1} und BioRaCe-Instrumente mit 600 Umin^{-1} eingesetzt wurden, erfolgte die Anwendung der PTUR-Feilen und der ProTaper-Instrumente mit 300 Umin^{-1} . Die höhere Umdrehungszahl führte vermutlich zu einer effektiveren Erweichung der Guttapercha durch Reibungswärme, wodurch die Entfernung vereinfacht wurde. In der ProTaper-Gruppe war die relativ große Standardabweichung von 10,4% auffallend. Die Proben mit einer großen Menge an Füllungsresten (über 30%) zeigten auch einen großen Krümmungswinkel (über 28°), wodurch die Revision erschwert war. Da bei vier Wurzelkanälen der ProTaper-Gruppe eine Instrumentenfraktur auftrat, führte die zusätzliche Verwendung von Handinstrumenten zur Darstellung, Freilegung und Entfernung des Fragments zu einer weiteren Verringerung des

Füllmaterials. Bei diesen Zähnen wurden im Vergleich zum Durchschnitt sehr geringe Reste an Füllmaterial festgestellt, wodurch die große Standardabweichung in der ProTaper-Gruppe verursacht wurde.

6.2.2. Zahnhartsubstanzverlust

Durch den Verlust an Zahnhartsubstanz kommt es zu einer Schwächung des Zahnes. Mit jeder mechanischen Erweiterung des Wurzelkanals geht eine Abnahme der Stabilität einher. Neben den Hartsubstanzverlusten spielt auch die Veränderung der natürlichen Wurzelkanalgeometrie eine wesentliche Rolle für die Stabilität von Zähnen (Lang & Raab 2005). Das Risiko für eine Perforation und Wurzellängsfraktur steigt bei exzessivem Dentinabtrag (Hülsmann et al. 2011). In der Literatur wurde die Berechnung des Dentinabtrages während einer Revision mittels eines Micro-CT bisher nicht beschrieben.

In unserer Studie war der Abtrag von Zahnhartsubstanz bei der Revision mit Handinstrumenten signifikant geringer als mit beiden NiTi-Systemen. Diese entfernten im Durchschnitt doppelt so viel Dentin wie die Hedström-Feilen. Mit Handfeilen kann die Guttapercha gezielt von der Wurzelkanalwand gelöst werden, wohingegen eine manuelle Kontrolle mit den rotierenden Instrumenten nicht möglich ist. Diese Instrumente bearbeiten die gesamte Wurzelkanalwand und führen dadurch zu einem höheren Dentinabtrag. Die ProTaper- und die D/RaCe-Instrumente unterschieden sich dabei nicht signifikant voneinander. Die unterschiedlichen Konizitäten der Abschlussfeilen können ebenfalls Ursache für den erhöhten Abtrag mit rotierenden Instrumenten sein. Die letzte Feile der Handinstrumente hatte eine Konizität von 2%, wohingegen die ProTaper-Feile eine variierende Konizität und die BR5-Feile der Bio-RaCe-Instrumente eine Konizität von 4% besaß. Aufgrund der größeren Kontaktfläche der NiTi-Instrumente zur Wurzelkanalwand wurde bei diesen Wurzelkanälen mehr Dentin abgetragen. Die progressiven Konizitäten und die Längen der PTUR-Feilen führten dazu, dass sich während der Revision die Instrumente nicht nur in die Guttapercha hinein schneiden, sondern dabei auch Dentin abtragen (Gu L et al. 2008). Ähnliches ist auch durch die aktive Schneidespitze der DR1-Feile bei den D-RaCe-Instrumenten zu vermuten. Zusätzlich

muss erwähnt werden, dass in der Gruppe der D-RaCe-/Bio-RaCe-Instrumente insgesamt fünf und bei den PTUR-/ProTaper-Instrumenten vier Instrumentenfrakturen auftraten. Bis die Revision weiter fortgesetzt werden konnte, mussten diese Instrumentenfragmente manuell mit Handfeilen entfernt werden. Die Darstellung und Freilegung des Fragments, die partielle Passage und schließlich das Entfernen des Fragments, führten ebenfalls zu einem Verlust von Dentin und veränderten die Wurzelkanalgeometrie. Bei endodontisch versorgten Zähnen wird ein Zahnhartsubstanzverlust durch das Anlegen einer Zugangskavität, die Wurzelkanalpräparation und eine Revision verursacht, wodurch die Stabilität eines Zahnes verringert wird. Vor allem im Seitenzahnbereich treten große Kaukräfte auf, die zu einer Fraktur des Zahnes führen können. In der Regel wird die Versorgung eines wurzelkanalbehandelten Zahnes mit einer höckerfassenden Restauration, z. B. einer Teilkrone empfohlen, um das Frakturrisiko zu senken (Linn & Messer 1994).

6.2.3. Extrudierter Debris

Im Idealfall sollte während einer Revision kein Debris apikal durch das Foramen in die periradikulären Gewebe extrudiert werden, um postoperative Beschwerden zu vermeiden.

In der vorliegenden Studie wurde in jeder experimentellen Gruppe eine apikale Extrusion von Debris beobachtet. Auch andere Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass unabhängig von der Revisionstechnik Debris extrudiert wird (Bramante & Betti 2000, Imura et al. 2000, Huang et al. 2007). Auch Al-Omari & Dummer (1995) stellten beim Vergleich acht verschiedener Präparationstechniken fest, dass eine Vermeidung apikaler Extrusionen von Debris nahezu unmöglich ist.

In der vorliegenden Studie wurde bei Anwendung der Handinstrumente bei fünf Zähnen eine Extrusion ermittelt. Beim Gebrauch von D-RaCe/BioRaCe-Instrumenten und ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen trat an je drei Zähnen eine erkennbare apikale Überpressung von Debris auf. Dieses Ergebnis wird durch eine Studie von Huang et al. (2007) bestätigt, in der die Verwendung von ProTaper-Retreatment-Feilen zu signifikant weniger Extrusion von Debris führte als die Präparation mit Handinstrumenten. Somma et al. (2008) berichteten allerdings über kontroverse

Ergebnisse, da eine Revision mit PTUR-Feilen zu größeren Mengen an extrudiertem Debris führte als die Anwendung von Handinstrumenten. Çelik Ünal et al. (2009) konnten keinen Unterschied zwischen den manuellen und maschinellen Revisionstechniken feststellen. Mehrere Studien zeigten ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Revisionstechniken (Betti & Bramante 2001, Imura et al. 2000). Allerdings wurde auch von diesen Autoren bei allen untersuchten Revisionstechniken extrudiertes Material ermittelt.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die apikale Extrusion von Debris bei Revisionsbehandlungen unvermeidbar ist. Die kontroversen Ergebnisse in der Literatur lassen darauf schließen, dass weder Menge noch Häufigkeit des nach apikal extrudierten Materials von der jeweiligen Revisionstechnik abhängen.

6.2.4 Arbeitssicherheit

Instrumentenfrakturen, Perforationen, apikale Blockaden und Stufenbildungen zählen zu den hauptsächlichen Komplikationen während einer Revision. Speziell die Entfernung von Instrumentenfragmenten ist oftmals sehr kompliziert und zeitaufwändig.

In der vorliegenden Studie traten vier Frakturen bei ProTaper-Feilen und fünf Frakturen bei D-Race/Bio-RaCe-Feilen auf. In der ProTaper-Gruppe frakturierten zwei D3-Feilen und zwei F2-Feilen. Bei den D-RaCe-Instrumenten frakturierten drei DR2-Feilen. Während der weiteren Anwendung der BioRaCe-Instrumente trat bei zwei BR3-Feilen eine Fraktur auf.

Alle Instrumente wurden entsprechend den Herstellerangaben und mit einem drehmoment- und drehzahlkontrollierten Motor verwendet (EndoIT professional, VDW). Andere Studien bestätigten das höhere Risiko für Instrumentenfrakturen bei rotierenden Nickel-Titan-Feilen im Vergleich zu Handfeilen (Imura et al 2000, Betti & Bramante 2001, Schirrmeister et al. 2006a, Çelik Ünal et al. 2009). In der Studie von Çelik Ünal et al. (2009) wurden bei der Revision gekrümmter Wurzelkanäle mit PTUR-Feilen fünf Instrumentenfrakturen festgestellt. Dabei frakturierten drei D3-Feilen und zwei D2-Feilen. Als mögliche Ursache für die hohe Frakturnrate wurden die

großen Konizitäten der Feilen von 7% angegeben. Bei Schirrmeister et al. (2006a) frakturierten fünf Instrumente bei der Revision mit ProTaper, viermal F2 und einmal F3. Als Grund wurde ebenfalls die erhöhte Konizität dieser Finishing Files benannt (F2 Konizität von 8%, F3 Konizität von 9%). Haikel et al. (1999) stellten fest, dass der Radius der Krümmung einen bedeutenden Einfluss auf Ermüdungsbrüche rotierender Nickel-Titan-Feilen besitzt. Je kleiner der Radius einer Krümmung ist, desto geringer ist die Zeit, bis ein Instrument im Wurzelkanal frakturiert. In unserer Studie frakturierten die vier ProTaper-Instrumente bei einem kleinen Radius von weniger als 6,5 mm. In der Studie von Pruett et al. (1997) frakturierten die Instrumente am Punkt der maximalen Krümmung des Kanals, da an dieser Stelle der Stress für das Instrument am größten ist. Dieses Ergebnis konnte in unserer Studie bestätigt werden. Der Einfluss der Wurzelkanalkrümmung auf Instrumentenfrakturen wurde ebenfalls durch Zelada et al. (2002) bestätigt. Im Gegensatz kamen Gu L et al. (2008) und Somma et al. (2008) zu dem Schluss, dass PTUR-Feilen sicher in Ihrer Anwendung sind. Allerdings wurden diese Studien an geraden Kanälen durchgeführt. Die hohe Frakturrate der DR2-Feilen in der D-RaCe-Gruppe lässt sich möglicherweise auf die geringe Flexibilität dieser Feilen zurückführen, die großen Krümmungswinkeln und kleinen Radien nicht standhalten. Die Fraktur der BR3-Feile wurde vermutlich durch die erhöhte Konizität der Feile von 6% verursacht, wodurch ein größerer Kontakt zur Kanalwand und damit verbundener Stress auf das Instrument bestand. Die Studie von Haikel et al. (1999) bestätigte ebenfalls den Zusammenhang zwischen der Konizität einer Feile und der Dauer bis zur Fraktur des Instrumentes. In zukünftigen Untersuchungen sollte ermittelt werden, inwiefern eine Veränderung der Umdrehungszahl und des Drehmomentes das Risiko für Instrumentenfrakturen verringert. Zelada et al. (2002) zeigten, dass bei Umdrehungszahlen von 350 Umdrehungen pro Minute mehr Feilen frakturierten als bei 250 oder 150 Umdrehungen pro Minute. In unserer Studie wurden alle rotierenden Instrumente entsprechend den Herstellerangaben mit Umdrehungszahlen zwischen 300 und 800 Umin^{-1} eingesetzt. Eventuell hätte eine Verringerung der Umdrehungszahl zu einer Reduktion der Instrumentenfrakturen geführt.

In der ProTaper-Gruppe ereignete sich eine laterale Perforation. An diesem Zahn mussten zuvor zwei frakturierte Instrumente entfernt werden, woraus vermutlich eine Schwächung der Wurzelkanalwand resultierte. Außerdem kann bei der Entfernung der frakturierten Instrumente eine Veränderung der ursprünglichen Kanal Anatomie

aufgetreten sein. In den Studien von Schirrmeister et al. (2006a) und Çelik Ünal et al. (2009) ereigneten sich je zwei laterale Perforationen in der ProTaper-Gruppe an Zähnen, bei denen die Arbeitslänge nicht erreicht werden konnte. Dies wurde durch Stufen in der Wurzelkanalwand erklärt.

6.2.5 Arbeitszeit

Die Arbeitszeit für Revisionen stellt einen wesentlichen wirtschaftlichen Faktor für die Praxis dar und ist ein Maßstab für die Effizienz der Methode. Dabei ist es wichtig, dass die jeweiligen Revisionstechniken sowohl effektiv aber auch schnell sind.

Die Revision mit D-RaCe-Instrumenten benötigte mit 91,95 s die signifikant geringste Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge. Die Anwendung von PTUR-Feilen mit durchschnittlich 129,16 s war signifikant schneller als die Verwendung von Handinstrumenten mit 349,79 s. Auch bei der Ermittlung der Zeit bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung konnte gezeigt werden, dass die Bio-RaCe den ProTaper- und Handinstrumenten überlegen sind.

Andere Studien belegten ebenfalls die Zeitersparnis rotierender NiTi-Feilen im Vergleich zu Handinstrumenten (Betti & Bramante 2001, Ferreira et al. 2001, Hülsmann & Bluhm 2004, Zmener et al. 2006, Saad et al. 2007, Gu L et al. 2008, Kfir et al. 2012). Im Gegenzug dazu erfolgte in anderen Studien die Revision mit Handinstrumenten schneller als mit NiTi-Feilen (Imura et al. 2000, Barrieshi-Nusair 2002). Bei Imura et al. (2000) wurde mehr Füllmaterial in den NiTi-Gruppen durch Röntgenkontrollaufnahmen detektiert, wodurch in diesen Gruppen nochmals nachgearbeitet werden musste. Dafür wurden längere Revisionszeiten in Anspruch genommen. Die Studie von Gu L et al. (2008) zeigte ebenfalls, dass die Revision mit PTUR-Instrumenten signifikant schneller als mit Hedström-Feilen war. Als Gründe wurden hier die speziellen Konstruktionsmerkmale dieser Instrumente mit progressiven Konizitäten und Längen und das Erweichen der Guttapercha während der Revision mit rotierenden Instrumenten angegeben. Die Plastifizierung der Guttapercha durch rotierende Instrumente führt zu einer erleichterten Penetration des Füllmaterials (Hülsmann & Bluhm 2004). Dies könnte auch die Ursache dafür sein, weshalb die D-RaCe- und BioRaCe-Instrumente in der vorliegenden Studie

bezüglich der Arbeitszeit im Vergleich zu den Handinstrumenten besser abschnitten. Die wesentlich höheren Umdrehungszahlen führten zu einer plastischen Verformung der Guttapercha, so dass diese schneller entfernt werden konnte. Auffällig war auch, dass meist große Stücke Guttapercha während des Einsatzes der rotierenden D-RaCe-Instrumente, speziell bei der DR2 Feile, entfernt werden konnten. Dies war bei den anderen beiden Techniken nicht zu beobachten. Die Studie von Schirrmeyer et al. (2006a) zeigte, dass Revisionen mit RaCe-Instrumenten in gekrümmten Wurzelkanälen signifikant mehr Zeit in Anspruch nahmen als mit Hand- oder ProTaper-Feilen. Es handelte sich allerdings um herkömmliche RaCe-Instrumente und nicht um speziell für Revisionen entwickelte D-RaCe-Instrumente.

7. Schlussfolgerungen

1. Mit keiner der verwendeten Revisionstechniken konnte das Wurzelkanalfüllmaterial vollständig entfernt werden.
2. D-RaCe-Instrumente hinterlassen signifikant weniger restliches Füllmaterial als ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen und Handinstrumente.
3. Hedström-Feilen entfernen signifikant weniger Dentin während der Revision als beide NiTi-Systeme.
4. D-RaCe-Instrumente arbeiten signifikant schneller im Vergleich zu den beiden anderen Systemen, ProTaper arbeitet signifikant schneller als Hedström-Feilen.
5. Bei jeder Gruppe konnte extrudiertes Material detektiert werden.
6. Die Revision mit NiTi-Systemen resultierte in einer hohen Inzidenz prozeduraler Fehler.
7. Während der Revision mit Hedström-Feilen traten keine prozeduralen Fehler auf.

8. Zusammenfassung

Ein wesentliches Ziel der Revision ist die vollständige Entfernung der Wurzelkanalfüllung, um eine umfassende Desinfektion des Wurzelkanalsystems zu ermöglichen und die Voraussetzung für die Heilung einer persistierenden apikalen Parodontitis zu schaffen. Die vorliegende Studie untersuchte die Effektivität zweier rotierender Nickel-Titan-Revisionssysteme und Hedström-Feilen in gekrümmten Wurzelkanälen mithilfe eines Micro-CTs.

Dafür wurden 57 gekrümmte Wurzelkanäle extrahierter Zähne mit FlexMaster bis zu einer ISO-Größe von 30 präpariert. Die Kanäle wurden anschließend mit AH Plus und Guttapercha durch kalte laterale Kompaktion gefüllt. Nach Bestimmung der Krümmungsradien und -winkel aus zwei Projektionsrichtungen erfolgte die Einteilung in drei homogene Gruppen ($n = 19$). Die Revision der Wurzelkanalfüllung wurde entweder mit D-Race-Instrumenten, mit ProTaper-Universal-Retreatment-Instrumenten oder mit Hedström-Feilen durchgeführt. Mit Hilfe prä- und postoperativer Micro-CT-Scans wurden der Anteil an verbliebenem Füllmaterial sowie das Volumen des entfernten Dentins bestimmt. Zusätzlich wurden prozedurale Fehler und die Arbeitszeit festgehalten.

D-RaCe-Instrumente arbeiten signifikant effektiver und schneller als Hedström-Feilen und ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen ($p < 0,05$). Bezüglich des Dentinabtrags arbeiten Hedström-Feilen signifikant schonender als beide Nickel-Titan-Systeme ($p < 0,0001$). Bei der Revision mit Hedström-Feilen ereigneten sich keine prozeduralen Fehler. In der Gruppe der D-RaCe-Instrumente frakturierten fünf Instrumente und in der ProTaper-Gruppe vier.

Die Revision mit D-RaCe hinterließ signifikant weniger Füllungsreste als die ProTaper-Universal-Retreatment-Instrumente und Hedström-Feilen. Während der manuellen Revision wurde signifikant weniger Zahnhartsubstanz als mit beiden Nickel-Titan-Systemen entfernt. Die Anwendung rotierender Nickel-Titan-Feilen resultierte in einer hohen Rate an Instrumentenfrakturen.

9. Literaturverzeichnis

Al-Omari MA, Dummer PM (1995):

Canal blockage and debris extrusion with eight preparation techniques.

J Endod 21, 154-158

Aydin B, Kose T, Caliskan MK (2009):

Effectiveness of Hero 642 versus Hedström files for removing gutta-percha fillings in curved root canals- an ex vivo study.

Int Endod J 42, 1050-1056

Baratto-Filho F, Ferreira E, Farinink L (2002):

Efficiency of the 0,004 taper ProFile during the retreatment of gutta-percha-filled root canals.

Int Endod J 35, 651-654

Barbosa SV, Burkard DH, Spangberg LS (1994):

Cytotoxic effects of gutta-percha solvents.

J Endod 20, 6-8

Barletta FB, Reis MS, Wagner M, Borges JC, Agnol CD (2008):

Computed tomography assessment of three techniques for removal of filling material.

Aust Endod J 34, 101-105

Barrieshi-Nusair KM (2002):

Gutta-percha retreatment: effectiveness of nickel-titanium rotary instruments versus stainless-steel hand files.

J Endod 28, 454-456

Bergmans L, Van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P (2001):

A methodology for quantitative evaluation of root canal instrumentation using microcomputed tomography.

Int Endod J 34, 390-398

Betti LV, Bramante CM (2001):

Quantec SC rotary instruments versus hand files for gutta-percha removal in root canal retreatment.

Int Endod J 34, 514-519

Betti VL, Bramante CM, Gomes de Moraes I, Bernadineli N, Garcia RB (2009):

Efficacy of ProFile. 04 taper series 29 in removing filling materials during root canal retreatment – an in vitro study.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 108, e46-e50

Bramante CM, Betti LV (2000):

Efficacy of Quantec rotary instruments for gutta-percha removal.

Int Endod J 33, 463-467

Bramante CM, Fidelis NS, Assumpcao TS, Bernardineli N, Garcia RB, Bramante AS, de Moraes IG (2010):

Heat release, time required, and cleaning ability of Mtwo R and ProTaper Universal Retreatment Systems in the removal of filling material.

J Endod 36, 1870-1873

Byström A, Happonen RP, Sjögren U, Sundqvist G (1987):

Healing of periapical lesions of pulpless teeth after endodontic treatment with controlled asepsis.

Endod Dent Traumatol 3, 58-63

Camps J, Pertot WJ (1994):

Torsional and stiffness properties of canal Master U stainless steel and nitinol instruments.

J Endod 20, 395-398

Çelik Ünal G, Kaya BÜ, Tac AG, Kececi AD (2009):

A comparison of the efficacy of conventional and new retreatment instruments to remove gutta-percha in curved root canals: an ex vivo study.

Int Endod J 42, 344-350

Cheung LHM, Cheung GSP (2008):

Evaluation of a rotary instrumentation method for C-shaped canals with Micro – computed Tomography.

J Endod 34, 1233-1238

De Mello Junior JE, Cunha RS, Bueno CE, Zuolo ML (2009):

Retreatment efficacy of gutta-percha removal using a clinical microscope and ultrasonic instruments: part 1 – an ex vivo study.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 108, e59-e62

Dummer PM, Lyle L, Rawle J, Kennedy JK (1994):

A laboratory study of root fillings in teeth obturated by lateral condensation of Guttapercha or Thermafil obturators.

Int Endod J 27, 32-38

Duncan HF, Chong BS (2010):

Non-surgical retreatment: experimental studies on the removal of root filling materials.

ENDO (Lond Engl) 4, 111-126

Duncan HF, Chong BS (2011):

Removal of root filling materials.

Endodontic Topics 19, 33-57

Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Siebert U, Schaller S, Kalende W (1999):

Micro-CT. Technology and application for assessing bone structure.

Radiologie 39, 203-212

European Society of Endodontology (ESE) (2006):

Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology.

Int Endod J 39, 921-930

Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW (1984):

Practical cone-beam algorithm.

J Opt Soc Am A 1, 612-619

Feldkamp LA, Goldstein SA, Parfit AM, Jesion G, Kleerekoper M (1989):

The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography.

J Bone Miner Res 4, 3-11

Ferraz CC, Figueiredo de Almeida Gomes BP, de Souza-Filho FJ (2001):

In vitro assessment of the antimicrobial action and the mechanical ability of chlorhexidine gel as an endodontic irrigant.

J Endod 27, 452-455

Ferreira JJ, Rhodes JS, Pitt Ford TR (2001):

The efficacy of gutta-percha removal using ProFile.

Int Endod J 34, 267-274

Frentzen M, Schmitt UH, Braun A (2004):

Dimensionsstabilität von Guttaperchastiften bei unterschiedlichen Desinfektionsmaßnahmen.

Zahnärztl Welt/Reform 113, 73-80

Friedman S, Stabholz A (1986):

Endodontic retreatment-case selection and technique. Part 1: Criteria for case selection.

J Endod 12, 28-33

Friedman S, Stabholz A, Tamse A (1990):

Endodontic retreatment-Case selection and technique. Part 3. Retreatment techniques.

J Endod 16, 543-549

Gambarini G (2001):

Cyclic fatigue of nickel-titanium rotary instruments after clinical use with low- and high-torque endodontic motors.

J Endod 27, 772-774

Gergi R, Sabbagh C (2007):

Effectiveness of two nickel-titanium rotary instruments and a hand file for removing gutta-percha in severely curved root canals during retreatment: an ex vivo study.

Int Endod J 40, 532-537

Gilhooly RM, Hayes SJ, Bryant ST, Dummer PM (2000):

Comparison of cold lateral condensation and a warm multiphase gutta-percha technique for obturating curved root canals.

Int Endod J 33, 415-420

Gorni FGM, Gagliani MM (2004):

The outcome of endodontic retreatment: A 2-yr follow-up.

J Endod 30, 1-4

Grossmann LI:

Root canal therapy.

Lea & Febiger Philadelphia 1940, S. 189

Gu L, Ling JQ, Wei X, Huang XY (2008):

Efficacy of ProTaper Universal rotary retreatment systems for gutta-percha removal from root canals.

Int Endod J 41, 288-295

Gu L, Wei X, Ling J, Huang X (2009):

A microcomputed Tomographic Study of Canal Isthmuses in the Mesial Root of Mandibular First Molars in a Chinese Population.

J Endod 35, 353-356

Gu Y, Lu Q, Wang P, Ni L (2010):

Root canal morphology of permanent three-rooted mandibular first molars: Part II – measurement of root canal curvatures.

J Endod 36, 1341-1346

Haikel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C (1999):

Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven Rotary Nickel-Titanium endodontic instruments.

J Endod 25, 434-440

Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2008):

Three-dimensional evaluation of effectiveness of hand and rotary instrumentation for retreatment of canals filled with different materials.

J Endod 34: 1370-1373

Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2009):

Evaluation of root canal obturation: A three-dimensional in vitro study.

J Endod 35, 541-544

Hassanloo A, Watson P, Finer Y, Friedman S (2007):

Retreatment efficacy of the epiphany soft resin obturation system.

Int Endod J 40, 633-643

Hathcock JT, Stickle RL (1993):

Principles and concepts of computed tomography.

Vet Clin North Am Small Anim Pract 23, 399-415

Hayakawa T, Tomita F, Okiji T (2010):

Influence of the diameter and taper of root canals on the removal efficiency of Therafil Plus plastic carriers using ProTaper Retreatment Files.

J Endod 36, 1676-8

Heidemann D, Hülsmann M, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, Weiger R(2004):

Revision einer Wurzelkanalbehandlung.

Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und der DGZ.

Dtsch Zahnärztl Z 59, 605

Horvath SD, Altenburger MJ, Naumann M, Wolkewitz M, Schirrmeister JF (2009):

Cleanliness of dentinal tubules following gutta-percha removal with and without solvents: a scanning electron microscopic study.

Int Endod J 42, 1032-1038

Huang X, Junqi L, Xi W, Gu Lisha (2007):

Quantitative evaluation of debris extruded apically by using ProTaper Universal Tulsa Rotary System in endodontic retreatment.

J Endod 33, 1102-1105

Hülsmann M

Wurzelkanalfüllung

In: Checklisten der Zahnmedizin Endodontie

Thieme-Verlag, Stuttgart 2008a, S. 175-176

Hülsmann M

Wurzelkanalpräparation

In: Checklisten der Zahnmedizin Endodontie

Thieme-Verlag, Stuttgart 2008b, S. 123-139

Hülsmann M, Stotz S (1997):

Efficacy, cleaning ability and safety of different devices for gutta-percha removal in root canal retreatment.

Int Endod J 30, 227-233

Hülsmann M, Bluhm V (2004):

Efficacy, cleaning ability and safety of different rotary NiTi instruments in root canal retreatment.

Int Endod J 37, 468-476

Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH (2005):

Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means.

Endodontic Topics 10, 30-76

Hülsmann M, Drebenstedt S, Holscher C (2011):

Shaping and filling root canals during root canal re-treatment.

Endodontic Topics 19, 74-124

Hunter KR, Doblecki W, Pelleu GB Jr (1991):

Halothane and Eucalyptol as alternatives to Chloroform for softening gutta-percha.

J Endod 17, 310-311

Hussne RP, Braga LC, Berbert FLCV, Buono VTL, Bahia MGA (2011):

Flexibility and torsional resistance of three nickel-titanium retreatment instrument systems.

Int Endod J 44, 731-738

Imura N, Kato AS, Hata GI, Uemura M, Toda T, Weine F (2000):

A comparison of the relative efficacies of four hand and rotary instrumentation techniques during endodontic retreatment.

Int Endod J 33, 361-366

Jacobson HL, Xia T, Baumgartner JC, Marshall JG, Beeler WJ (2002):

Microbial leakage evaluation of the continuous wave of condensation.

J Endod 28, 269-271

Jorgensen SM, Demirkaya O, Ritman EL (1998):

Three-dimensional imaging of vasculature and parenchym in intact rodent organs with X-ray micro-CT.

Am J Physiol Heart Circ Physiol 275, 1103-1114

Jung M, Lommel D, Klimmek J (2005):

The imaging of root canal obturation using micro-CT.

Int Endod J 38, 617-626

Kerekes K, Tronstad L (1979):

Long-term results of endodontic treatment performed with a standardized technique.

J Endod 5, 83-90

Kfir A, Tsesis I, Yakirevich E, Matalon S, Abramovitz I (2012):

The efficacy of five techniques for removing root filling material: microscopic versus radiographic evaluation.

Int Endod J 45, 35-41

Kosti E, Lambrianidis T, Economides N, Neofitou (2006):

Ex vivo study of the efficacy of H-files and rotary Ni–Ti instruments to remove gutta-percha and four types of sealer

Int Endod J 39, 48-54

Ladley RW, Campbell AD, Hicks ML, Li SH (1991):

Effectiveness of halothane used with ultrasonic or hand instrumentation to remove gutta-percha from the root canal.

J Endod 17, 221- 224

Lang H, Raab WHM (2005):

Impact of endodontical procedures on the deformation of anterior maxillary teeth.

Dtsch Zahnärztl Z 60, 26-31

Linn J, Messer HH (1994):

Effect of restorative procedures on the strength of endodontically treated molars.

J Endod 20, 479-85

Löst C, Wesselink PR, Winkler R (1992):

Grundlagen und Prinzipien der modernen Endodontie.

Endodontie 1, 7-18

Mandel E, Friedman S (1992):

Endodontic retreatment : A rational approach to root canal reinstrumentation.

J Endod 18, 565-569

Marfisi K, Mercade M, Plotino G, Duran-Sindreu F, Bueno R, Roig M (2010):

Efficacy of three different rotary files to remove gutta-percha and Resilon from root canals.

Int Endod J 43, 1022-1028

Masiero AV, Barletta FB (2005):

Effectiveness of different techniques for removing gutta-percha during retreatment.

Int Endod J, 38: 2-7

Michanowicz AE, Michanowicz JP, Michanowicz AM, Czonstkowsky M, Zullo TP (1989):

Clinical evaluation of low-temperature thermoplasticized injectable gutta-percha: a preliminary report.

J Endod 15, 602-7

Mills JC (1999):

The Endodontic Autopsy: A Valid Learning Tool.

J Endod 25, 451-452

Mollo A, Botti G, Principi GN (2011):

Efficacy of two Ni-Ti systems and hand files for removing gutta-percha from root canals.

Int Endod J 45, 1-6

Moore J, Fitz-Walter P, Parashos P (2009):

A micro-computed tomographic evaluation of apical root canal preparation using three instrumentation techniques.

Int Endod 42, 1057-1064

Nair PN (2004):

Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures.

Crit Rev Oral Biol Med 15, 348-381

Nair PN, Sjögren U, Krey G, Kahnberg KE, Sundqvist G (1990):

Intraradicular bacteria and fungi in root- filled, asymptomatic human teeth with therapy-resistant periapical lesions: A long-term light and electron microscopic follow up study.

J Endod 16, 580-588

Nair PN, Henry S, Cano V, Vera J (2005):

Microbial status of apical root canal system of human mandibular first molars with primary apical periodontitis after "one visit" endodontic treatment.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 99, 231-252.

Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2008):

Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature Part 2. Influence of clinical factors.

Int Endod J 41, 31-36

Ng YL, Mann V, Gulabivala K (2011):

A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health.

Int Endod J 7, 583-609

Paqué F, Musch U, Hülsmann M (2005):

Comparison of root canal preparation using RaCe and Pro Taper rotary Ni-Ti instruments.

Int Endod J 38, 8-16

Paqué F, Ganahl D, Peters OA (2009):

Effects of root canal preparation on apical geometry assessed by micro – computed tomography.

J Endod 35, 1056-1059

Paqué F, Balmer M, Attin T, Peters OA (2010):

Preparation of oval-shaped root canals in mandibular molars using Nickel – Titanium Rotary Instruments: A micro – computed Tomography Study.

J Endod 36, 703-707

Peters OA, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F (2000):

Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography.

J Dent Res 79, 1405-1409

Peters OA, Schönenberger K, Laib A (2001):

Effects of four Ni–Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography.

Int Endod J 34, 221-230

Peters OA, Peters CI, Schönenberger K, Barbakow (2003):

ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT.

Int Endod J 36, 86-92

Ponti TM, McDonald NJ, Kuttler S, Strassler HE, Dumsha TC (2002):

Canal centring ability of two rotary file systems.

J Endod 28, 283-286.

Pruett JP, Clement DJ, Cames DL (1997):

Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments.

J Endod 23, 77-85

Rangel S, Cremonese R, Bryant S, Dummer P (2005):

Shaping ability of RaCa rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals.

J Endod 31, 460- 463

Ribeiro DA, Matsumoto MA, Marques MEA, Salvadori DMF (2007):

Biocompatibility of gutta-percha solvents using in vitro mammalian test-system.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 103, e106-e109

Ring J, Murray PE, Namerow KN, Moldauer BI, Garcia-Godoy F (2009):

Removing root canal obturation materials. A comparison of rotary file systems and re-treatment agents.

J Am Dent Assoc 140, 680-688

Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S (2010):

Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Active GP or Guttaflow following removal with NiTi instruments.

Int Endod J 43, 200-209

Saad AY, Al-Hadlaq SM, Al-Katheeri NH (2007):

Efficacy of two rotary NiTi instruments in the removal of gutta-percha during root canal retreatment.

J Endod 33, 38-41

Sae-Lim V, Rajamanickam I, Lim BK, Lee HL (2000):

Effectiveness of ProFile .04 Taper Rotary Instruments in endodontic retreatment.

J Endod 26, 100-104

Saunders WP, Saunders EM (1994):

Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review.

Endod Dent Traumatol 10, 105-108

Scelza MFZ, Coil MJ, Maciel AC, Oliveira LRL, Scelza P (2008):

Comparative SEM evaluation of three solvents used in endodontic retreatment: an Ex vivo study.

J Appl Oral Sci 16, 24-29

Schäfer E (2000):

Wurzelkanalfüllmaterialien.

Dtsch Zahnärztl Z 55, 15-25

Schäfer E, Lohmann D (2002):

Efficiency of rotary nickel–titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile – Part 2. Cleaning effectiveness and instrumentation results in severely curved root canals of extracted teeth.

Int Endod J 35, 414-521

Schäfer E, Diez C, Hoppe W, Tepel J (2002):

Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth.

J Endod 28, 211-216

Schirrmeister JF (2006):

Lösungsmittel bei der Revision von Wurzelkanalfüllungen – Eine Übersicht.

Endodontie 15, 325-335

Schirrmeister JF, Wrbas KT, Schneider FH, Altenburger MJ, Hellwig E (2006a):

Effectiveness of hand file and three nickel-titanium rotary instruments for removing gutta-percha in curved root canals during retreatment.

Oral Surg Oral Med Pathol Oral Radiol Endod 101, 542-547

Schirrmeister JF, Hermanns P, Meyer KM, Goetz F, Hellwig E (2006b):

Detectability of residual Epiphany and gutta-percha after root canal retreatment using a dental operating microscope and radiographs: an ex vivo study.

Int Endod J 39, 558-565

Schneider SW (1971):

A comparison of canal preparations in straight and curved canals.

Oral Surg 32, 271-275

Seltzer S, Naidorf IJ (1985):

Flare-ups in endodontics: I. Etiological factors.

J Endod 11, 472-478

Shemesh H, Roeleveld AC, Wesselink PR, Wu MK (2011):

Damage to root dentin during retreatment procedures.

J Endod 37, 63-66

Short JA, Morgan LA, Baumgartner JC (1997):

A comparison of canal centering ability of four instrumentation techniques.

J Endod 23, 503-507

Siqueira jr J (2001):

Aetiology of root canal failure: why well-treated teeth can fail.

Int Endod J 34, 1-10

Sjögren U, Hägglund B, Sundqvist G, Wing K (1990):

Factors affecting the long-term results of endodontic treatment.

J Endod 16, 498-504

Só MCR, Saran C, Magro ML, Vier-Pelisser FV, Munhoz M (2008):

Efficacy of ProTaper Retreatment System in root canals filled with guttapercha and two endodontic sealers.

J Endod 34, 1223-1225

Somma F, Cammarota G, Plotino G, Grande NM, Pameijer CH (2008):

The effectiveness of manual and mechanical instrumentation for the retreatment of three different root canal filling materials.

J Endod 34, 466-469

Stabholz A, Friedman S (1988):

Endodontic retreatment-case selection and technique. Part 2: Treatment planning for retreatment.

J Endod 14, 607-614

Sundqvist G, Figdor D, Endo D, Persson S, Sjögren U (1998):

Microbiologic analysis of teeth with failed endodontic treatment and the outcome of conservative re-treatment.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 85, 86-93

Tamse A, Unger U, Metzger Z, Rosenberg M (1986):

Gutta-percha solvents: a comparative study.

J Endod 12, 337-339

Tanalp J, Kaptan F, Sert S, Kayahan B, Bayirli G (2006):

Quantitative evaluation of the amount of apically extruded debris using 3 different rotary instrumentation systems.

Oral Surg, Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 101, 250-257

Taşdemir T, Er K, Yildirim T, Celik D (2008a):

Efficacy of three rotary NiTi instruments in removing gutta-percha from root canals.

Int Endod J 41, 191-196

Taşdemir T, Yildirim T, Celik D (2008b):

Comparative study of removal of current endodontic fillings.

J Endod 34, 326-329

Tepel J, Schäfer E, Hoppe W (1995):

Properties of endodontic hand instruments used in rotary motion. Part 1. Cutting efficiency.

J Endod 21, 418-421

Trope M (1991):

Flare-up rate of single-visit endodontics.

Int Endod J 24, 24-27

Van Nieuwenhuysen JP, Aouar M, D'Hoore (1994):

Retreatment or radiographic monitoring in endodontics.

Int Endod J 27, 75-81

Weiger R, Geurtsen W, Heidemann D, Löst C, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, Hickel R (2001):

Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen.

Stellungnahme DGZMK V 1.0 Stand 11/00.

Dtsch Zahnärztl Z 56, 206-207

Wenneberg A, Ørstavik D (1989):

Evaluation of alternatives to chloroform in endodontic practice.

Endod Dent Traumatol 5, 234-237

Wesselink PR

Root filling techniques.

In: Textbook of Endodontology.

Hrsg. Bergenholtz G, Hørsted-Bindslev P, Reit C

Oxford: Blackwell, Singapur 2003, S. 286-299

Wilcox LR (1989):

Endodontic retreatment: ultrasonic and chloroform as the final step in reinstrumentation.

J Endod 15, 125-128

Wilcox LR (1995):

Endodontic retreatment with Halothane versus Chloroform solvent.

J Endod 21, 305-307

Wilcox LR, Juhlin JJ (1994):

Endodontic retreatment of thermafil versus laterally condensed gutta-percha.

J Endod 20, 115-117

Wiseman A, Cox TC, Paranjpe A, Flake NM, Cohenca N, Johnson JD (2011):

Efficacy of Sonic and Ultrasonic Activation for Removal of Calcium Hydroxide from Mesial Canals of Mandibular Molars: A Microtomographic Study.

J Endod 37, 235-238

Yin X, Cheung GS, Zhang C, Masuda YM, Kimura Y, Matsumoto K (2010):

Micro-computed tomographic comparison of Nickel–Titanium Rotary versus traditional instruments in c-shaped root canal system.

J Endod 36, 708-712

Zand V, Bidar M, Ghaziani P, Rahimi S, Shahi S (2007):

A comparative SEM investigation of the smear layer following preparation of root canals using nickel titanium rotary and hand instruments.

J Oral Sci 49, 47-52

Zarrabi MH, Bidar M, Jafarzadeh H (2006):

An in vitro comparative study of apically extruded debris resulting from conventional and three rotary (Profile, Race, FlexMaster) instrumentation techniques.

J Oral Sci 48, 85-88

Zelada G, Varela P, Martin B, Bahillo JG, Magan F, Ahn S (2002):

The effect of rotational speed and the curvature of root canals on the breakage of rotary endodontic instruments.

J Endod 28, 540-542

Zmener O, Pameijer CH, Baneqas G (2006):

Retreatment efficacy of hand versus automated instrumentation in oval-shaped root canals: an ex vivo study.

Int Endod J 39, 521-526

10. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 4.1: Homogene Einteilung der Gruppen nach Krümmungsradius und -winkel.....	29
Tabelle 4.2: Standardisierte Reihenfolge der Arbeitsschritte mit FlexMaster-Instrumenten bei der Wurzelkanalpräparation.....	30
Tabelle 4.3: Arbeitsschritte der Revision mit Hedström-Feilen und Gates-Glidden-Bohrern (AL=Arbeitslänge).....	37
Tabelle 4.4: Arbeitsschritte der Revision mit D-RaCe (DR) und BioRaCe (BR), (AL=Arbeitslänge).....	38
Tabelle 4.5: Arbeitsschritte der Revision mit ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen (D1-D3) und ProTaper-Feilen (F2-F4), (AL=Arbeitslänge).....	38
Tabelle 5.1: Zusammenfassung der drei experimentellen Gruppen bezüglich der Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (SD) von Krümmungswinkel und Krümmungsradien (bl = bucco-lingual, md = mesio-distal, HF=Hedström-Feile, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	40
Tabelle 5.2: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der T1-Werte (HF=Hedström-Feilen, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	43
Tabelle 5.3: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der Zeit vom Erreichen der AL bis zur Beendigung der Revision(T2) (HF=Hedström-Feilen, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	45
Tabelle 5.4: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der gesamten Revisionszeit (T-gesamt) (HF=Hedström-Feile, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	46
Tabelle 5.5: Übersicht der Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (SD) bezüglich der Zeiten T1, T2 und T-gesamt (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	47

Tabelle 5.6: Übersicht der Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (SD) bezüglich des Dentinabtrages in mm ³ (HF=Hedström-Feilen, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	48
Tabelle 5.7: Übersicht der Signifikanzen bezüglich des Dentinabtrags (HF=Hedström-Feile, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	49
Tabelle 5.8: Übersicht der Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (SD) bezüglich der Wurzelkanalfüllungsreste (in %) (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	51
Tabelle 5.9: Übersicht der Signifikanzen bezüglich der Wurzelkanalfüllungsreste (HF=Hedström-Feile, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	51
Abb. 2.1: Schema der Micro-Computertomografie (Jorgensen et al. 1998, S. 1104)	21
Abb. 4.1: Versuchsaufbau.....	25
Abb. 4.2: Bestimmung des Krümmungswinkels nach Schneider et al. 1971.....	27
Abb. 4.3: Mikrocomputer Tomograph, eXplore locus SP micro-CT (GEHC, Ontario, Kanada).....	31
Abb. 4.4: Kammer mit Objektträger und Filterrad.....	32
Abb. 4.5: Dreidimensionale Ansicht eines Zahnes mit Wurzelkanalfüllung links und die Darstellung der Wurzelkanalfüllung rechts mit MicroView 2.1.2 (GEHC).....	33
Abb. 4.6: Erstellung eines ROI (Region Of Interest) um den zu analysierenden Zahn mit Hilfe der MicroView Software 2.1.2.....	34
Abb. 4.7: Histogramm der durch das ROI gefassten Region.....	34
Abb. 4.8: Ermittlung des Volumens der Wurzelkanalfüllung durch eine rote Markierung der entsprechenden Anteile im Histogramm und die Überprüfung in den rekonstruierten Bildern (rechts im Bild)	35

Abb. 5.1:	Box-Plot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge (HF=Hedströmfeile, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	41
Abb. 5.2:	Mean-Plot-Diagramm für die Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge (HF=Hedströmfeilen, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	42
Abb. 5.3:	Box-Plot-Diagramm für die Zeit T2 (in s) bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung (HF=Hedström-Feilen, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	43
Abb. 5.4:	Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T2 (in s) bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung (HF=Hedström-Feilen, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	44
Abb. 5.5:	Box-Plot-Diagramm für die Zeit T-gesamt (in s) für die gesamte Revisionsbehandlung (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	45
Abb. 5.6:	Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T-gesamt (in s) für die gesamte Revisionsbehandlung (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	46
Abb. 5.7:	Box-Plot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags (in mm ³) während der Revision (HF=Hedström-Feilen, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	47
Abb. 5.8:	Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags (in mm ³) während der Revision (HF=Hedström-Feile, D-R=D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	48

Abb. 5.9:	Box-Plot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste (in %) nach der Revision (HF=Hedström-Feile, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	49
Abb. 5.10:	Mean-Plot-Diagramm zur Darstellung der Mittelwerte von Wurzelkanalfüllungsresten (in %) nach der Revision (HF=Hedström-Feile, D-R= D-RaCe/BioRaCe, PTR=ProTaperRetreatment/ProTaper).....	50
Abb. 5.11:	Darstellung der gelb markierten Wurzelkanalfüllung vor (links) und nach (rechts) der Revision mit Hedström-Feilen.....	52
Abb. 5.12:	Darstellung der gelb markierten Wurzelkanalfüllung vor (links) und nach (rechts) der Revision mit D-RaCe/BioRaCe.....	52
Abb. 5.13:	Darstellung der gelb markierten Wurzelkanalfüllung vor (links) und nach (rechts) der Revision mit ProTaper Retreatment und ProTaper.....	53
Abb. 5.14:	Instrumentenfraktur D2 (D-RaCe) links und D3 (ProTaper-Retreatment) rechts.....	54
Abb. 5.15:	Laterale Perforation innerhalb der ProTaper-Retreatment/ProTaper-Gruppe.....	54

11. Anhang: Tabelle zur numerischen Zusammenfassung

Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten Mittelwerte jedes Zahnes bezüglich des maximal gemessenen Winkels (Winkel max), des kleinsten Radius (Radius min), die Volumetrie der Zahnhartsubstanz (Dentin) und Wurzelkanalfüllung (WKF) vor und nach der Revision (Rev.), den extrudierten Debris und die Zeiten, die für die Revision bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) und bis zum Ende der Revision (T2) benötigt wurden.

Zahn	Gruppe	Winkel max (°)	Radius min (mm)	Dentin vor Rev.(mm ²)	Dentin nach Rev. (mm ²)	Dentin- verlust (mm ²)	WKF vor Rev. (mm ²)	WKF nach Rev. (mm ²)	WKF- Reste (%)	extrudierter Debris	T1 in s	T2 in s	Tges in s
1	1	35,213	10,11	372,143	366,292	5,851	5,003	0,316	6,3162103	0	496	262	758
2	1	26,607	8,814	383,127	380,294	2,833	3,684	0,303	8,2247557	0	388	194	582
3	1	22,607	8,814	273,984	269,377	4,607	4,076	0,278	6,8204122	0	442	238	680
5	1	32,808	6,127	369,914	364,806	5,108	4,939	0,171	3,4622393	ja	277	105	382
9	1	20,96	7,031	458,001	451,577	6,424	4,642	0,231	4,9763033	0	169	92	261
10	1	21,11	10,332	385,458	383,264	2,194	7,31	0,317	4,3365253	ja	250	86	336
12	1	39,62	4,825	321,3	314,405	6,895	5,477	0,203	3,7064086	ja	381	199	580
16	1	27,014	9,817	370,596	365,165	5,431	3,19	0,213	6,677116	0	281	129	410
25	1	29,963	6,961	352,888	348,458	4,43	4,82	0,233	4,8340249	0	398	182	580
33	1	30,764	5,469	216,328	210,644	5,684	6,235	0,483	7,7465918	0	189	144	333
37	1	28,312	6,692	247,554	244,343	3,211	10,556	1,377	13,044714	0	251	221	472
38	1	23,67	7,91	273,766	271,159	2,607	7,853	0,466	5,9340379	ja	366	193	559
43	1	23,209	6,495	246,565	241,181	5,384	7,442	0,436	5,8586402	0	301	214	515
51	1	26,045	6,36	210,41	201,659	8,751	8,791	0,065	0,7393926	ja	376	141	517
61	1	20,47	7,527	237,288	227,405	9,883	5,475	0,066	1,2054795	0	239	102	341
62	1	21,972	6,058	310,877	298,546	12,331	6,856	0,426	6,2135356	0	306	214	520
71	1	29,653	7,093	320,744	309,281	11,463	5,83	0,338	5,7975986	0	429	150	579
77	1	29,931	7,793	380,966	370,557	10,409	4,049	0,365	9,0145715	0	718	160	878
85	1	20,678	6,349	316,106	309,414	6,692	9,091	1,212	13,331867	0	389	152	541
13	2	31,513	5,974	524,125	511,629	12,496	4,136	0,117	2,8288201	0	75	83	158
15	2	25,68	6,186	310,634	302,455	8,179	4,005	0,154	3,8451935	ja	59	80	139
17	2	27,053	8,126	320,835	308,01	12,825	5,283	0,073	1,3817906	ja	66	163	229
22	2	34,548	6,405	295,79	288,516	7,274	5,206	0,299	5,743373	0	60	83	143
24	2	28,2	9,541	402,362	390,284	12,078	3,457	0,04	1,1570726	0	66	92	158
26	2	37,118	6,747	366,703	349,71	16,993	4,094	0,167	4,0791402	0	102	105	207
30	2	21,77	9,5	353,939	339,734	14,205	6,637	0,26	3,9174326	0	85	130	215
34	2	36,803	5,322	288,113	278,55	9,563	10,698	0,211	1,9723313	0	98	204	302
35	2	24,709	7,264	286,47	278,972	7,498	9,649	0,658	6,8193595	0	91	103	194
44	2	24,264	7,513	267,616	259,392	8,224	5,601	0,3	5,3561864	0	93	104	197
49	2	29,853	6,113	194,143	188,744	5,399	5,717	0,152	2,6587371	0	167	30	197
53	2	27,028	5,678	300,061	287,117	12,944	4,44	0,107	2,4099099	0	113	83	196
58	2	21,673	12,228	288,659	271,921	16,738	6,048	0,148	2,4470899	0	91	84	175
68	2	26,507	10,675	414,315	400,106	14,209	7,537	0,362	4,802972	0	120	131	251
72	2	31,947	7,583	314,021	298,364	15,657	4,443	0,286	6,4370921	0	99	157	256
74	2	27,95	3,16	320,17	304,299	15,871	4,404	0,085	1,9300636	0	89	119	208
76	2	31,403	8,453	392,727	373,156	19,571	3,791	0,127	3,3500396	0	95	105	200
80	2	20,265	11,473	235,138	226,053	9,085	6,276	0,109	1,736775	ja	96	108	204
81	2	29,825	5,12	204,135	194,311	9,824	4,088	0,277	6,7759296	0	82	88	170
4	3	27,843	7,74	406,846	392,145	14,701	3,913	1,362	34,807053	0	231	76	307
6	3	22,967	8,618	372,921	358,618	14,303	5,607	0,807	14,392723	ja	133	129	262
8	3	23,134	6,874	425,056	410,033	15,023	5,797	0,263	4,5368294	0	119	86	205
20	3	34,548	6,405	387,326	372,526	14,8	5,688	0,14	2,4613221	0	105	105	210
21	3	33,348	5,964	414,205	401,662	12,543	4,66	0,732	15,708155	0	68	132	200
27	3	35,674	6,418	338,734	324,653	14,081	5,89	1,057	17,945671	0	78	131	209
28	3	23,164	6,418	374,965	354,789	20,176	7,564	0,142	1,8773136	ja	63	131	194
29	3	28,086	6,013	400,779	388,55	12,229	4,699	0,37	7,8740157	0	153	128	281
31	3	26,492	8,716	378,827	358,814	20,013	5,435	0,161	2,9622815	0	96	115	211
32	3	36,492	5,072	282,921	271,823	11,098	4,603	0,346	7,5168368	0	110	144	254
39	3	22,8	10,687	251,65	242,768	8,882	5,315	0,384	7,2248354	0	125	101	226
40	3	31,482	6,587	213,224	207,429	5,795	7,664	3,011	39,287578	0	125	198	323
46	3	29,339	3,656	265,51	252,686	12,824	4,839	0,327	6,7575945	0	78	126	204
50	3	23,149	7,041	281,832	266,3	15,532	7,992	0,993	12,424925	0	105	157	262
56	3	21,831	4,891	343,642	335,749	7,893	7,124	1,225	17,195396	0	114	148	262
57	3	22,585	8,527	367,464	355,557	11,907	5,32	0,203	3,8157895	0	225	151	376
69	3	26,38	3,67	281,129	267,411	13,718	5,1065	0,448	8,7731323	0	191	204	395
82	3	34,735	6,261	295,927	280,297	15,63	5,582	0,33	5,9118595	ja	198	169	367
84	3	28,03	5,166	191,869	183,397	8,472	8,34	0,278	3,3333333	0	137	282	419

12. Materialliste

Winkelstück	Sirona, Bensheim, Deutschland
Diamantierte Schleifkörper	Komet, Lemgo, Deutschland
Digitaler Röntgenapparat	Trophy Elitys, Croissy-Beauborg, Frankreich
Micro-CT	Explore locus SP, General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada
Guttapercha	Vereinigte Dentalwerke, München, Deutschland
AH Plus sealer®	Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland
Fingerspreader	Vereinigte Dentalwerke, München, Deutschland
FlexMaster-Feilen bis 02./30	Vereinigte Dentalwerke, München, Deutschland
Hedström-Feilen bis 02./40	Vereinigte Dentalwerke, München, Deutschland
Gates-Glidden-Bohrer, Größe II und III	Komet, Lemgo, Deutschland
ProTaper-Feilen bis F4, und ProTaper-Universal-Retreatment-Feilen	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz
D-RaCe- und BioRaCe-Feilen bis BR5	FKG, Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz
Endo IT Professional Motor	Vereinigte Dentalwerke, München, Deutschland
Natriumhypochlorit 1%	Hedinger, Stuttgart, Deutschland
Ethylendiamintetraacetat 20%	Lege artis, Dettenhausen, Deutschland
NaviTip™-Spülnadel	Ultradent, South Jordan, UT, USA
Papierspitzen	Alfred Becht GmbH, Offenburg, Deutschland
Cavit	3M ESPE, Seefeld, Deutschland

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. dent. Michael Hülsmann, Kommissarischer Direktor der Abteilung Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen, gilt mein Dank für die Überlassung des Themas.

Danken möchte ich Frau Dr. med. dent. Tina Rödig, Oberärztin der Abteilung Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, für die engagierte und sorgfältige Betreuung dieser Arbeit.

Für die Einweisung am Micro-CT möchte ich Herrn Dipl.-Phys. Christian Dullin, aus der Abteilung Diagnostische Radiologie der Universitätsmedizin Göttingen, danken.

Für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung danke ich Herrn Dr. rer. nat. Frank Konietschke aus der Abteilung Medizinische Statistik der Universität Göttingen.

