

Aus der Abteilung Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie
(Komm. Leiter: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann)
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**In-vitro-Vergleich zweier verschiedener Techniken
zur Revision von Wurzelkanalfüllungen**

in 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
Jolantha Kupis
aus Deutsch Piekar / Polen
Göttingen 2012

Dekan: Prof. Dr. H. K. Kroemer

I. Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

II. Berichterstatter/in: Prof. Dr. med., Dr. med. dent. Engelke

III. Berichterstatter/in:

Tag der mündlichen Prüfung: 15.01.2013

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Ziele der Arbeit	3
3 Literaturübersicht.....	4
3.1 Ziele und Prognose einer Wurzelkanalbehandlung	4
3.2 Misserfolg von Wurzelkanalbehandlungen.....	5
3.3 Indikationen und Prognose einer Revision	6
3.4 Guttapercha als Wurzelkanalfüllungsmaterial	8
3.4.1 Revisionsmethoden bei Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen.....	10
3.4.2 Revision von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen mit Handinstrumenten	11
3.4.3 Revision von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen mit Nickel-Titan-Instrumenten ..	12
3.4.4 FlexMaster	13
3.4.5 Einsatz von Lösungsmitteln	15
3.5 Komplikationen bei Revisionen	16
3.6 Micro-CT	18
3.6.1 Bewertung einer Revision anhand des Micro-CTs	21
4 Material und Methode	23
4.1 Auswahl und Vorbereitung der Zähne	23
4.2 Micro-CT	29
4.3 Revision.....	32
5. Ergebnisse.....	36
5.1 Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)	36
5.2 Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2).....	38
5.3 Effektivität der Revision.....	43
5.4 Dentinabtrag während der Revision	46
5.5 Zwischenfälle	49

Inhaltsverzeichnis

6 Diskussion	50
6.1 Diskussion der Methode.....	50
6.2 Diskussion der Ergebnisse.....	55
7 Schlussfolgerungen	61
8 Zusammenfassung	62
9 Literaturverzeichnis	64
10 Anhang: Materialliste, Tab.10.1	82

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Schematische Darstellung des Micro-CTs	S. 20
Abb. 4.1a) und b)	Festlegung der drei Referenzpunkte A, B und C in bukkolingualer (a) und mesio-distaler Projektion (b)	S. 24
Abb. 4.2	Methode zur Bestimmung des Krümmungswinkels nach SCHNEIDER (1979) (Abbildung aus SCHÄFER et al. 2002)	S. 25
Abb. 4.3	Methode zur Bestimmung des Krümmungsradius (SCHÄFER et al. 2002)	S. 26
Abb. 4.5	eXplore Locus SP Micro-Computertomograph der Firma GE Medical Systems	S. 27
Abb. 4.6	Anlegen einer „Region Of Interest“ (ROI) mit Hilfe der Ansichtsoftware MicroView (GE Healthcare)	S. 30
Abb. 4.7	Grauerthistogramm mit mehreren Peaks entsprechend der unterschiedlichen Medien Zahnhartsubstanz, Wurzelkanalfüllmaterial und Luft	S. 31
Abb. 4.8	Darstellung des Wurzelkanalfüllmaterials durch Markierung des entsprechenden Kurvenanteils	S. 32
Abb. 5.1	Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 36
Abb. 5.2	Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 37
Abb. 5.3	Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 37
Abb. 5.4	Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 38
Abb. 5.5	Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal;	

	FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 39
Abb. 5.6	Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 39
Abb. 5.7	Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 40
Abb. 5.8	Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 40
Abb. 5.9	Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 41
Abb. 5.10	Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 42
Abb. 5.11	Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 42
Abb. 5.12	Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 43
Abb. 5.13	Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste in %; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 44
Abb. 5.14	Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste in %; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 45
Abb. 5.15a) und b)	Micro-CT-Aufnahmen einer repräsentativen Probe vor (a) und nach (b) der Revision mit FlexMaster-Instrumenten	S. 45
Abb. 5.16a) und b)	Micro-CT-Aufnahmen einer repräsentativen Probe vor (a) und nach (b) der Revision mit Hedström-Feilen	S. 46
Abb. 5.17	Boxplot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags	

	in mm ³ ; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 47
Abb. 5.18	Meanplot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags in mm ³ ; FM = FlexMaster, HF= Hedström-Feilen	S. 47

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Übersicht zu den Instrumentengrößen und Konizitäten der FlexMaster-Instrumente	S. 14
Tab. 4.1	Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen sowie statistische Auswertung der Gruppeneinteilung SD = Standardabweichung, bl = bucco-linguale Projektion, md = mesio-distale Projektion, mb = mesio-bukkaler Kanal, ml = mesio-lingualer Kanal, Vol. WKF = Volumen Wurzelkanalfüllung, FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen	S. 28
Tab. 4.2	Übersicht der Konizitäten und Größen der in beiden Gruppen verwendeten Instrumente	S. 35
Tab. 5.1	Übersicht der erhobenen Daten zur Arbeitszeit T1 in (s); SD = Standardabweichung	S. 38
Tab. 5.2	Übersicht der erhobenen Daten zur Arbeitszeit T2 in (s); SD = Standardabweichung	S. 41
Tab. 5.3	Übersicht der erhobenen Daten zur Arbeitszeit T-gesamt in (s); SD = Standardabweichung	S. 43
Tab. 5.4	Übersicht zu den präoperativen Volumenmittelwerten des Wurzelkanalfüllungsmaterials (WKF)	S. 44
Tab. 5.5	Deskriptive Übersicht der erhobenen Daten; SD = Standardabweichung	S. 48
Tab. 10.1	Übersicht der erfassten Krümmungswinkel und –radien, Volumina der Zahnhartsubstanz sowie Wurzelkanalfüllung und Arbeitszeiten	S. 83

1 Einleitung

In der konservierenden Zahnheilkunde hat sich die endodontische Therapie von Zähnen etabliert. Der zunehmende Wunsch der Patienten nach langfristigem Erhalt ihrer Zähne sowie die Einführung neuer Techniken und Materialien ließen den Stellenwert der Wurzelkanalbehandlung steigen.

Eine Wurzelkanalbehandlung ist bei irreversiblen Pulpitiden, Nekrosen des Pulpagewebes sowie apikalen Parodontitiden indiziert. Diese Erkrankungen werden in der Regel durch kariöse Läsionen oder traumatische Schädigungen verursacht und sind häufig mit einer klinischen Symptomatik assoziiert.

Nach den Kriterien der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie (ESE) ist eine endodontische Therapie als Erfolg anzusehen, wenn der Zahn 4 Jahre postoperativ weder klinische Symptome noch röntgenologische Veränderungen der periapikalen Strukturen zeigt (ESE 2006). In zahlreichen Langzeituntersuchungen (KEREKES und TRONSTAD 1979, BYSTRÖM et al. 1987, FRIEDMAN et al. 2003) konnte gezeigt werden, dass die Erfolgsrate bei einer korrekt durchgeführten Wurzelkanalbehandlung über 84% beträgt.

Es gibt allerdings mehrere Ursachen, die zum Scheitern einer endodontischen Primärbehandlung, erkennbar an klinischen Symptomen und/oder radiologischen Befunden, beitragen können. Hierbei spielen die Persistenz von Mikroorganismen aufgrund einer ungenügenden Desinfektion während der Primärbehandlung oder eine Reinfektion des Wurzelkanalsystems eine entscheidende Rolle. Daher sind die Ziele sowohl der Primär- als auch der Revisionsbehandlung die Eliminierung intrakanalärer Mikroorganismen und die Vermeidung einer Reinfektion (FRIEDMAN 2002). Um eine vollständige Desinfektion des Hohlraumsystems zu erreichen, sollte eine vollständige Entfernung des bereits vorhandenen Wurzelkanalfüllmaterials erfolgen sowie die Gängigkeit des gesamten Wurzelkanalsystems gewährleistet sein. SUNDQVIST et al. (1998) gaben als Indikation für eine Revision eine apikale Läsion in Zusammenhang mit unvollständig gefüllten Wurzelkanälen an. Außerdem sollte eine Revisionsbehandlung an röntgenologisch fragwürdigen Wurzelkanalfüllungen erfolgen, wenn eine neue koronale Restauration geplant ist.

Bei Vorliegen einer persistierenden intraradikulären Infektion ist eine orthograde Revision einem chirurgischen Vorgehen zunächst vorzuziehen (YAN 2006). Ein chirurgischer Eingriff als alleinige Therapie und der damit verbundene retrograde Kanalverschluss beseitigen nicht die Ursache der intrakanalären Infektion, da eine vollständige Instrumentierung und die nötige Desinfektion aller Wurzelkanäle nur auf orthogradem Weg möglich sind. Als alternative Therapiemöglichkeiten kommen die Extraktion, eine Wurzelamputation sowie die Hemisektion in Frage.

Da die endodontische Revisionsbehandlung eine der zeitintensivsten Therapien der Zahnerhaltung darstellt, steht dem Zahnarzt eine Vielzahl von Techniken zur Entfernung unterschiedlicher Wurzelfüllmaterialien zur Verfügung. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein besonderes Augenmerk auf die Entfernung von Wurzelkanalfüllungen aus Guttapercha gelegt, da dieses Kernmaterial in Verbindung mit einem Sealer das am häufigsten verwendete Wurzelkanalfüllmaterial ist. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie sich diese Art von Füllmaterial durch das maschinelle Nickel-Titan-System FlexMaster und manuell eingesetzte Hedström-Feilen entfernen lässt. Beide Systeme wurden in gekrümmten Wurzelkanälen untersucht, die häufig eine Herausforderung für den Zahnarzt darstellen.

2 Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser *In-vitro*-Untersuchung war der Vergleich zweier verschiedener Techniken hinsichtlich ihrer Effektivität und Sicherheit im Rahmen einer endodontischen Revision. Es wurde ein maschinelles Nickel-Titan-System (FlexMaster, VDW, München) und eine manuelle Revisionstechnik mit Hedström-Feilen (VDW) an extrahierten Unterkiefermolaren überprüft. Im Gegensatz zu anderen Studien waren die Wurzelkanäle bereits präpariert und wurzelkanalgefüllt. Mit Hilfe der Micro-computed Tomography (Micro-CT) wurden prä- und postoperativ die Zähne gescannt. Anhand dieser Scans wurden die Reste des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials und der Zahnhartsubstanzverlust bestimmt. Außerdem wurde die Arbeitszeit für beide Systeme ermittelt und prozedurale Fehler notiert.

3 Literaturübersicht

3.1 Ziele und Prognose einer Wurzelkanalbehandlung

Eine Wurzelkanalbehandlung ist bei einer irreversiblen Pulpitis, bakteriell infizierten Wurzelkanälen sowie pathologischen periapikalen Entzündungen indiziert. Nach den Stellungnahmen der DGZMK (2000) sowie der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie (ESE 2006) ist das Ziel einer Wurzelkanalbehandlung die langfristige Erhaltung eines avitalen Zahnes in seiner Funktion als Kaueinheit. Dabei ist es notwendig, das irreversibel geschädigte Pulpagewebe vollständig zu entfernen, das Wurzelkanalsystem zu desinfizieren und die entstandenen Hohlräume bakteriendicht zu verschließen (FRENTZEN et al. 2004). Die chemomechanische Präparation der Wurzelkanäle gilt als der entscheidende Schritt der endodontischen Therapie (SCHILDER 1974). Hierdurch werden noch vitales oder nekrotisches Pulpagewebe sowie infiziertes Dentin entfernt und die Desinfektion durch Spüllösungen und medikamentöse Einlagen ermöglicht (HÜLSMANN et al. 2005). Um eine Reinfektion zu vermeiden, ist das Abdichten des Wurzelkanalsystems mittels einer dimensionsstabilen Wurzelkanalfüllung sowie einer koronalen Restauration notwendig. Dadurch soll den möglicherweise im Kanalsystem persistierenden Mikroorganismen das Substrat entzogen und das Einwandern neuer Bakterien verhindert werden (LÖST et al. 1992). Nach den Kriterien der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie ist es als Erfolg anzusehen, wenn der endodontisch behandelte Zahn nach 4 Jahren weder klinische Symptome noch röntgenologische Veränderungen der periapikalen Strukturen zeigt (ESE 2006).

In zahlreichen Langzeitstudien wurde der Erfolg von Wurzelkanalbehandlungen untersucht. So lag die Erfolgsquote in der Untersuchung von KERKES und TRONSTAD (1979) bei 91%. Dabei war auffällig, dass bessere Langzeitergebnisse bei Zähnen ohne periradikuläre Aufhellung erreicht wurden. In der Studie von BYSTRÖM et al. (1987) wurden ausschließlich Zähne mit einer periradikulären Aufhellung untersucht, wobei die endodontische Therapie in 84,8% der Fälle erfolgreich war. Ähnliche Ergebnisse lieferte die Untersuchung von SCHMALZ (1990). FRIEDMAN et al. (2003) konnten ebenfalls eine höhere Heilungsrate (92%) bei wurzelkanalbehandelten Zähnen ohne präoperative Parodontitis apicalis

feststellen (74%). In einer Langzeituntersuchung von NG et al. (2011) wurden elf unterschiedliche prognostische Faktoren untersucht, die bezüglich einer Heilung der periapikalen Gewebe sowohl nach einer Primärbehandlung als auch nach einer Revision entscheidend sein könnten. Hierzu zählten unter anderem die An- oder Abwesenheit einer Parodontitis apicalis, die Größe der apikalen Läsion, die Vermeidung einer Perforation oder einer Extrusion von Füllungsmaterial sowie ein dichter koronaler Verschluss. Bis auf einen der elf Faktoren, nämlich die Verwendung von Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) als zusätzliche Spüllösung, hatten alle eine vergleichbare Auswirkung auf die Primärbehandlung sowie die Revision.

3.2 Misserfolg von Wurzelkanalbehandlungen

Es gibt eine Reihe von Ursachen, die zum Scheitern einer primären Wurzelkanalbehandlung beitragen können. MILLS (1999) gab in diesem Zusammenhang präoperative, operative und postoperative Gründe an. Hierzu gehören u.a. ein nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, eine insuffiziente Desinfektion des Kanalsystems während der Behandlung, Instrumentenfrakturen oder eine undichte koronale Restauration. Häufig ist es schwierig, den ausschlaggebenden Grund für einen Misserfolg ausfindig zu machen, da in einigen Fällen eine Kombination mehrerer Ursachen vorliegt. NAIR et al. (1990) unterschieden zwischen lokalen und systemischen Ursachen für das Scheitern einer endodontischen Behandlung. So können eine persistierende Läsion, eine ungenügende Präparation, frakturierte Instrumente, eine Überextension der Wurzelkanalfüllung oder anatomische Besonderheiten des Zahnes lokale Gründe für einen Misserfolg sein. Andererseits kann ein geschwächtes Immunsystem als systemischer Faktor die Ausheilung einer periapikalen Läsion verhindern. SIQUEIRA (2001) hingegen stellte fest, dass bestimmte Zwischenfälle wie Überextension, Unterfüllung oder Instrumentenfrakturen nicht zu einem direkten Misserfolg führen müssen, wenn keine zusätzliche Infektion vorliegt. In jedem Fall geben NAIR et al. (1990) als Hauptursache für das Scheitern einer Wurzelkanalbehandlung die Persistenz von Mikroorganismen im Wurzelkanalsystem an. HANCOCK et al. (2001) bestätigten diese Annahme und gaben die Reinfektion des Kanalsystems aufgrund eines undichten Verschlusses als weiteren Faktor für den Misserfolg einer endodontischen Behandlung an. Das

Vorliegen vitaler Mikroorganismen zum Zeitpunkt der Wurzelkanalfüllung erhöht das Risiko eines Misserfolges (SIQUEIRA 2001). Wie hoch das Risiko einer Reinfektion ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. So ist es auch bei einer qualitativ guten Wurzelkanalbehandlung möglich, dass Bakterien überleben. Dieses ist auf die Schwierigkeit zurückzuführen, apikale Kanalanteile aufgrund ihrer komplexen Anatomie adäquat zu reinigen und zu desinfizieren (GROSSMAN 1972, IDA und GUTMANN 1995). In den Studien von LIN et al. (1991) und SIQUEIRA et al. (1997) konnte gezeigt werden, dass Kanalabschnitte unabhängig von Präparationstechnik und -instrumenten durch chemomechanische Präparation nicht erfasst werden konnten. PETERS et al. (2001) verglichen vier unterschiedliche Präparationstechniken und stellten fest, dass alle Techniken mindestens 35% der Wurzelkanalwände unpräpariert hinterließen. PAQUÉ et al. (2010) kamen in einer Micro-CT-Studie zu dem Ergebnis, dass mindestens 59,6% der Wurzelkanaloberfläche ovaler Kanäle nicht präpariert wurden. In diesen unpräparierten Bereichen können Mikroorganismen überleben, auch wenn die Wurzelkanalfüllung radiologisch suffizient erscheint (LIN et al. 1991). Weiterhin ist es möglich, dass Bakterien in anatomischen Nischen wie Isthmen, Deltas oder Dentintubuli verbleiben und somit Desinfektionsmaßnahmen nicht zugänglich sind (LIN et al. 1991, SIQUEIRA et al. 1996, SIQUEIRA und UZEDA 1996). Diese verbliebenen Bakterien sind unter Umständen zwar einer geringeren Substratzufuhr ausgesetzt, sie sind dennoch teilweise in der Lage, periapikale Entzündungen aufrecht zu erhalten. Auch bei dem Vorliegen eines koronalen oder apikalen Leakage können Speichel oder Gewebeflüssigkeiten Substrat für Mikroorganismen darstellen und die Vermehrung der Bakterien fördern (SIQUEIRA 2001). Es ist von großer Bedeutung, dass sowohl die Wurzelkanalfüllung als auch die koronale Restauration einen bakteriendichten Verschluss gewährleisten, damit eventuell verbliebene Mikroorganismen kein weiteres Substrat erhalten beziehungsweise neue Bakterien nicht in das Kanalsystem gelangen und eine sekundäre Infektion hervorrufen können.

3.3 Indikationen und Prognose einer Revision

Eine erneute Wurzelkanalbehandlung kann notwendig sein, wenn die endodontische Erstbehandlung gescheitert ist. NAIR et al. (1990) gaben für das Scheitern einer

primären Wurzelkanalbehandlung die Persistenz von Mikroorganismen im Wurzelkanalsystem als entscheidenden ätiologischen Faktor an. Als weitere Ursachen können extraradikuläre Infektionen, echte Zysten oder Fremdkörperreaktionen aufgrund von extrudiertem Material vorliegen (NAIR 2004). WEIGER et al. (1994) geben als Hauptindikation für eine Revisionsbehandlung eine von Bakterien hervorgerufene oder unterhaltene Erkrankung an. Daher sollte das Ziel sowohl jeder endodontischen Erstbehandlung als auch Revision mit intrakanalärer Infektion eine gründliche Beseitigung von Mikroorganismen und die Vermeidung einer Reinfektion sein (FRIEDMAN 2002). Aus diesem Grund sind eine vollständige Entfernung des bereits vorhandenen Wurzelfüllmaterials und die Wiederherstellung der Gängigkeit des gesamten Wurzelkanalsystems notwendig (FRIEDMAN 2002), um eine vollständige Desinfektion des Endodonts zu gewährleisten. SUNDQVIST et al. (1998) geben als klare Indikation für eine Revision eine apikale Läsion in Zusammenhang mit unvollständig gefüllten Wurzelkanälen an. Außerdem sollte eine Revisionsbehandlung an röntgenologisch fragwürdigen Wurzelkanalfüllungen erfolgen, wenn eine neue koronale Restauration geplant ist. Ein Misserfolg kann anhand von klinischen Symptomen und/oder radiologischen Befunden identifiziert werden. Die Schwierigkeit liegt jedoch darin, dass diese röntgenologischen Befunde nicht in jedem Fall korrekt interpretiert werden können. In der Untersuchung von REIT und HOLLENDER (1983) deckten sich in lediglich 39% der vorgelegten Röntgenaufnahmen die Bewertungen zwischen Endodontisten und Radiologen bezüglich der periradikulären Situation. Somit kann es in Grenzfällen schwierig sein, eine korrekte Entscheidung hinsichtlich der Durchführung einer Revisionsbehandlung zu treffen. In solchen Fällen kann es beispielsweise hilfreich sein, eine zusätzliche exzentrische Röntgenaufnahme anzufertigen oder, wenn möglich, die aktuelle Aufnahme mit einem älteren Röntgenbild zu vergleichen. Klinische Symptome einer Parodontitis apicalis, wie z. B. eine Perkussionsempfindlichkeit des Zahnes, müssen nicht zwangsläufig mit radiologisch sichtbaren Befunden übereinstimmen (LÖST 1994). So können an einem wurzelkanalbehandelten Zahn eine Perkussionsempfindlichkeit, Fistelbildung oder assoziierte Weichteilschwellungen ohne das Vorliegen einer radiologisch erkennbaren apikalen Parodontitis auftreten und somit eine Revision indiziert sein.

Eine konservative Revision ist einem chirurgischen Vorgehen zunächst vorzuziehen (YAN 2006). BERGENHOLTZ et al. (1979) zeigten in ihrer Untersuchung, dass von 556 wurzelkanalbehandelten Zähnen mit unzureichender Wurzelkanalfüllung in 94% der Fälle eine Verbesserung der Situation bezüglich Dichtigkeit und Länge der Obturation erreicht werden konnte. Bei Vorliegen einer periapikalen Läsion kam es allerdings nur in 48% zu einer Ausheilung innerhalb von zwei Jahren. In der Studie von SJÖGREN et al. (1990) lag die Erfolgsquote bei Vorhandensein einer periapikalen Läsion nach durchgeführter Revision bei 62%. In einer Untersuchung von SUNDQVIST et al. (1998) war die Revisionsbehandlung in 74% der Fälle erfolgreich. In der Studie von VAN NIEUWENHUYSEN et al. (1994) kam es durch eine Revisionsbehandlung in 86% der Fälle zu einer deutlichen Verbesserung der Wurzelkanalfüllung. Lagen allerdings klinische Beschwerden vor, so kam es lediglich in 71,8% der Fälle zu einer erfolgreichen Revisionsbehandlung. Dabei hatten die Anwendung von Kofferdam, die Wurzelkanalfülltechnik, die initiale Größe der apikalen Läsion sowie die apikale Ausdehnung der Wurzelfüllung einen entscheidenden Einfluss auf das Revisionsergebnis (VAN NIEUWENHUYSEN et al. 1994).

3.4 Guttapercha als Wurzelkanalfüllungsmaterial

Guttapercha ist das am häufigsten verwendete Wurzelkanalfüllungsmaterial (BETTI und BRAMANTE 2001, BHARATHI et al. 2002, BETTI et al. 2009, DE MELLO et al. 2009). Bereits im Jahre 1867 wurde zum ersten Mal die Anwendung von Guttapercha zum Füllen von Wurzelkanälen von Dr. G. A. Bowman beschrieben (HÜLSMANN 2008, S. 166). Wurzelkanalfüllmaterialien müssen vielen Anforderungen gerecht werden (HÜLSMANN 2008). So müssen sie biokompatibel sein, sie dürfen kein allergenes Potenzial aufweisen bzw. nicht zyto- oder neurotoxisch sein. Weiterhin sollen sie eine gute Adhäsion an das Wurzelkollagen und eine gute Dimensionstreu gewährleisten. Sie sollen nicht resorbierbar, aber auch leicht wieder entfernbar sein und das Bakterienwachstum hemmen. Zurzeit gibt es allerdings kein Wurzelfüllmaterial, das alle geltenden Anforderungen erfüllen kann. Aufgrund der guten Biokompatibilität und einfachen Verarbeitung ist Guttapercha derzeit das Füllmaterial der Wahl. Die handelsüblichen Guttaperchastifte bestehen

herstellerbedingt im Wesentlichen aus 19-45% Guttapercha, 33-61,5% Zinkoxid, 1-4,1% Wachsen oder Kunststoffen als Weichmacher und 1,5-31,2% Schwermetallsulfaten als Röntgenkontrastmittel (HÜLSMANN 2008). Roh-Guttapercha enthält 20-30% Harze und 70-80% Kautschukkohlenwasserstoff und ist ein trans-Isomer des Polyisoprens. Aufgrund ihrer Molekülstruktur ist sie chemisch mit dem Naturkautschuk verwandt, welcher das cis-Isomer des Polyisoprens ist. Dadurch erhält dieser seine typischen elastischen Eigenschaften. Guttapercha ist aufgrund der trans-Stellung spröder, härter und weniger elastisch. Das Material ist zu 60% kristallin, wird aber bei einer Temperatur von 55-60 °C plastisch und amorph, wobei dieser Zustand durch Abkühlung wieder reversibel ist. Guttapercha kann als Alpha- sowie als Betaform vorliegen. Beide Formen unterscheiden sich in der Länge der Monomere und ihren Molekularabständen. Bei einer Temperatur von 42-49 °C geht die Betaform in die Alphaform über, bei 53-59 °C wandelt sich die Alpha- wieder in die Betaform zurück (SCHILDER et al. 1974b). Die für die kalten Fülltechniken verwendeten Guttaperchastifte liegen in der Betaform vor. Durch Änderung der Temperatur können sich die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Guttapercha verändern. So dehnt sich das Material bei Erwärmung leicht aus und bei niedrigen Temperaturen schrumpft es ein wenig (GURNEY et al. 1971). In einer Studie konnte gezeigt werden, dass das Volumen von Guttapercha nach dem Füllen unter Druck und mit Hitze kleiner war als zuvor (MARLIN und SCHILDER 1973). Wie SCHILDER et al. (1974a) feststellen konnten, liegt dieses an der Kompaktion des Materials, bei der Hohlräume und Blasen reduziert werden können und das Füllmaterial verdichtet wird. Diese Eigenschaft ist sehr nützlich für die Obturation eines Wurzelkanals, da die Guttapercha nach dem Kondensieren durch den inneren Druck an die Kanalwand gepresst wird. Allerdings kommt es dabei nicht zur direkten Adhäsion von Material und Kanalwand, so dass auf einen Sealer zum Ausfüllen des Spaltes nicht verzichtet werden kann (WOLLARD et al. 1976). Es gibt verschiedene Guttapercha-basierte Fülltechniken, wobei die laterale Kompaktion die am häufigsten angewandte Technik darstellt (HÜLSMANN 2008). Hierbei wird ein Guttapercha-Hauptstift mit apikaler Friktion auf Arbeitslänge eingebracht. Dieser wird mit sogenannten Spreadern an die Kanalwand gedrückt, so dass ein Hohlraum für einen akzessorischen Guttapercha-Stift entsteht. Dieser Vorgang wird solange wiederholt,

bis der Wurzelkanal homogen gefüllt ist. Alle Guttapercha-Stifte werden vor dem Einbringen in den Wurzelkanal mit Sealer benetzt.

3.4.1 Revisionsmethoden bei Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen

Guttapercha ist das am häufigsten verwendete Wurzelkanalfüllungsmaterial. Aufgrund dieser Tatsache gilt ein besonderes Interesse verschiedenen Revisontechniken von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen. Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Methoden, Guttapercha zu entfernen. So reichen die Möglichkeiten von Handinstrumenten über verschiedene rotierende Systeme bis hin zu Kombinationen beider Systeme. Außerdem können als Hilfsmittel Wärme, Lösungsmittel oder der Einsatz von Ultraschall die Entfernung von Guttapercha unterstützen. Nach FRIEDMAN et al. (1990) spielen die Dichte und Länge der bereits bestehenden Wurzelkanalfüllung als auch die Wurzelkanalkrümmung eine entscheidende Rolle bezüglich der Revisionsmethode. DUNCAN und CHONG (2011) geben ebenfalls an, die Wahl der Methode sei abhängig von der Qualität der Guttapercha-Wurzelkanalfüllung. So spiele es eine große Rolle, ob der Wurzelkanal mit einer Einstifttechnik oder dicht kompaktierter Guttapercha gefüllt ist. Die Einstifttechnik weist Hohlräume zwischen Kanalwand und Wurzelkanalfüllmaterial auf, so dass beispielsweise ein entsprechendes Handinstrument in diesen Hohlraum eindringen kann und mit seinen Schneiden in die Guttapercha hineingreift. Häufig kann auf diese Weise der einzelne Guttapercha-Stift in toto herausgezogen werden. Bei dicht kompaktierter Guttapercha ist diese Vorgehensweise weniger erfolgsversprechend. Hier bestehen kaum oder keine Hohlräume zwischen Kanalwand und Wurzelfüllmaterial, sodass ein Instrument nur schwer in das Füllmaterial eingebracht werden kann (DUNCAN und CHONG 2011). In diesem Fall ist es möglich, die Guttapercha mit Wärme oder Lösungsmittel zu erweichen und somit einen Zugang für ein Instrument zu schaffen. Beim Einsatz von Wärme ist allerdings größte Vorsicht geboten, um dem Patienten keine Verletzungen am Weichgewebe oder am Parodont zuzufügen. Ein großer Nachteil dieser Methode ist außerdem, dass das erwärmte Instrument sehr schnell abkühlt, so dass es immer erneut erhitzt werden muss. Weiterhin ist Guttapercha ein schlechter Wärmeleiter, so dass nur das oberflächliche Material erwärmt und angelöst wird. Es kann sehr hilfreich sein, initial

das koronale Drittel mit Gates-Glidden-Bohrern zu revidieren. Nach HÜLSMANN und STOTZ (1997) ist der Einsatz von Gates-Glidden-Bohrern zeitsparend, nach MACHTOU und FRIEDMAN (1997) sowie MANDEL und FRIEDMAN (1992) schaffen diese Instrumente Raum für ein Lösungsmittel als auch einen besseren Zugang für weiter apikal gelegene Kanalabschnitte. Darüber hinaus erweicht die entstehende Rotationswärme das Füllmaterial und erleichtert die Entfernung.

3.4.2 Revision von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen mit Handinstrumenten

Wie bereits oben beschrieben, lassen sich Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen mit Handinstrumenten aus Edelstahl entfernen. Es stehen Reamer, Hedström-Feilen und K-Feilen in verschiedenen ISO-Größen zur Verfügung. Die Instrumente unterscheiden sich in ihrem Querschnitt, wobei dieser sowohl die Bruchsicherheit als auch die Flexibilität beeinflusst. Mit zunehmender ISO-Größe der Instrumente erhöhen sich ebenfalls die Steifheit und der Biege widerstand (CAMPS und PERTOT 1994). Im Gegensatz zu Reamern und K-Feilen, die aus einem verdrehten Drei- oder Vierkantstahl hergestellt werden, sind Hedström-Feilen gefräst und haben einen runden Querschnitt. Allerdings sind sie dadurch fraktur anfälliger. Sie erbringen von den genannten Handinstrumenten die größte Schneideleistung und arbeiten bei ziehend-rotierenden Bewegungen im Uhrzeigersinn am effektivsten (HÜLSMANN 2008). Bei der Revisionsbehandlung können sie sowohl für die gesamte Länge des Wurzelkanals eingesetzt werden oder lediglich den apikalen Kanalabschnitt bearbeiten (FRIEDMAN 2002). Dabei wird das Instrument in das Füllungs material eingedreht und bei schlecht kompakterter Guttapercha ist es möglich, das gesamte Material in toto herauszuziehen. Bei einer dicht kompaktierten Wurzelkanalfüllung ist es nötig, diese Prozedur mehrfach zu wiederholen und sich somit von koronal nach apikal vorzuarbeiten. Um Stufenbildungen zu vermeiden, sollten die Instrumente leicht vorgebogen und nur mit leichtem Druck eingesetzt werden. Sollte weiteres Vordringen im Kanal nicht möglich sein, kann ein Lösungsmittel verwendet werden (FRIEDMAN 2002).

3.4.3 Revision von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen mit Nickel-Titan-Instrumenten

Für die Präparation von Wurzelkanälen als auch für die Revision von Wurzelkanalfüllungen werden zunehmend rotierende Nickel-Titan-Instrumente (NiTi-Instrumente) verwendet. Die Instrumente bestehen zu 55 Gew.-% aus Nickel und zu 45 Gew.-% aus Titan. Im Vergleich zu Stahlfeilen weisen sie eine dreimal höhere Flexibilität auf, wodurch sie sich besonders für die Formgebung gekrümmter Wurzelkanäle eignen (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001). Aufgrund ihrer hohen Elastizität werden sie hauptsächlich durch maschinelle Fräsung hergestellt, da eine anhaltende Deformation durch Verdrehen schwierig ist. Weitere Kennzeichen dieser Instrumente sind ein niedriger Elastizitätsmodul und das Formgedächtnis (Memory-Effekt), wodurch sich das Instrument nach Verformung ohne sichtbare Deformation in die Ausgangsposition zurückstellt. Die Mehrzahl der Nickel-Titan-Feilen besitzt eine nicht-schneidende Zentrierspitze (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001). Die Instrumente werden abhängig von dem jeweiligen System in den Konizitäten .02, .04, .06 bis zu .12 angeboten. Hierbei werden die höheren Konizitäten für die koronale Präparation des Wurzelkanals und die kleineren Konizitäten für die Präparation des mittleren und apikalen Wurzeldrittels verwendet. Die Querschnitts- bzw. Schneidengeometrie der Feilen ist ebenfalls vom jeweiligen NiTi-System abhängig. FlexMaster- (VDW, München) und ProTaper-Instrumente (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) weisen beispielsweise einen Dreikantquerschnitt mit konvexen Außenflächen auf. Das LightSpeed-System (Max-Dental, Augsburg), GT-Rotary- und ProFile-Instrumente (beide Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) besitzen einen U-förmigen Querschnitt. Bei jedem System muss die vom Hersteller empfohlene Anwendung bezüglich der Umdrehungszahl, des Drehmoments und der Verwendungshäufigkeit beachtet werden. In zahlreichen *In-vitro*-Versuchen wurden unterschiedliche NiTi-Instrumente im Rahmen einer Revisionsbehandlung u. a. hinsichtlich ihrer Reinigungswirkung und Arbeitszeit untersucht und miteinander verglichen (IMURA et al. 2000, BARRIESHI-NUSAIR 2002, HÜLSMANN und BLUHM 2004, SCHIRRMEISTER et al. 2006b und 2006c). Hierbei fand häufig auch ein Vergleich mit Handinstrumenten statt. So verglichen HÜLSMANN und BLUHM (2004) die Sauberkeit der Kanalwände als auch die benötigte Zeit für die Revision mit FlexMaster-, ProTaper-, GT Rotary- und Hedström-Feilen. In der Studie von

SCHIRRMEISTER et al. (2006b) wurden RaCe-, ProTaper-, FlexMaster- und Hedström-Feilen hinsichtlich ihrer Reinigungswirkung, des Zeitaufwandes und hinsichtlich des Auftretens prozeduraler Fehler untersucht. In keiner der genannten Studien konnte das gesamte Wurzelkanalfüllmaterial entfernt werden. Es wurde allerdings ein Zeitersparnis mit den rotierenden Systemen gegenüber der Revision mit Handinstrumenten festgestellt. Prozedurale Fehler im Sinne von Instrumentenfrakturen traten bei den maschinellen Systemen RaCe, FlexMaster und ProTaper auf. In den Studien von IMURA et al. (2000) oder BARRIESHI-NUSAIR (2002) hingegen wurde bei ähnlichen Versuchsbedingungen mit Handinstrumenten weniger Zeit benötigt. Auch hier frakturierten mehr NiTi-Instrumente als Handinstrumente. Alle genannten Versuche wurden an einwurzeligen Zähnen mit geraden Wurzelkanälen durchgeführt. In der Studie von SCHIRRMEISTER et al. (2006c) wurden RaCe-, ProTaper-, FlexMaster-Instrumente und Hedström-Feilen in gekrümmten Wurzelkanälen untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass RaCe-Instrumente signifikant mehr Wurzelfüllmaterial entfernen konnten, allerdings auch signifikant mehr Zeit für die gesamte Revision benötigten, als die anderen Systeme. Aufgrund der widersprüchlichen Versuchsergebnisse kann generell nicht von einer Verkürzung der Arbeitszeit durch Nickel-Titan-Instrumente gesprochen werden. Weiterhin konnte mit keinem der getesteten Instrumente das Wurzelfüllmaterial komplett entfernt werden. Auffällig war bei den Untersuchungen, dass deutlich mehr rotierende Instrumente frakturierten als Handinstrumente.

3.4.4 FlexMaster

Bei dem FlexMaster-System handelt es sich um rotierende Nickel-Titan-Feilen, die sowohl für die Präparation von Wurzelkanälen als auch für Revisionsbehandlungen eingesetzt werden können. FlexMaster-Instrumente besitzen eine nicht-schneidende Batt-Spitze und weisen im Vergleich zu anderen NiTi-Feilen einen dickeren Instrumentenkern auf, um einerseits das Frakturrisiko zu senken und andererseits den Torsionswiderstand zu erhöhen (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001). FlexMaster-Feilen besitzen im Gegensatz zu anderen NiTi-Instrumenten wie z. B. LightSpeed (MaxDental, Augsburg) keine „radial lands“ (Führungsflächen). Sie haben einen aktiven Schneidewinkel, durch den eine erhöhte Schneideleistung der Feilen

und eine Reduzierung der Arbeitszeit resultieren. Im Allgemeinen sollten alle NiTi-Instrumente mit einem chipgesteuerten Motor mit Drehmomentkontrolle, z. B. Endo-IT (VDW, München) angewendet werden. Hierbei ist es wichtig, dass jede Feile des FlexMaster-Systems mit dem vom Hersteller angegebenen Drehmoment eingesetzt wird. Auf diese Weise wird das Drehmoment für die entsprechende Feile nicht überschritten, da der Motor beim Erreichen des kritischen Wertes stoppt und die Feile somit nicht überbelastet wird. Die Umdrehungszahl für die FlexMaster-Instrumente liegt zwischen 150 und 300 Umin⁻¹ und die Anwendung erfolgt nach dem Crown-down-Prinzip. Das bedeutet, dass zunächst der koronale Bereich des Wurzelkanals mit Feilen größerer Konizität präpariert wird. Anschließend wird mit absteigenden Feilengrößen und geringeren Konizitäten der Kanal nach apikal hin erschlossen. Durch diese Arbeitsweise werden das Risiko von Kanalbegradigungen und die Belastung des einzelnen Instruments gesenkt (DIANDRETH et al. 1995). Eine Übersicht zu den Instrumentengrößen und Konizitäten der FlexMaster-Feilen zeigt die Tabelle 3.1.

Instrumentengrößen	Konizität
15, 20, 25, 30, 35, 40	.06
15, 20, 25, 30, 35, 40	.04
15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70	.02

Tab. 3.1 Übersicht zu den Instrumentengrößen und Konizitäten der FlexMaster-Instrumente

Bisher gibt es in der Literatur wenige Revisionsstudien, in denen FlexMaster-Instrumente verwendet wurden. In den Studien von HÜLSMANN und BLUHM (2004) und SCHIRRMEISTER et al. (2006b) wurden unter anderem FlexMaster-Instrumente hinsichtlich ihrer Effizienz und Arbeitszeit an geraden Kanälen untersucht. SCHIRRMEISTER et al. (2006c) verglichen FlexMaster mit anderen Nickel-Titan-Feilen hinsichtlich ihrer Reinigungswirkung, des Zeitaufwands und prozeduraler

Fehler an gekrümmten Kanälen. In allen Studien wurde lateral kompaktierte Guttapercha mit und ohne Einsatz von Lösungsmitteln revidiert.

3.4.5 Einsatz von Lösungsmitteln

Die Effizienz von Lösungsmitteln als Hilfsmittel bei Revisionen von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen wurde bisher umfangreich untersucht (WOURMS et al. 1990, KAPLOWITZ 1990, SCELZA et al. 2008, HORVATH et al. 2009). Nach FRIEDMAN et al. (1990) eignet sich die Anwendung solcher Lösungsmedien vor allem bei dicht kompaktierter Guttapercha oder in gekrümmten Wurzelkanälen. Das Lösungsmittel ist in der Lage, Guttapercha zu erweichen und somit den Einsatz exzessiver Kräfte zu verhindern. Großer Krafteinsatz während der Revision könnte eine ungewünschte Transportation von Wurzelfüllmaterial über den Apex, Stufenbildungen oder Instrumentenfrakturen verursachen (FRIEDMAN et al. 1990). Die Extrusion des Lösungsmittels in die periapikale Region muss unbedingt vermieden werden, da es zu Irritationen der periapikalen Gewebe kommen kann (GILBERT und RICE 1987). Außerdem sollte bei überextendierten oder schlecht verdichteten Wurzelkanalfüllungen auf den Gebrauch dieser Hilfsmittel verzichtet werden (FRIEDMAN 2002), da ansonsten eine Extrusion des Lösungsmittels in die periapikale Region begünstigt wird. Guttapercha lässt sich unter anderem mit folgenden Lösungsmitteln erweichen: Chloroform, Xylene, Orangenöl und Eukalyptol. Chloroform ist dabei das effektivste Lösungsmittel (TAMSE et al. 1986), es darf jedoch aufgrund seiner Zytotoxizität und potenzieller Kanzerogenität nicht mehr verwendet werden (WENNBERG und ØRSTAVIK 1989, ZAKARIASEN et al. 1990). Das Lösungsmittel der Wahl ist Eukalyptol, da es eine gute Biokompatibilität bei ausreichender Effektivität besitzt (FRIEDMAN et al. 1990). Da das Lösungsmittel alleine die Wurzelkanalfüllung nicht entfernt, muss es immer in Kombination mit maschinellen oder manuellen Instrumenten angewendet werden (FRIEDMAN et al. 1990). Es wird in der Literatur kontrovers diskutiert, ob der Einsatz von Lösungsmitteln die Effektivität der Revision erhöht. In der Studie von FERREIRA et al. (2001) wurde gezeigt, dass nach Einsatz von Chloroform weniger Guttapercha in den Kanälen zurückbleibt als ohne Lösungsmittel. SAE-LIM et al. (2000) konnten jedoch keinen Vorteil nach der Verwendung eines Lösungsmittels beobachten. Beide Studien stellten weiterhin

keinen zeitlichen Vorteil beim Einsatz von Chloroform fest. Keine signifikante Zeitreduktion konnte auch in der Untersuchung von HÜLSMANN und BLUHM (2004) beim Einsatz von Eukalyptol festgestellt werden. HORVATH et al. (2009) verglichen die Sauberkeit der Kanalwände nach Einsatz von Chloroform, Eukalyptol und ohne die Anwendung von Lösungsmitteln bei Revisionen. Die meisten Guttapercharesten fanden sich in der Chloroform- und Eukalyptol-Gruppe, wobei hier keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden. Die Gruppe ohne Lösungsmittel wies die saubereren Kanalwände auf. HORVATH et al. (2009) empfehlen daher den Einsatz von Lösungsmitteln nur in besonderen Fällen, in denen die Arbeitslänge auf anderem Weg nicht erreicht werden kann.

3.5 Komplikationen bei Revisionen

Wie bereits erwähnt, stellt die Persistenz von Mikroorganismen die Hauptursache für den Misserfolg einer endodontischen Behandlung dar. Die vollständige Entfernung des alten Wurzelkanalfüllmaterials ist daher die Voraussetzung für eine gründliche Desinfektion des Kanalsystems. Um die Sauberkeit der Kanalwände zu erhöhen, wird eine Erweiterung der Wurzelkanäle im Vergleich zur initialen Präparationsgröße empfohlen (MACHTOU und FRIEDMAN 1997). Hierbei kann es allerdings zu einer übermäßigen Schwächung der Zahnhartsubstanz und somit zu einer Wurzelfraktur kommen. Weiterhin ist es möglich, dass bei der orthograden Revision infektiöses Material über den Apex hinaus gepresst wird und postoperative Schmerzen, die sogenannten Flare-ups, resultieren. Darüber hinaus stellen Instrumentenfrakturen eine Komplikation sowohl bei der Primär- als auch bei der Revisionsbehandlung dar. Im Allgemeinen frakturiert ein Instrument, wenn die Instrumentenspitze in einem engen Kanalabschnitt klemmt und bei der Entfernung absichert (WESSELINK 1992). Um ein Instrumentenfragment wieder zu entfernen, muss ein direkter Zugang zum Fragment präpariert werden. Dann wird zirkulär um den koronalen Teil des Fragments Zahnhartsubstanz abgetragen, um das Instrument lockern und entfernen zu können. Bei diesen Maßnahmen besteht vor allem in gekrümmten Wurzelkanälen das Risiko einer Wurzelperforation.

Weiterhin ist für eine Revision von Bedeutung, dass sich die Bakterienflora bei einer unbehandelten Pulpanekrose von der eines bereits wurzelkanalgefüllten Zahnes mit

einer apikalen Läsion grundlegend unterscheidet (MOLANDER et al. 1998). Während die Bakterienflora bei einem unbehandelten Zahn wesentlich vielfältiger ist, verringert sich das Bakterienspektrum bei bereits wurzelkanalbehandelten Zähnen. HANCOCK et al. (2001) führen diesen Unterschied bei den Mikroorganismen weiter aus. So ist die Flora einer nekrotischen Pulpa polymikrobiell mit vorwiegend gram-positiven und gram-negativen Anaerobiern. Bei wurzelkanalbehandelten Zähnen liegen vorwiegend gram-positive, fakultative und obligate Anaerobier vor. In der Studie von MÖLLER (1966) wurden bei endodontischen Misserfolgen im Durchschnitt 1,6 Spezies pro Wurzelkanal, darunter 51% Anaerobier gefunden. SUNDQVIST et al. (1998) entdeckten im Durchschnitt 1,3 Spezies pro Kanal, darunter fanden sich 42% Anaerobier, wobei *Enterococcus faecalis* dominierte. Dieser Keim besitzt eine erhöhte Resistenz gegenüber bestimmten Medikamenten wie z. B. Kalziumhydroxid und Natriumhypochlorit (NaOCl). Aus diesem Grund sollten die Desinfektionsmaßnahmen bei Revisionsbehandlungen modifiziert werden, um *E. faecalis* weitestgehend zu eliminieren. Chlorhexidin-Digluconat scheint hierbei eine Schlüsselstellung einzunehmen. Sowohl als medikamentöse Einlage in gelartiger Form oder als Spülung in flüssiger Form inhibiert Chlorhexidin-Digluconat das Wachstum von *Enterococcus faecalis* (SIRÉN et al. 2004, VIANNA et al. 2004). Weiterhin werden therapieresistente Infektionen von Pilzen diskutiert (WALTIMO 2006). Hierbei stellt *Candida albicans* eine dominierende Pilzspezies dar. In zahlreichen Untersuchungen (MOLANDER et al. 1998, SUNDQVIST et al. 1998, HANCOCK et al. 2001, PINHEIRO et al. 2003) konnte aus wurzelkanalgefüllten Zähnen mit Parodontitis apicalis in manchen Fällen *C. albicans* isoliert werden. Dieser Keim kann im Rahmen einer endodontischen Behandlung ein Problem darstellen, da eine erhöhte Resistenz von *C. albicans* gegenüber Kalziumhydroxid festgestellt wurde (WALTIMO et al. 1999), so dass Kombinationen aus verschiedenen medikamentösen Einlagen wirksamer erscheinen. Hierbei bedarf es allerdings weiterer Studien, die eine Effektivität antimikrobieller Strategien gegenüber *C. albicans* untersuchen.

3.6 Micro-CT

Die Micro-computed Tomography (Micro-CT) wurde in den frühen 1980er Jahren von FELDKAMP an der Ford Motor Company (Physics Department, Dearborn, Michigan, USA) entwickelt. Das Gerät stellt eine Weiterentwicklung der klinisch relevanten Computed Tomography (CT) dar. Das Micro-CT ermöglicht eine nicht-invasive, hochauflösende dreidimensionale Darstellung kleiner Objekte im Rahmen experimenteller Forschung. Dieses bildgebende Verfahren konnte sich ebenfalls in der Industrie etablieren, wo es zur Überprüfung von Mikrobautteilen eingesetzt wird. In der medizinischen Anwendung können mineralisierte Proben wie Knochen oder Zähne, aber auch Weichgewebe, wie zum Beispiel die Lunge, mit einem Kontrastmittel präpariert, von ihrer räumlichen Umgebung abgegrenzt und somit dargestellt werden (SWAIN und XUE 2009). Das Gerät kann Strukturen mit einer Auflösung in einem Bereich von 5 - 50 μm wiedergeben, während CT-Geräte eine genaue Wiedergabe von maximal 1 mm darstellen können (ENGELKE et al. 1999). Um solche hohen Auflösungen erzeugen zu können, ist das Micro-CT mit einer Fein- oder Mikrofokusröntgenröhre mit Transmissions- oder Reflektionsanoden ausgestattet, mit deren Hilfe eine Verkleinerung der Fokusgröße möglich ist (ENGELKE et al. 1999). Auch bei den Röntgenquellen gibt es unterschiedliche Ausführungen, die sich hinsichtlich ihrer Strahlungsgeometrien unterscheiden. Man unterscheidet die Fächer- oder Kegelstrahlgeometrie bei Fein- und Mikrofokusröntgenröhren und die Parallelstrahlgeometrie bei der Synchrotronstrahlung. Bei der letzteren ist die Größe des Detektors für die Auflösung entscheidend, während in der Fächer- und Kegelstrahlgeometrie die Fokusgröße der bestimmende Parameter ist (ENGELKE et al. 1999). Ein weiterer Unterschied zwischen der Computed Tomography und der Micro-computed Tomography besteht darin, dass beim CT das Objekt im Zentrum der Strahlung liegt und die Geräteeinheit um dieses rotiert. Beim Micro-CT sind Röntgenquelle und Detektor ortsgebunden, während das Objekt rotiert. Es ist jedoch möglich, den Abstand zwischen Röntgenquelle und Objekt oder zwischen Objekt und Detektor zu variieren. Durch Veränderung des Abstandes Objekt-Detektor können Vergrößerungen in der Auflösung erzielt werden. Dieser Möglichkeit sind jedoch durch die Größe der Quelle und des Objektes sowie durch den Detektor Grenzen gesetzt. Außerdem ist die Auflösung durch die Röhrenleistung limitiert, die wiederum von der Fokusgröße abhängig ist. Die Röhrenleistung

kontrolliert die Intensität, d.h. die in einem gegebenen Zeitintervall pro Fläche zur Verfügung stehende Quantenzahl (ENGELKE et al. 1999). Aufgrund der kleinen Fokusgröße des Micro-CTs ist somit eine beliebige Steigerung der Intensität, also der Quantenzahl, nicht möglich. Dies hat zur Folge, dass die Scanzeiten je nach Auflösung in einem Bereich von Minuten bis Stunden liegen und nur kleine Objekte gescannt werden können. Da Objektgröße und Auflösung über einen Faktor von ungefähr 1000 in Beziehung stehen, ist bei einer Auflösung von 10 μm ein Probendurchmesser von 1 cm gut realisierbar. Die Begrenzung auf kleine Proben hängt außerdem mit der Größe der erzeugten Datensätze zusammen. Je nach Auflösung liegen die Datensätze in einem Größenbereich von 270 bis 2150 MB, wodurch eine hohe Kapazität für die Speicherung dieser Datenmenge notwendig ist. Weiterhin stellt die Visualisierung sehr großer Datensätze technisch immer noch ein Problem dar (ENGELKE et al. 1999).

In dieser *In-Vitro*-Studie wurden die Proben mit Hilfe des eXplore Locus SP Micro-CTs (General Electric Medical Systems, London, Ontario, Kanada) gescannt. Das Gerät besteht aus einem Gehäuse, einer Konsole (PC) und einer Kontrollbox (siehe Abb. 3.1). Im Gehäuse befindet sich die Röntgenquelle, die die Röntgenstrahlung erzeugt. Es handelt sich um eine Mikrofokusröntgenröhre mit Kegelstrahlgeometrie, deren Brennfleck eine Größe von 6,5 - 9 μm hat (MARXEN et al. 2004). Die Intensität der Strahlung kann durch Regelung der Stromstärke variiert werden, während das Energiespektrum durch die Einstellung der Spannung verändert werden kann. Sowohl die Spannung als auch die Stromstärke können an der Kontrollbox reguliert werden. Neben der Röntgenquelle befindet sich ein Metallfilter, der ebenfalls das Energiespektrum regulieren und die niedrig energetischen Röntgenstrahlen für eine gleichmäßigere Strahlung absorbieren kann. Außerdem ist eine Blende vorhanden, die eine Kontrolle der Belichtungszeit ermöglicht. Sie reguliert die Zeit, mit welcher der Detektor von der Röntgenquelle bestrahlt wird. Weiterhin befindet sich im Gehäuse ein rotierender Objekthalter, in dem ein Röhrchen mit den Proben platziert werden kann. Letzte Hauptkomponente im Gehäuse ist der Detektor. Er beinhaltet einen Szintillator, bestehend aus Cäsiumiodid, und eine CCD-Kamera, die über Fiberglas miteinander verbunden sind. Beim Auftreffen von Röntgenphotonen verwandelt der Szintillator diese in sichtbares Licht, welches von der Kamera erfasst wird. Bei diesem bildgebenden Verfahren sind Röntgenquelle und Detektor

feststehend, wobei sich die Probe im rotierenden Objekthalter dreht. Während der Rotation entsteht bei einem möglichen Winkelzuwachs von bis zu $0,1^\circ$ jeweils ein Bild mit einer Belichtungszeit von maximal 2 s. Alle Bilder werden zu einem Volumendatensatz auf dem benachbarten Computer, der Konsole, zusammengefügt. Anhand des von FELDKAMP et al. (1984) entwickelten Algorithmus (Kegelstrahlalgorithmus) entsteht im Folgenden die dreidimensionale Rekonstruktion.

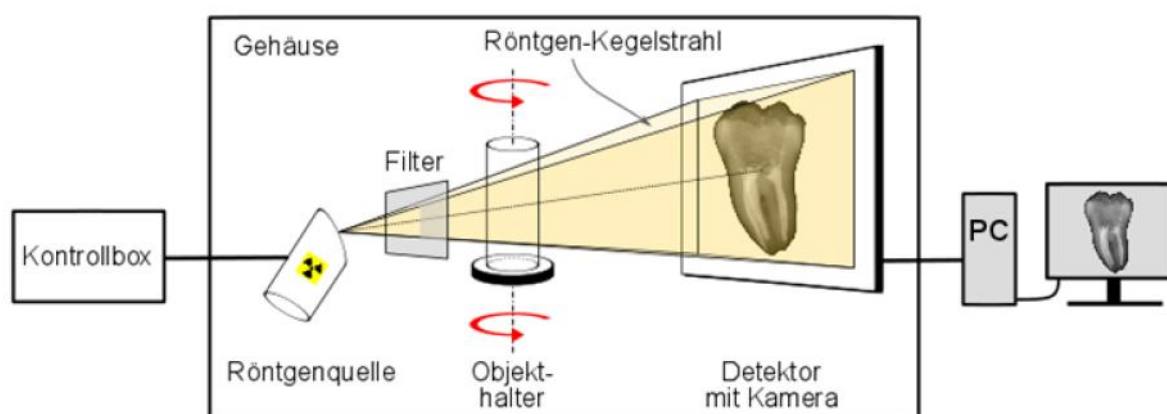


Abb. 3.1 Schematische Darstellung des Micro-CTs

Im zahnmedizinischen Bereich liegen bereits einige Studien vor, die den Einsatz des Micro-CTs mit seinen Möglichkeiten aufzeigen. Das Gerät eignet sich beispielsweise zur Darstellung anatomischer Besonderheiten von Zähnen. PETERS et al. (2000) stellten anhand des Micro-CTs die Kanal Anatomie von Oberkiefermolaren dar. Dabei sollte die Genauigkeit dieses bildgebenden Verfahrens beurteilt werden. Es resultierte, dass die Proben bis auf einen Voxel genau dargestellt werden konnten. In einer Studie von GU Y et al. (2010) wurde die Kanal Anatomie von Unterkiefermolaren bezüglich ihrer Krümmungen untersucht. Weiterhin wurden in einer Studie von GU L et al. (2009) die Isthmen im Bereich der mesialen Wurzel an 36 Unterkiefermolaren erforscht.

Das Micro-CT wird außerdem in Studien verwendet, die sich mit unterschiedlichen Präparationstechniken beschäftigen. PETERS et al. (2001) untersuchten mit Hilfe des Micro-CTs vier verschiedene Präparationstechniken an Oberkiefermolaren. Dabei wurden das Kanalvolumen und die Kanaloberfläche vor und nach der Präparation gemessen. In der Studie von MOORE et al. (2009) wurden die Unter-

schiede zwischen manuell und maschinell präparierten Wurzelkanälen hinsichtlich des Dentinabtrags untersucht. In dem Versuch von PAQUÉ et al. (2010) wurden unterschiedliche Präparationsverfahren an ovalen Wurzelkanälen bewertet. Das Micro-CT wird weiterhin für die Beurteilung von Wurzelkanalfüllungen verwendet. JUNG et al. (2005) konnten zeigen, dass dieses Verfahren eine sehr genaue Bewertung von Wurzelkanalfüllungen ermöglicht. Sie verglichen dabei die Micro-CT-Bilder mit histologischen Schnitten derselben Zahnproben. Es war möglich, die einzelnen Details wie akzessorische Guttapercha-Stifte, Sealer oder auch Hohlräume zwischen den einzelnen Guttapercha-Stiften zu betrachten. Bei Überlagerung beider Abbildungen waren die Dimensionen der einzelnen Strukturen identisch. In der Studie von HAMMAD et al. (2009) wurde die Dichtigkeit von vier unterschiedlichen Wurzelkanalfüllungsmaterialien untersucht. Dabei wurde der prozentuale Anteil von Hohlräumen im Wurzelkanalfüllmaterial gemessen. WISEMAN et al. (2011) verglichen die Effizienz der schallaktivierten Wurzelkanalspülung im Vergleich zur passiven Ultraschallspülung hinsichtlich der Entfernung von Kalziumhydroxid. In der Untersuchung von MADARATI et al. (2009) wurde das Kanalvolumen vor und nach der Entfernung von frakturierten Instrumenten bewertet. IKRAM et al. (2009) quantifizierten den Verlust an Zahnhartsubstanz nach unterschiedlichen zahnmedizinischen Maßnahmen mit Hilfe des Micro-CTs.

3.6.1 Bewertung einer Revision anhand des Micro-CTs

Zur Untersuchung von Revisionsbehandlungen wurde das Micro-CT bislang nur in wenigen Studien eingesetzt. HAMMAD et al. (2008) untersuchten 80 Zähne mit geraden Wurzelkanälen mit Hilfe des Micro-CTs nach einer Revisionsbehandlung. Die Zähne wurden in vier Gruppen aufgeteilt, wobei die Kanäle in jeder Gruppe mit einer unterschiedlichen Fülltechnik obturiert wurden. Nach der Wurzelkanalfüllung wurden die Zähne gescannt und es erfolgte entweder die Revision mit Handinstrumenten (K-Feilen) oder mit ProTaper-Revisionsfeilen. Hierzu wurde jede der vier Hauptgruppen in zwei weitere Untergruppen für die jeweilige Revisionsmethode unterteilt und nach der Revision erneut gescannt. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass das rotierende NiTi-System hinsichtlich der Entfernung des Wurzelkanalfüllungsmaterials effektiver war als das manuelle Verfahren.

In der Studie von ROGGENDORF et al. (2010) wurde die Effizienz einer Revisionsbehandlung an 55 extrahierten Prämolaren mit Hilfe des Micro-CTs untersucht. Nach der Präparation der Zähne wurden diese im Micro-CT mit einer Auflösung von 8 µm gescannt. Im Folgenden wurden sie mit zwei unterschiedlichen Wurzelkanalfüllmaterialien obturiert und anschließend mit NiTi-Instrumenten revidiert. Dabei wurden die Wurzelkanäle um zwei ISO-Größen im Vergleich zur initialen Präparationsgröße erweitert. Nach der Revision wurden alle Zähne erneut gescannt. In beiden Gruppen wurde die Guttapercha vollständig entfernt, es verblieben jedoch Sealerreste an den Kanalwänden.

Weiterhin wurde in der Studie von BARLETTA et al. (2007) mit Hilfe von CT-Scans die Effizienz dreier unterschiedlicher Revisionstechniken untersucht. Mit keinem der drei getesteten Verfahren konnte das Wurzelkanalfüllmaterial vollständig entfernt werden.

4 Material und Methode

4.1 Auswahl und Vorbereitung der Zähne

Für diese Untersuchung wurden 90 extrahierte, bereits wurzelkanalgefüllte Unterkiefermolaren verwendet. Im Rahmen endodontischer Übungen wurden die Wurzelkanäle dieser Zähne von Zahnmedizin-Studenten der Universitätsmedizin Göttingen präpariert und mit lateral kompakterter Guttapercha und Sealer (AH Plus, Dentsply DeTrey, Konstanz) gefüllt. Es wurden folgende Einschlusskriterien festgelegt:

- intakte Zahnkrone
- abgeschlossenes Wurzelwachstum
- Unterkiefermolaren mit jeweils einer mesialen und distalen Wurzel
- gekrümmte mesiale Wurzel mit zwei separaten Wurzelkanälen.

Nach dieser Vorauswahl wurden die Zähne unter Wasserkühlung mit einem hochtourigen Winkelstück (Sirona, Bensheim) zwischen mesialer und distaler Wurzel mittels eines Diamanten (Komet, Lemgo) durchtrennt und eine Zugangskavität angelegt. Die Zähne wurden mit einem wasserfesten Stift nummeriert, um Verwechslungen auszuschließen. Die mesiale Wurzel wurde durch Abtrennen der Zahnkrone auf eine einheitliche Länge von 15 mm gekürzt. Im Anschluss wurde die mesiale Wurzel in zwei Ebenen (bukko-lingual und mesio-distal) digital geröntgt (Trophy Elitys, Croissy-Beaubourg, Frankreich), wobei folgende Parameter gewählt wurden: Röhrenstrom 4 mA, Röhrenspannung 70 kV, Belichtungszeit 0,05 sec. Die Röntgenbilder wurden mittels der Merlin Software (Version 2.1, medical digital concepts, Duisburg) betrachtet. Anhand der Röntgenaufnahmen wurden die Zähne unter Berücksichtigung folgender Ein- und Ausschlusskriterien nochmals bewertet:

- Krümmungswinkel von 20° - 45° in mindestens einer Ebene
(SCHNEIDER 1971: 25° - 70° severe curvature)
- Krümmungsradius von 1,8 mm - 28,2 mm
(SCHÄFER et al. 2002: Krümmungsradius Medianwerte 6,7 mm - 10,7 mm)
- homogene Wurzelkanalfüllung 0 - 2 mm vor dem röntgenologischen Apex
- keine sichtbare Veränderung der Kanal Anatomie während der Primärbehandlung
- keine S-förmigen Wurzelkanalkrümmungen (Doppelkrümmungen).

Abschließend erfüllten 28 Zähne diese Kriterien und konnten für die weitere Untersuchung verwendet werden.

Die Bestimmung des Krümmungswinkels erfolgte nach SCHNEIDER (1971) und die Bestimmung des Krümmungsradius nach SCHÄFER et al. (2002) mit dem Computerprogramm ImageJ (National Institutes of Health, Washington, DC, USA). In jedem Röntgenbild wurden sowohl in bucco-lingualer (bl) als auch in mesio-distaler Projektion (md) drei Punkte (A, B, C) jeweils an der Außenkurvatur des Wurzelkanals festgelegt. Punkt A markiert den koronalen Beginn der Wurzelkanalfüllung (Wurzelkanaleingang), Punkt B stellt den Beginn der Krümmung dar und Punkt C symbolisiert den apikalen Endpunkt der Wurzelkanalfüllung (Abb. 4.1a) und b)). Dabei befindet sich zwischen Punkt A und B der gerade Kanalanteil und zwischen Punkt B und C der gekrümmte Kanalabschnitt.

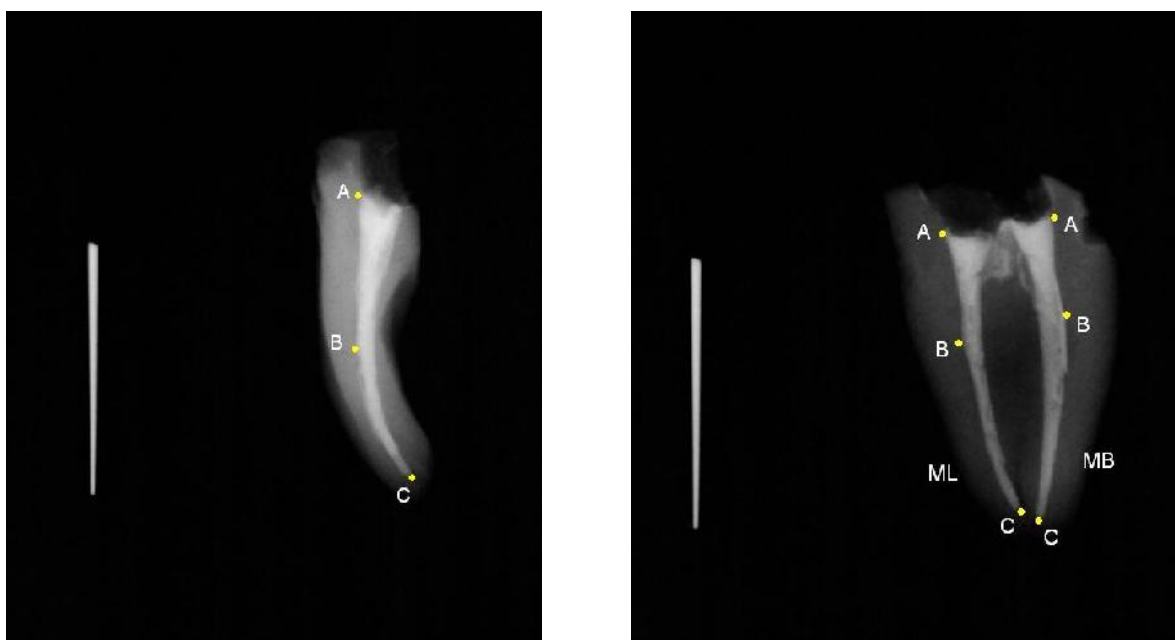


Abb. 4.1a) und b) Festlegung der drei Referenzpunkte A, B und C in bucco-lingualer (a) und mesio-distaler Projektion (b)

Die Röntgenaufnahmen in mesio-distaler Projektion wurden in standardisierter Weise angefertigt, so dass sich auf der linken Seite stets der mesio-linguale Wurzelkanal (ml) und auf der rechten Seite der mesio-bukkale Kanal (mb) befand.

Es wurde eine Vektoranalysis angewendet, genauer gesagt das Skalarprodukt zweier Vektoren \vec{a} und \vec{b} , das mit Hilfe des Winkels zwischen den beiden Vektoren definiert werden kann. In allgemeiner Form lautet das Skalarprodukt:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(x)$$

beschreibt den Winkel, der von beiden Vektoren eingeschlossen wird. Dieser Sachverhalt lässt sich nutzen, um den Krümmungswinkel zu berechnen. Man definiert

$$x = \angle(\vec{BA}, \vec{BC})$$

Daraus folgt nun für

$$r = 180^\circ - x (^{\circ})$$

$$r = 180^\circ - \frac{180^\circ}{f} \cdot x (^{rad})$$

$$r = 180^\circ - \frac{180^\circ}{f} \cdot \arccos \left(\frac{\vec{BA} \cdot \vec{BC}}{|\vec{BA}| \cdot |\vec{BC}|} \right)$$

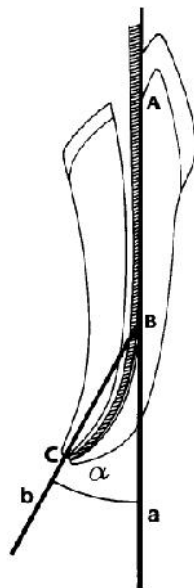


Abb. 4.2 Methode zur Bestimmung des Krümmungswinkels nach SCHNEIDER (1971) (Abbildung aus SCHÄFER et al. 2002, S. 212)

Die Bestimmung des Krümmungsradius erfolgte nach der Vorgehensweise von SCHÄFER et al. (2002)(Abb. 4.3). Die Linie (S) zwischen den Punkten B und C ist eine Kreissehne des hypothetischen Kreises, der die Krümmung des Wurzelkanals bestimmt. Man kann erkennen, dass die Gerade a eine Tangente an dem hypothetischen Kreis im Punkt B ist. Mit Hilfe der Geometrie eines gleichschenkeligen Dreiecks und den Winkelsätzen für ein rechtwinkliges Dreieck lässt sich folgende Gleichung für den Kreisradius und damit für den Krümmungsradius des Wurzelkanals aufstellen. Nach Abbildung 4.3 gilt:

$$r = \frac{S}{2 \cdot \sin(\alpha)} = \frac{\left| \vec{BC} \right|}{2 \cdot \sin(\alpha)}$$

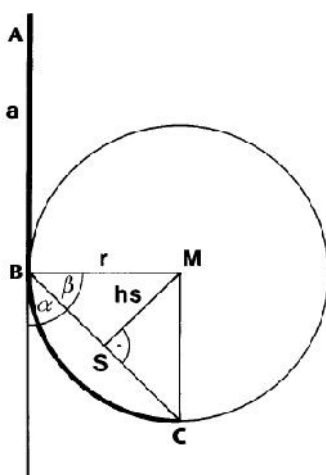


Abb. 4.3 Methode zur Bestimmung des Krümmungsradius (Abbildung aus SCHÄFER et al. 2002, S. 213)

Um den Krümmungswinkel und -radius zu bestimmen, musste ein Abbildungsmaßstab festgelegt werden. Dieser wurde in jeder Röntgenaufnahme anhand eines Silberstiftes mit der elektronisch abgemessenen Länge von 10,6 mm gesichert ((Abb. 4.4a) und b)), links im Bild).

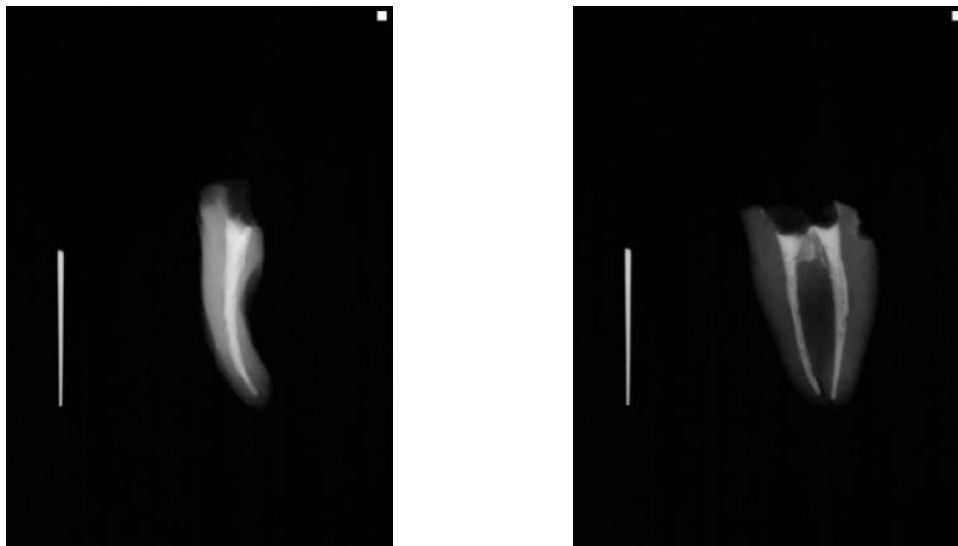


Abb. 4.4a) und b) Röntgenbilder mit Silberstift

Die Auswertung der Röntgenaufnahmen erfolgte unabhängig voneinander durch zwei kalibrierte Zahnärzte, so dass für jeden Zahn zwei Werte für Winkel und Radius vorlagen, die jeweils zu einem Mittelwert zusammengefasst wurden.

Im Anschluss wurden alle ausgewählten Zähne in einem Micro-Tomographen (eXplore Locus SP, General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada) gescannt. Anhand der Micro-CT-Aufnahmen wurden die Volumina für das Wurzelkanalfüllmaterial und das Dentin erneut von zwei kalibrierten Zahnärzten unabhängig voneinander bestimmt. Alle Werte für Winkel, Radien und Volumina wurden in einer Excel-Tabelle (siehe Anhang) aufgeführt. Anhand der Mittelwerte für Krümmungswinkel, Krümmungsradius und für das Volumen des Wurzelkanalfüllmaterials (Vol. WKF) erfolgte die Einteilung in zwei homogene Gruppen mit jeweils 14 Zähnen. Die Gruppen unterschieden sich bezüglich dieser Werte statistisch nicht signifikant voneinander (Tab. 4.1).

	Winkel±SD (bl)	Radius±SD (bl)	Winkel±SD (md-mb)	Radius±SD (md-mb)	Winkel±SD (md-ml)	Radius±SD (md-ml)	Vol.WKF±SD
Gr. 1 (FM)	23,9 ± 6,7	8,1 ± 2,2	19,5 ± 6,3	9,6 ± 4,5	16,1 ± 6,2	12,3 ± 6,5	14,00 ± 4,3
Gr. 2 (HF)	22,7 ± 4,3	8,0 ± 2,6	20,2 ± 8,6	9,5 ± 3,6	16,9 ± 7,8	11,7 ± 5,2	14,35 ± 3,5
	p = 0,9268	p = 0,9634	p = 0,9268	p = 0,9634	p = 0,9634	p = 0,8542	p = 0,9268

Tab. 4.1 Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen sowie statistische Auswertung der Gruppeneinteilung

SD = Standardabweichung, bl = bucco-linguale Projektion, md = mesio-distale Projektion, mb = mesio-bukkaler Kanal, ml = mesio-lingualer Kanal, Vol. WKF = Volumen Wurzelkanalfüllung, FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

Nach erfolgter Revision wurden die Zähne erneut im Micro-CT gescannt.

4.2 Micro-CT

In dieser *In-Vitro*-Studie wurden die Proben mit Hilfe des eXplore Locus SP Micro-CTs (General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada) gescannt (Abb. 4.5).



Abb. 4.5 eXplore Locus SP Micro-Computertomograph der Firma GE Medical Systems

Dieses System kann Objekte mit einem maximalen Durchmesser von 5 cm scannen, wobei eine Auflösung von bis zu 8 μm möglich ist. Der Scanvorgang wurde mit Hilfe der GE Healthcare Software (General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada) eingestellt. Nach dem Scan wurden die erzeugten zweidimensionalen Bilder zu einer dreidimensionalen Abbildung rekonstruiert. Anschließend fand die Begutachtung der gescannten Proben mit Hilfe der Ansichtsoftware MicroView (GE Healthcare) statt. In jedem Durchlauf wurden vier Zähne gleichzeitig gescannt, die in einem gekammerten Röhrchen platziert und mit Schaumstoff fixiert wurden, um eine Verwackelung während der Rotationsbewegung auszuschließen. Eine sichere Zuordnung der Proben wurde durch Markierungen im Röhrchen und eine Nummerierung der Zähne gewährleistet. Vor dem Scan wurde die Position der Objekte durch eine kurze Röntgenübersichtsaufnahme überprüft. Gegebenenfalls musste eine Korrektur des Objektträgers durch eine Mittenverschiebung erfolgen, um das Objekt vollständig zu erfassen. Der Scanvorgang wurde mit festgelegten Parametern durchgeführt, wobei die Zähne mit einer Röhrenspannung von 90 kV und

einem Röhrenstrom von 80 μA gescannt wurden. Die Scanzeit betrug im Durchschnitt 75 min pro Durchlauf. Das Objekt wurde dabei um 360° gedreht, um insgesamt 900 Bilder aufzunehmen. Das entspricht einem Winkelzuwachs/ Rotationszuwachs von $0,4^\circ$ pro Bild. Für jedes Bild resultiert eine Belichtungszeit von 1,6 s. Die effektive Pixelgröße betrug 29 μm .

Bei jedem Scandurchlauf wurde zunächst ein Grobdatensatz (MiniVolume) mit deutlich geringerer Auflösung generiert. In diesem Datensatz wurden nacheinander vier „Regions Of Interest“ (ROI) markiert, wobei jede ROI einer Zahnwurzel entsprach. Die ROIs enthielten bestimmte Koordinaten, die in die Hochauflösungs-Software „reconstruction utility“ (GE Healthcare) überführt wurden. Diese Koordinaten gaben an, welche Bereiche mit hoher Auflösung rekonstruiert werden sollten. Somit war es möglich, aus dem Grobdatensatz für jeden Zahn eine Rekonstruktion mit der gewünschten hohen Auflösung von 29 μm zu berechnen.

Nach der Rekonstruktion aller Probenzähne erfolgte die Analyse der Datensätze. Für jeden einzelnen rekonstruierten Zahn entstand eine Datei, die mit Hilfe der Ansichtsoftware MicroView (GE Healthcare) betrachtet und analysiert wurde. Nach Anlegen einer ROI, die den Zahn inklusive Wurzelfüllmaterial und der umgebenden Luft umfasste, wurde ein Grauwerthistogramm der Röntgenschwächungswerte erstellt (Abb. 4.6).

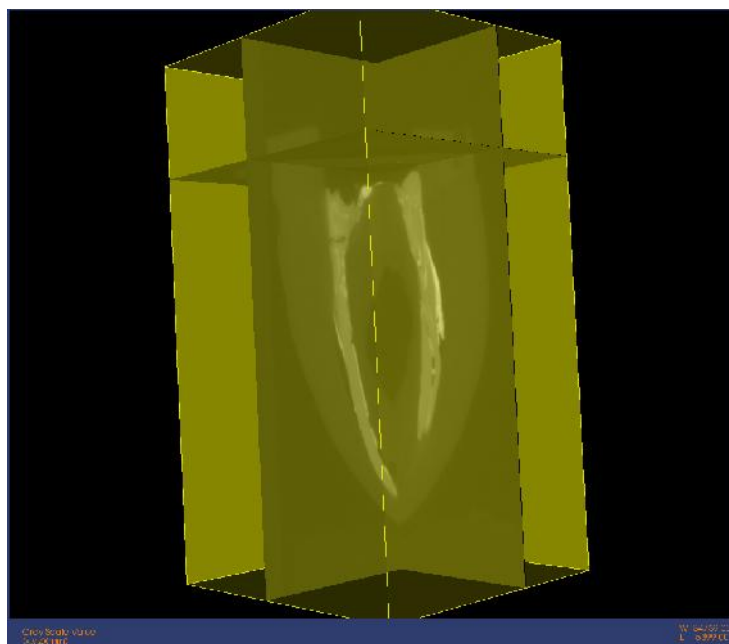


Abb. 4.6 Anlegen einer „Region Of Interest“ (ROI) mit Hilfe der Ansichtsoftware MicroView (GE Healthcare)

Dieses Grauwert histogramm enthielt eine Kurve, wobei jeder Peak einem bestimmten Medium, wie z. B. Zahnhartsubstanz oder Wurzelkanalfüllmaterial, entsprach (Abb. 4.7).

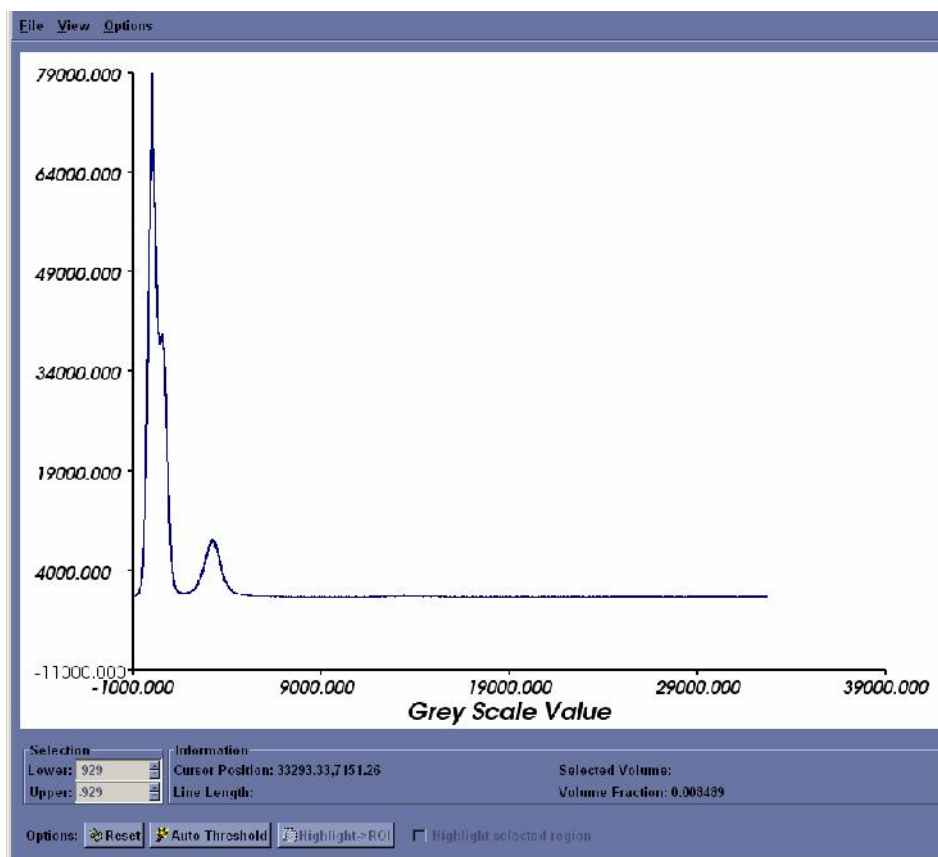


Abb. 4.7 Grauwert histogramm mit mehreren Peaks entsprechend den unterschiedlichen Medien Zahnhartsubstanz, Wurzelkanalfüllmaterial und Luft

Aufgrund verschiedener Grauwerte bzw. Abschwächungskoeffizienten entsprachen die unterschiedlichen Peaks dabei den jeweiligen Medien, d. h. Luft, Zahnhartsubstanz und Wurzelkanalfüllmaterial. Durch Markierung der Kurvenanteile in ihren Umkehrpunkten konnte das entsprechende Medium angefärbt und somit separat dargestellt werden (Abb. 4.8). Dabei entsprach die Kurve mit dem höchsten Peak der Luft, der Peak rechts davon entsprach der Zahnhartsubstanz und die horizontale Linie dem Wurzelkanalfüllmaterial.

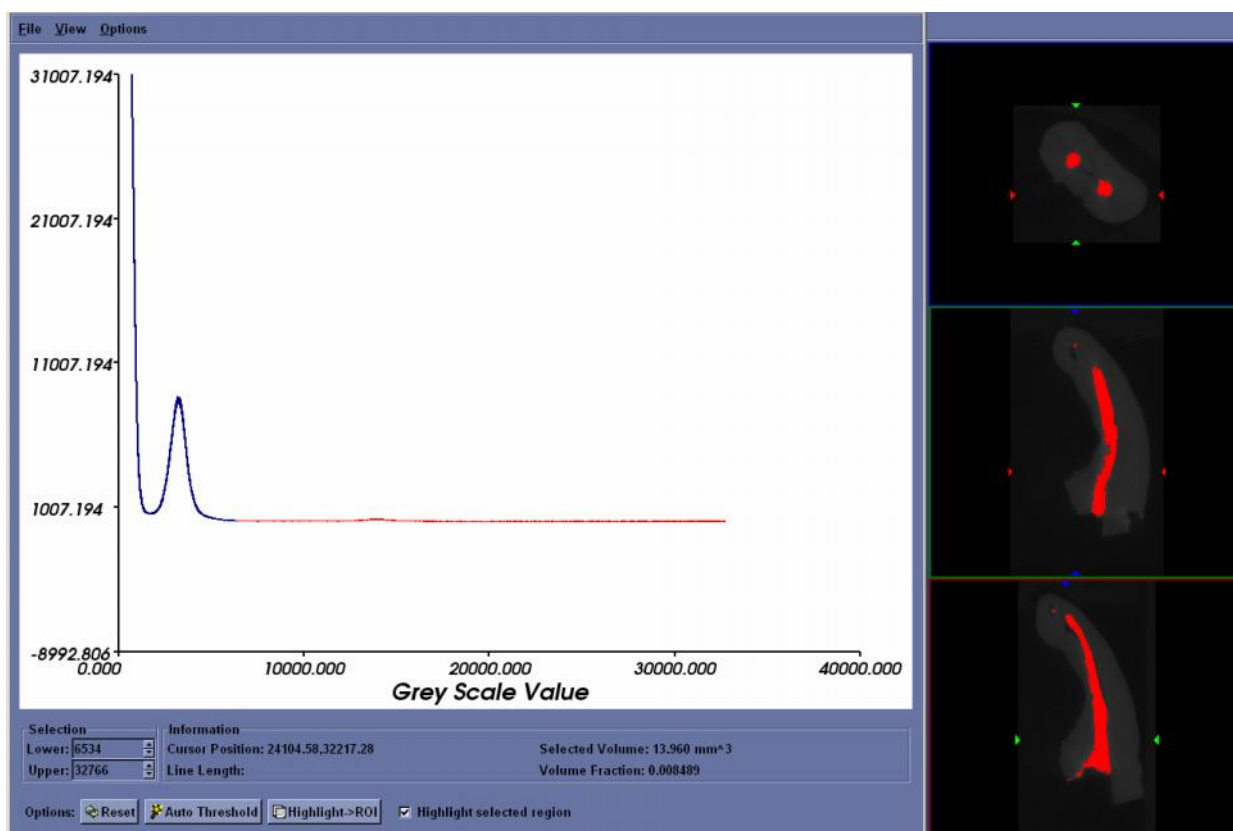


Abb. 4.8 Darstellung des Wurzelkanalfüllmaterials durch Markierung des entsprechenden Kurvenanteils

Diese Auswahl ermöglichte die Volumenbestimmung des jeweiligen, markierten Mediums, wobei in dieser Studie die Volumenbestimmung des Wurzelfüllmaterials und der Zahnhartsubstanz durchgeführt wurde. Das Luftvolumen wurde nicht berücksichtigt. Die Ermittlung der Umkehrpunkte und der jeweiligen Volumina erfolgte ebenfalls unabhängig durch zwei kalibrierte Zahnärzte. Somit ergaben sich für das Volumen der Zahnhartsubstanz und des Wurzelkanalfüllmaterials jeweils zwei Werte, die in die bereits bestehende Excel-Tabelle eingetragen und zu jeweils einem Mittelwert zusammengefasst wurden.

4.3 Revision

Nach Einteilung der 28 Zähne auf zwei Gruppen ($n = 14$) wurden die Wurzelkanalfüllungen der ersten Gruppe mit dem NiTi-System FlexMaster (VDW, München) und die der zweiten Gruppe manuell mit Hedström-Feilen (VDW) revidiert.

Dabei wurden die Arbeitslänge, Reihenfolge der Instrumente, Spülungen und Zeitmessungen protokolliert.

Anhand der digitalen Röntgenbilder wurde zunächst die Arbeitslänge geschätzt und im Protokoll notiert. Die Revision der koronalen 6 mm der Wurzelkanalfüllungen erfolgte initial mit Gates-Glidden-Bohrern der Größe 3 und 2 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) bei 2000 Umin^{-1} . Anschließend wurde eine Handspülung mit 2 ml 1%iger NaOCl-Lösung (Hedinger, Stuttgart) (Handspülung mit EndoNeedle, Vedefar N. V, Dilbeek, Belgien) durchgeführt, wobei der Außendurchmesser der Spülkanüle 0,35 mm betrug.

Für die Revision mit FlexMaster-NiTi-Instrumenten standen folgende Größen zur Verfügung:

Größe 20 bis 30 mit der Konizität .06, Größe 20 bis 30 mit der Konizität .04 und Größe 20 bis 40 mit der Konizität .02 (Tab. 4.2). Die Instrumente wurden in einem speziellen Motor mit konstanter Drehzahl (300 Umin^{-1}) und individueller Drehmomentbegrenzung für jedes Instrument in einer Crown-down-Sequenz angewendet (Endo IT professional, Woodinville, WA, USA). Die Revisionen wurden mit der Instrumentengröße 30/.06 begonnen und entsprechend den Herstellerangaben mit den Größen 25/.06 bis 20/.02 bis zum Erreichen der geschätzten Arbeitslänge fortgeführt. Wenn ein weiteres Vordringen im Kanal nicht mehr möglich war, wurde zum nächst kleineren Instrument gewechselt. Beim Erreichen der geschätzten Arbeitslänge wurde eine Röntgenmessaufnahme mit einem in den Wurzelkanal eingebrachten Handinstrument der ISO-Größe 20 angefertigt. Beim Erreichen der korrekten Arbeitslänge, die als apikaler Endpunkt der Wurzelkanalfüllung definiert war, wurde die Zeit T1 notiert. War diese korrekte Arbeitslänge noch nicht erreicht, so wurde die Revision bis zum Erreichen der Arbeitslänge fortgeführt und die zusätzliche Zeit zu T1 addiert. Anschließend erfolgte die Entfernung des weiteren Füllungsmaterials mit den Instrumenten der Größe 25/.02 bis 35/.02 oder 40/.02. Die Revision wurde dann beendet, wenn weder Guttapercha noch Sealer am Instrument oder in der Spülflüssigkeit erkennbar waren. Im Anschluss erfolgte eine erneute Messung der Zeit (T2).

Die manuelle Revision erfolgte mit vorgebogenen Hedström-Feilen der ISO-Größen 15-40 (Tab. 4.2). Nach initialem Einsatz von Gates-Glidden-Bohrern der Größen 3 und 2 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) wurden Hedström-Feilen der ISO-

Größe 35 und weitere Feilen mit absteigender Größe mit ziehenden Viertelbewegungen verwendet. Dabei wurde das Instrument gewechselt, wenn kein weiteres Vordringen im Kanal mehr möglich war. Beim Erreichen der vorher abgeschätzten Arbeitslänge wurde die Zeit T1 gemessen und erneut eine Röntgenmessaufnahme angefertigt. Die Revision erfolgte mit Instrumenten in aufsteigender Größe bis zur ISO-Größe 35 oder 40, bis weder Guttapercha noch Sealer am Instrument und in der Spülflüssigkeit sichtbar waren.

Sowohl in der Gruppe mit den FlexMaster-Instrumenten als auch in der Gruppe mit den Hedström-Feilen erfolgte nach jedem Instrumentenwechsel eine Spülung mit 2 ml 1%igem NaOCl und am Ende der Revision eine Abschlusspülung mit 5 ml 20%igem EDTA (Lege artis Pharma GmbH + Co KG, Dettenhausen) und 5 ml 1%igem NaOCl. Abschließend wurden die Kanäle mit Papierspitzen (Alfred Becht GmbH, Offenburg) getrocknet. In beiden Gruppen wurden die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) und die Zeit bis zum vollständigen Entfernen des Wurzelkanalfüllmaterials (T2) gemessen. Anschließend wurden die Zeiten T1 und T2 zur Gesamtarbeitszeit (T-gesamt) addiert.

Die Instrumente beider Gruppen wurden jeweils nach der 4. Anwendung aussortiert, um mögliche Ermüdungserscheinungen auszuschließen.

Bei allen Zähnen wurde als Lösungsmittel 0,5 ml Eukalyptol (Klinikumsapotheke Göttingen) mit einer Spritze appliziert, falls keine weitere Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials möglich war.

Im Anschluss erfolgten der postoperative Micro-CT-Scan sowie die Analyse der postoperativen Rekonstruktionen nach dem gleichen Verfahren wie oben bereits beschrieben.

Anhand der Rekonstruktionen wurde das Volumen des Wurzelkanalfüllmaterials vor der Revision in mm^3 bestimmt. Nach der Revision erfolgte die Angabe des verbliebenen Materials in Prozent des ursprünglichen Materialvolumens. Das Volumen der Zahnhartsubstanz wurde sowohl vor als auch nach der Revision in mm^3 bestimmt.

<u>FlexMaster</u>	<u>Hedström-Feilen</u>
30/06	35/02
25/06	30/02
20/06	25/02
30/04	20/02
25/04	15/02
20/04	20/02
20/02	25/02
25/02	30/02
30/02	35/02
35/02	40/02
40/02	

Tab. 4.2 Übersicht der Konizitäten und Größen der in beiden Gruppen verwendeten Instrumente

Im Anschluss an die Revision erfolgte die statistische Auswertung der Ergebnisse von T1, T2, T-gesamt, dem Volumen von Wurzelkanalfüllmaterial und Zahnhartsubstanz mit Hilfe des T-Tests mit einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$.

5. Ergebnisse

5.1 Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)

In den nachfolgenden Abbildungen 5.1 bis 5.4 ist die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) dargestellt. Den Abbildungen 5.1 und 5.2 ist die Zeit T1 für die Revision des mesio-lingualen Wurzelkanals zu entnehmen. Der durchschnittliche Zeitaufwand für das Erreichen der Arbeitslänge im mesio-lingualen Wurzelkanal war mit dem FlexMaster-System mit 140,9 s signifikant geringer ($p = 0,0003$, siehe Tabelle 5.1) als mit den Handinstrumenten mit 257,9 s (siehe Abbildung 5.2).

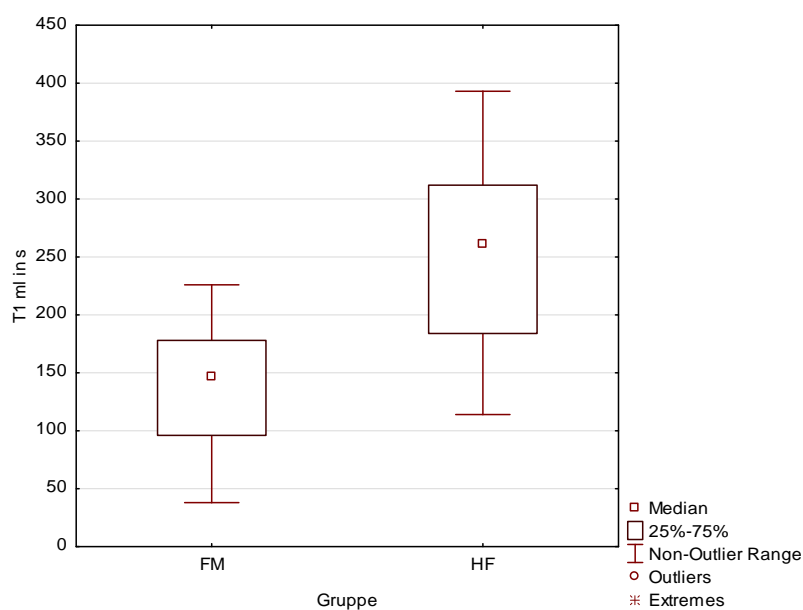


Abb. 5.1 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

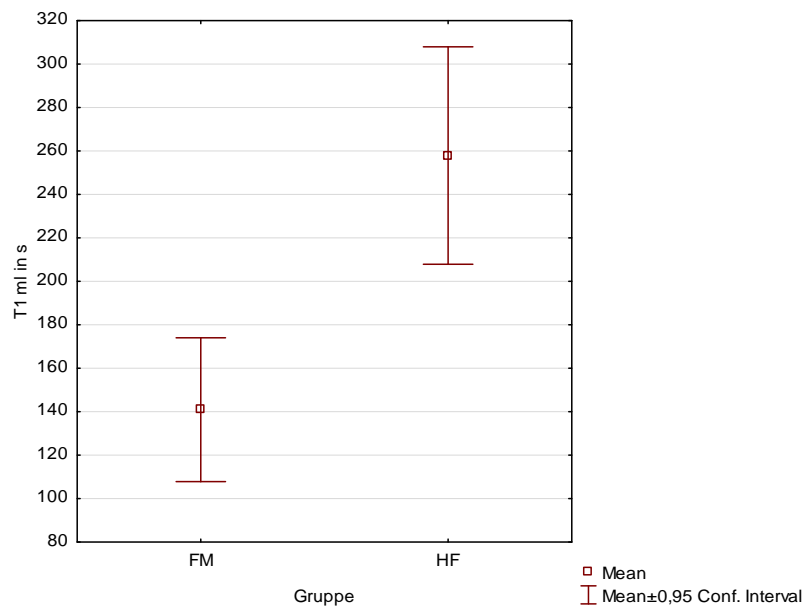


Abb. 5.2 Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

Den Abbildungen 5.3 und 5.4 ist die Zeit T1 für den mesio-bukkalen Wurzelkanal zu entnehmen. Hier war der durchschnittliche Zeitaufwand beim Einsatz des maschinellen Systems mit 126,3 s signifikant geringer ($p = 0,0011$, siehe Tabelle 5.1) als mit den Hedström-Feilen mit 259,1 s.

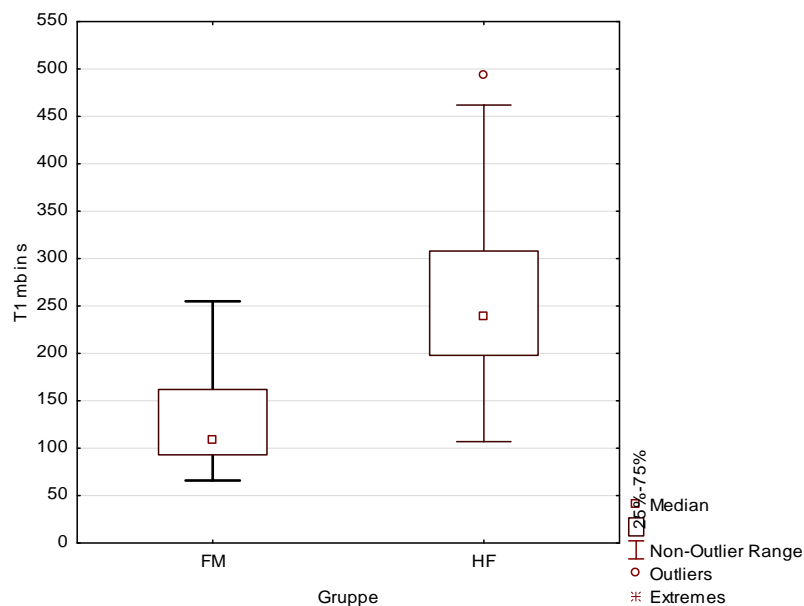


Abb. 5.3 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

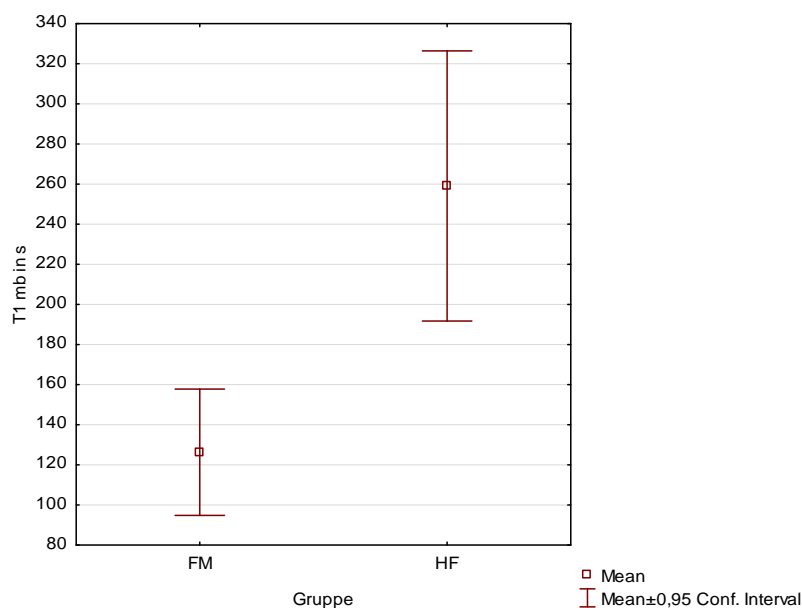


Abb. 5.4 Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T1 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

Gruppe	T1 ml \pm SD	T1 mb \pm SD
FlexMaster	140,9 \pm 57,3	126,3 \pm 54,5
Hedström-Feilen	257,9 \pm 86,7	259,1 \pm 116,6
	$p = 0,0003$	$p = 0,0011$

Tab. 5.1 Übersicht der erhobenen Daten zur Arbeitszeit T1 in (s);

SD = Standardabweichung

5.2 Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2)

In den Abbildungen 5.5 und 5.6 ist die Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2) im mesio-lingualen Wurzelkanal dargestellt. Der durchschnittliche Zeitaufwand mit den FlexMaster-Feilen war mit 95,3 s nicht signifikant geringer ($p = 0,4032$, siehe Tabelle 5,2) als mit den Handinstrumenten mit 109,6 s (siehe Abbildung 5.6).

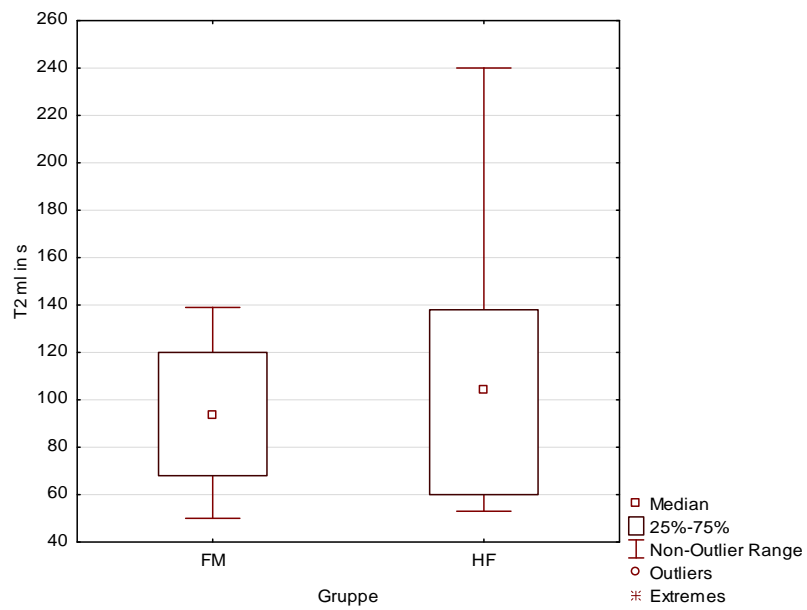


Abb. 5.5 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

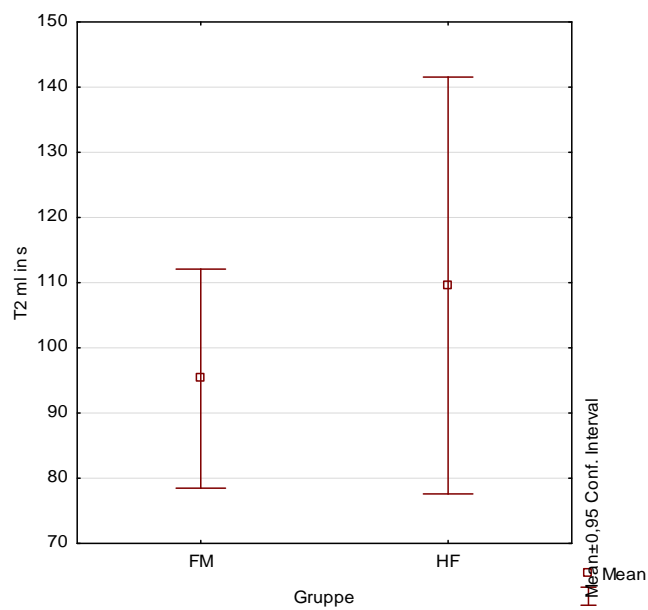


Abb. 5.6 Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

Die Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen die Arbeitszeit T2 im mesio-bukkalen Wurzelkanal. Das maschinelle System benötigte im Durchschnitt 104,6 s und war nicht signifikant langsamer ($p = 0,5828$, siehe Tabelle 5.2) als die Handinstrumente mit 96,6 s (siehe Abbildung 5.8).

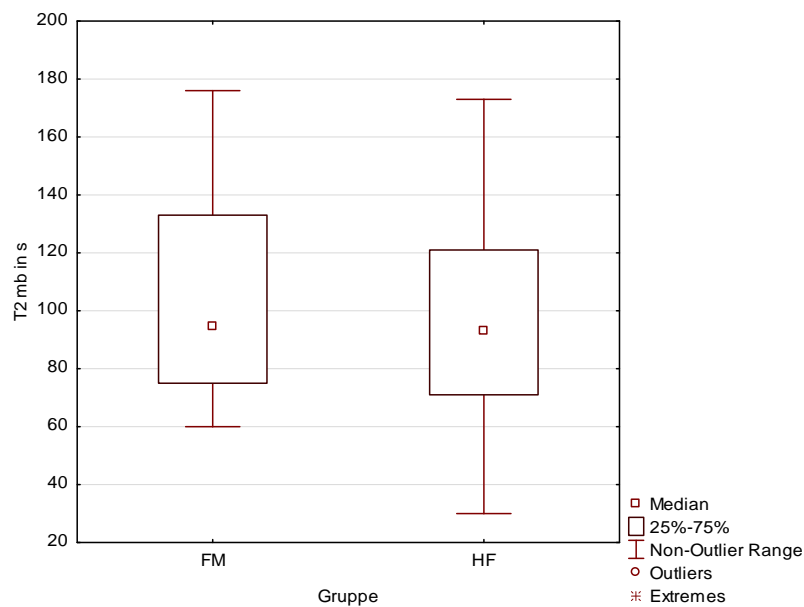


Abb. 5.7 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

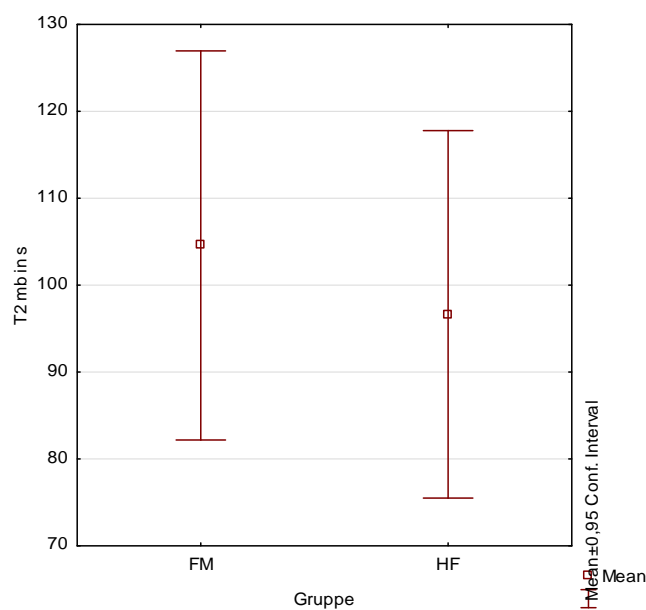


Abb. 5.8 Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T2 in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

Gruppe	T2 ml \pm SD	T2 mb \pm SD
FlexMaster	95,3 \pm 29,1	104,6 \pm 38,7
Hedström-Feilen	109,6 \pm 55,4	96,6 \pm 36,6
	$p = 0,4032$	$p = 0,5828$

Tab. 5.2 Übersicht der erhobenen Daten zur Arbeitszeit T2 in (s);
SD = Standardabweichung

In folgenden Abbildungen sind die Arbeitszeiten T1 und T2 zu T-gesamt zusammengefasst. Die Arbeitszeit T-gesamt betrug im mesio-lingualen Wurzelkanal 236,2 s mit dem maschinellen System und war statistisch signifikant kürzer ($p = 0,0008$, siehe Tabelle 5.3) als mit den Handinstrumenten mit 360,4 s (siehe Abbildung 5.10).

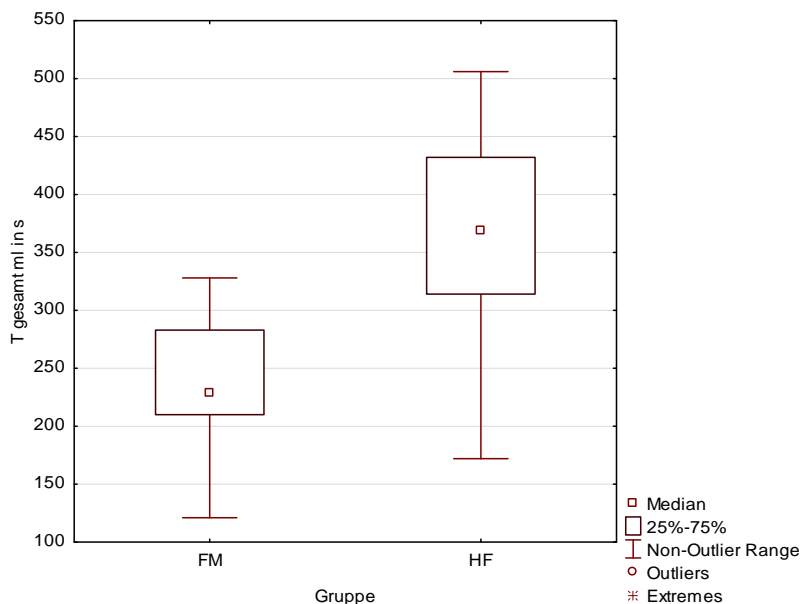


Abb. 5.9 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

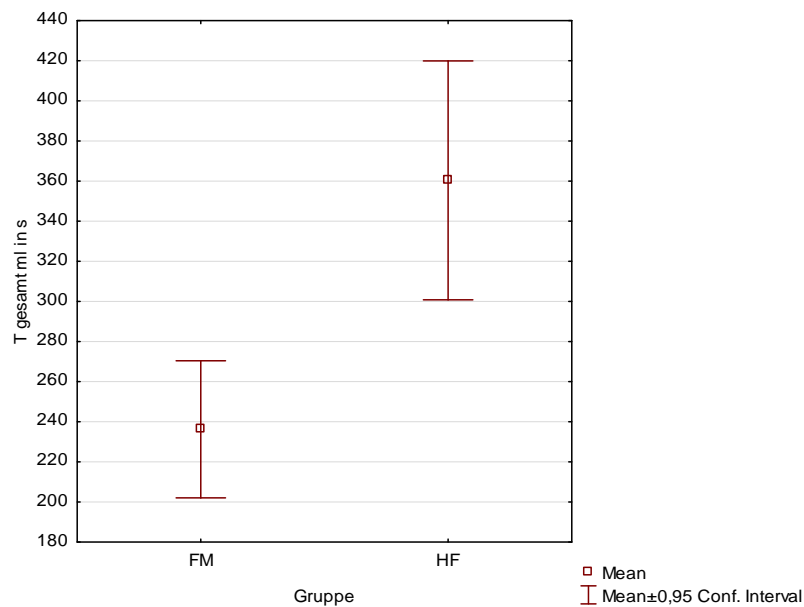


Abb. 5.10 Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-lingualen (ml) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

In den Abbildungen 5.11 und 5.12 ist die Arbeitszeit T-gesamt im mesio-bukkalen Wurzelkanal dargestellt. Das maschinelle System benötigte im Durchschnitt 230,9 s und war damit signifikant schneller ($p = 0,0015$, siehe Tabelle 5.3) als die Hedström-Feilen mit 355,7 s.

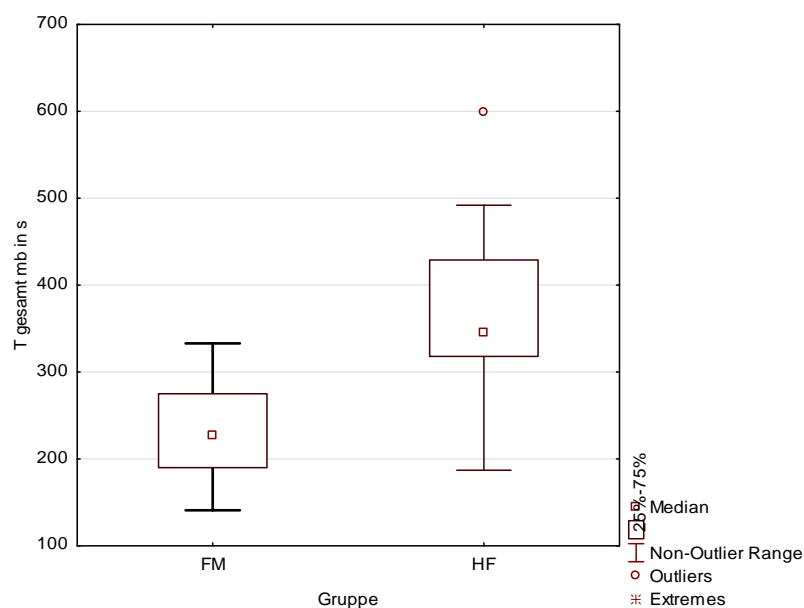


Abb. 5.11 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

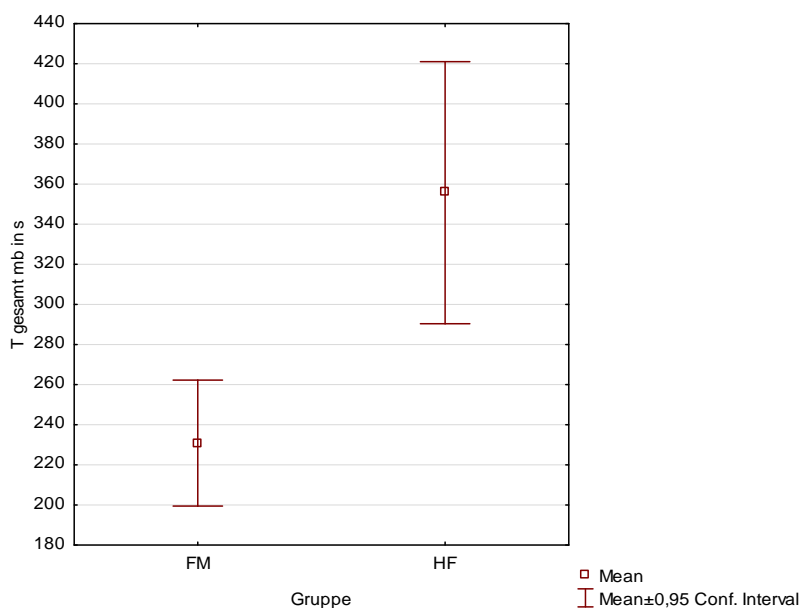


Abb. 5.12 Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Arbeitszeit T-gesamt in (s) im mesio-bukkalen (mb) Wurzelkanal; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

Gruppe	T-gesamt ml \pm SD	T-gesamt mb \pm SD
FlexMaster	236,2 \pm 59,2	230,9 \pm 54,4
Hedström-Feilen	360,4 \pm 103,2	355,7 \pm 113,2
	p = 0,0008	p = 0,0015

Tab. 5.3 Übersicht der erhobenen Daten zur Arbeitszeit T-gesamt in (s); SD = Standardabweichung

5.3 Effektivität der Revision

Mit Hilfe des Micro-CTs wurden die Zähne vor und nach der Revisionsbehandlung gescannt, um das prä- und postoperative Volumen des Wurzelkanalfüllmaterials zu bestimmen. Präoperativ unterschied sich das Volumen des Füllmaterials nicht signifikant voneinander ($p = 0,9268$) (siehe Tabelle 5.4)

Gruppe	Präoperatives Volumen WKF
FlexMaster	14,00 mm ³
Hedström-Feilen	14,35 mm ³

Tab. 5.4 Übersicht zu den präoperativen Volumenmittelwerten des Wurzelkanalfüllungsmaterials (WKF)

In den Abbildungen 5.13 und 5.14 sind die prozentualen Anteile der verbliebenen Wurzelkanalfüllungsreste dargestellt, wobei eine separate Berechnung für den mesio-lingualen und den mesio-bukkalen Wurzelkanal nicht möglich war. Daher wurde das Volumen des in beiden Kanälen verbliebenen Füllmaterials addiert. Im Durchschnitt verblieben in der FlexMaster-Gruppe 18,6% des Füllmaterials und in der Gruppe der Handinstrumente 9,0% (Abbildung 5.14). Dieser Unterschied war statistisch signifikant ($p = 0,0042$).

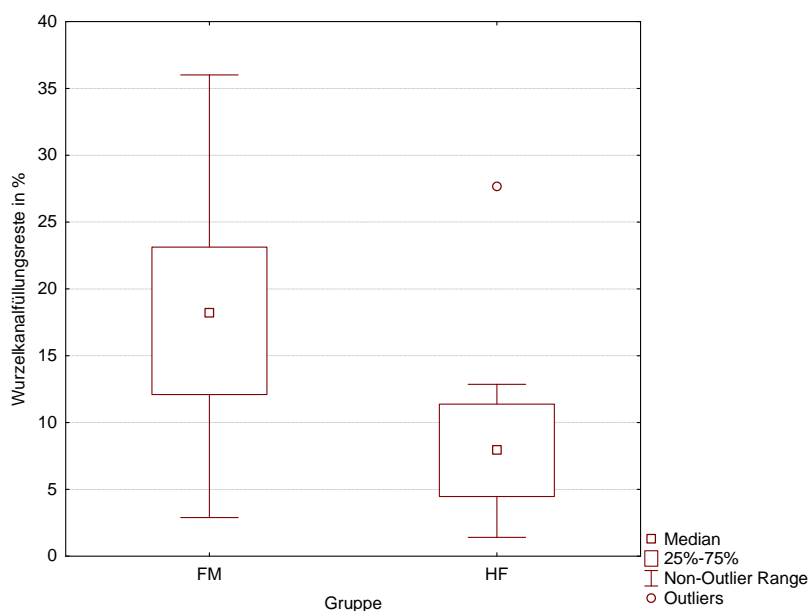


Abb. 5.13 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste in %; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

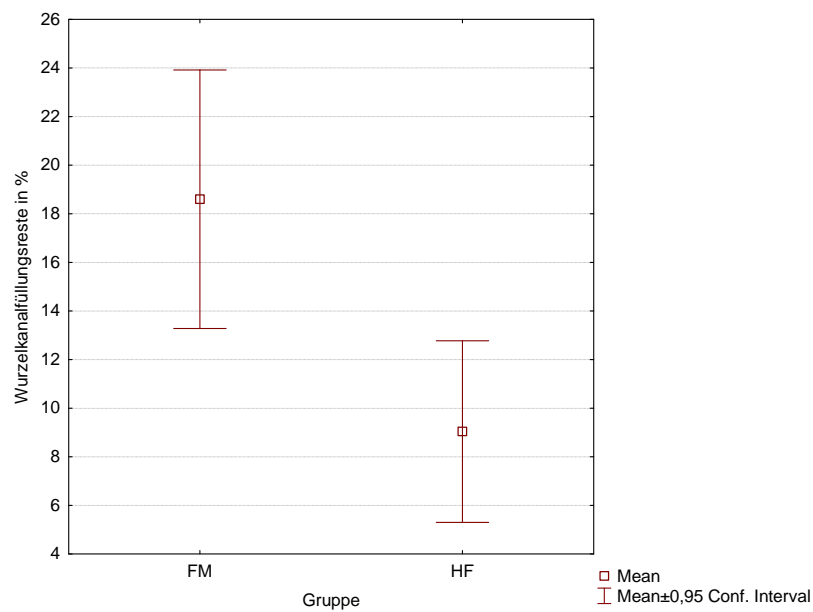


Abb. 5.14 Meanplot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste in %; FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

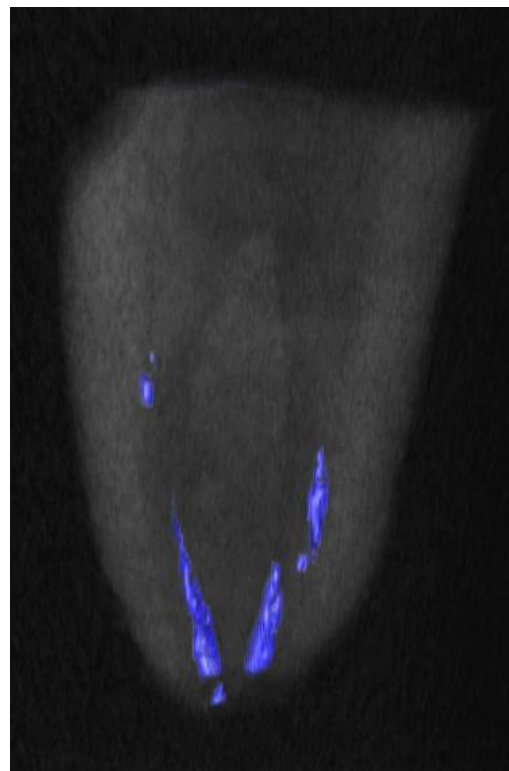
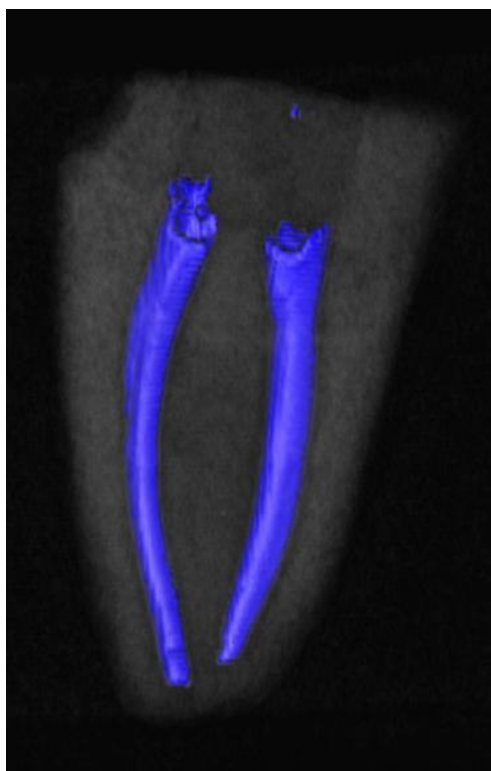


Abb. 5.15a) und b) Micro-CT-Aufnahmen einer repräsentativen Probe vor (a) und nach (b) der Revision mit FlexMaster-Instrumenten

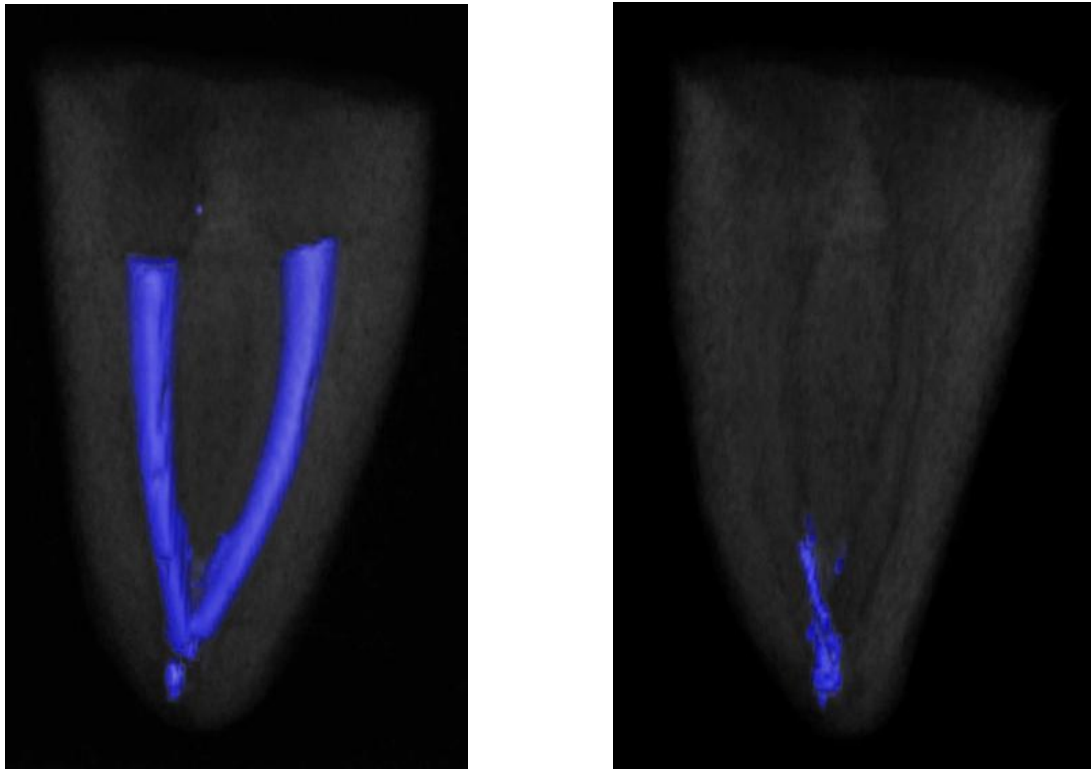


Abb. 5.16a) und b) Micro-CT-Aufnahmen einer repräsentativen Probe vor (a) und nach (b) der Revision mit Hedström-Feilen

5.4 Dentinabtrag während der Revision

Für die Berechnung des Dentinabtrages wurde mit Hilfe des Micro-CTs das prä- und postoperative Zahnhartsubstanzvolumen bestimmt. Den Abbildungen 5.17 und 5.18 ist der Dentinabtrag nach der Revisionsbehandlung zu entnehmen.

Es war ebenfalls keine separate Beurteilung des mesio-lingualen und des mesio-bukkalen Wurzelkanals möglich, sodass der Dentinverlust für beide Kanäle zusammengefasst wurde. Der durchschnittliche Dentinabtrag betrug für das maschinelle System $9,26 \text{ mm}^3$ und für die Hedström-Feilen $8,89 \text{ mm}^3$ (siehe Abbildung 5.18), wobei der Unterschied nicht signifikant war ($p = 0,8197$).

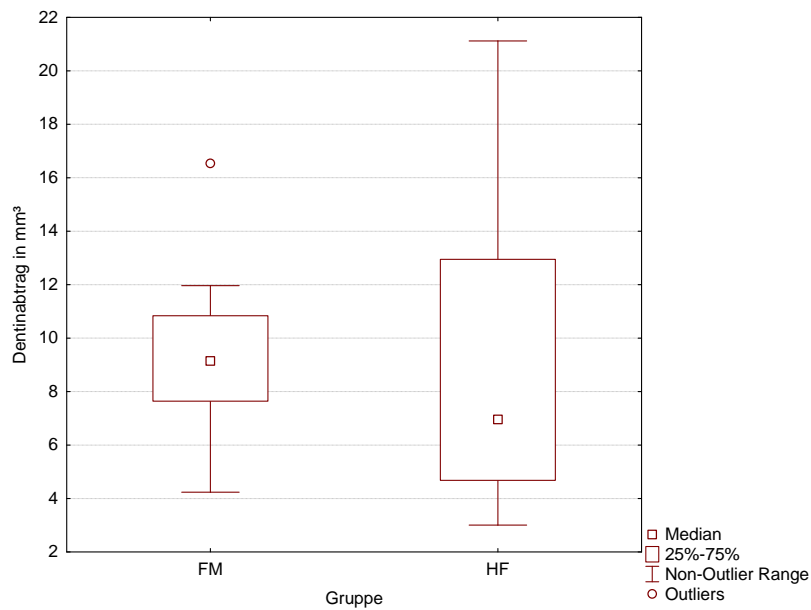


Abb. 5.17 Boxplot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags in mm^3 ,
FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

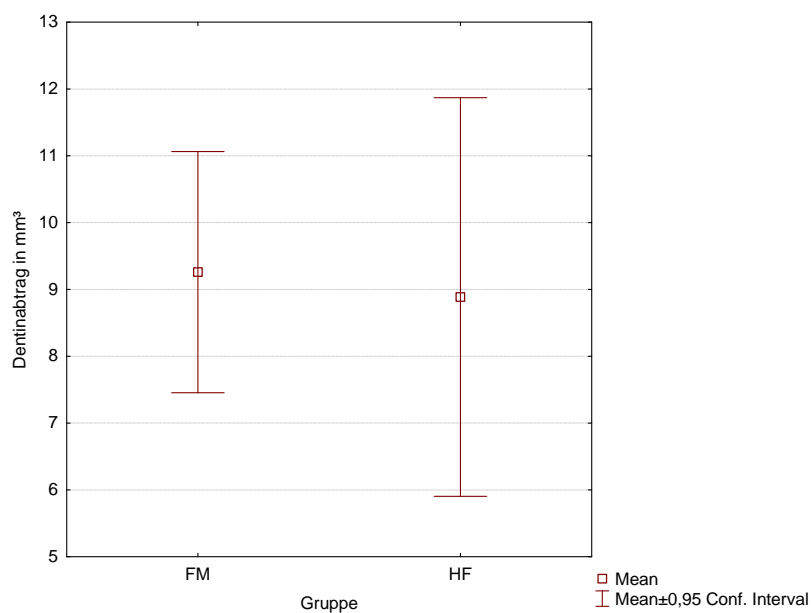


Abb. 5.18 Meanplot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags in mm^3 ,
FM = FlexMaster, HF = Hedström-Feilen

In Tabelle 5.5 sind die Mittelwerte, Minimum und Maximum sowie Standardabweichungen aller betrachteten Parameter zusammengefasst.

Gruppe	Parameter	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
1 FM	T1 ml (in s)	140,9	38	226	57,3
	T1 mb (in s)	126,3	66	255	54,5
	T2 ml (in s)	95,3	50	139	29,1
	T2 mb (in s)	104,6	60	176	38,7
	T gesamt ml (in s)	236,2	121	328	59,2
	T gesamt mb (in s)	230,9	141	333	54,4
	Präop. WKF (in mm ³)	14,00	6,53	21,01	4,25
	WKF-R. (in %)	18,6	2,89	36,01	9,21
	Präop. Dentin (in mm ³)	245,42	189,88	304,68	-----
	Abtrag (in mm ³)	9,26	4,24	16,54	3,13
2 HF	T1 ml (in s)	257,9	114	393	86,7
	T1 mb (in s)	259,1	107	494	116,6
	T2 ml (in s)	109,6	53	240	55,4
	T2 mb (in s)	96,6	30	173	36,6
	T gesamt ml (in s)	360,4	172	520	103,2
	T gesamt mb (in s)	355,7	187	599	113,2
	Präop. WKF (in mm ³)	14,35	8,27	21,1	3,50
	WKF-R. (in %)	9,04	1,41	27,66	6,47
	Präop. Dentin (in mm ³)	256,19	183,48	342,48	-----
	Abtrag (in mm ³)	8,89	3,01	21,12	5,17

Tab. 5.5 Deskriptive Übersicht der erhobenen Daten;

SD = Standardabweichung

5.5 Zwischenfälle

Obwohl die FlexMaster-Instrumente entsprechend den Herstellerangaben verwendet wurden, traten in dieser Gruppe drei Instrumentenfrakturen auf. Dabei frakturierten zwei Feilen der Größe 30/.06 und eine Feile der Größe 25/.06. Die frakturierten Instrumente wurden mit Handinstrumenten entfernt, so dass alle Zähne weiterverwendet und ausgewertet werden konnten. Es frakturierte kein Instrument in der Gruppe der Hedström-Feilen. In beiden Gruppen wurden weder Perforationen noch Wurzelfrakturen beobachtet.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methode

In dieser Studie wurden wurzelkanalbehandelte Zähne sowohl maschinell mit dem Nickel-Titan-System FlexMaster als auch manuell mit Hedström-Feilen revidiert. Die unterschiedlichen Instrumente wurden in Hinsicht auf die Menge an verbleibendem Wurzelkanalfüllmaterial und dem Zahnhartsubstanzabtrag untersucht. Vor Versuchsbeginn wurden Revisionsbehandlungen mit den beiden Instrumentensystemen durchgeführt, damit eine korrekte Anwendung gewährleistet war. Um standardisierte Versuchsbedingungen zu schaffen, wurden ausschließlich mesiale Wurzeln unterer Molaren mit zwei separaten Wurzelkanälen verwendet. Diese Wurzeln wurden auf eine einheitliche Länge von 15 mm gekürzt und anhand der vorher bestimmten Krümmungswinkel und -radien sowie des Volumens des Wurzelkanalfüllmaterials homogen in zwei Gruppen aufgeteilt.

Die Wurzelkanäle waren zuvor von Zahnmedizinstudenten im Rahmen des Kurses der Zahnerhaltungskunde II präpariert und mittels lateral kompakter Guttapercha obturiert worden. Aus diesem Grund waren die Parameter „Arbeitslänge“ und „apikaler Präparationsquerschnitt“ unbekannt, so dass diesbezüglich keine standardisierten Versuchsbedingungen vorlagen. Die korrekte Arbeitslänge während der Revision wurde anhand von Röntgenbildern kontrolliert. Alle Wurzelkanalfüllungen wurden initial mit Gates-Glidden-Bohrern revidiert, um das koronale Füllmaterial zu erweichen und zu entfernen. Die Versuchsbedingungen wurden dadurch standardisiert, dass alle Wurzelkanäle maximal bis zur ISO-Größe 40 revidiert wurden. Alle verwendeten Instrumente waren unbenutzt und wurden bei sichtbarer Deformation oder spätestens nach der vierten Anwendung ausgetauscht, um Ermüdungsfrakturen auszuschließen.

In dieser Studie wurden ausschließlich mesiale Wurzeln von Unterkiefermolaren mit einem Krümmungswinkel zwischen 20° - 45° verwendet, die nach SCHNEIDER (1971) moderat bis stark gekrümmte Wurzelkanäle darstellen. Diese Einteilung nach SCHNEIDER (1971) wurde bereits in anderen Studien angewendet (FERREIRA et al. 2001, SCHIRRMEISTER et al. 2006c, GERGI und SABBAGH 2007, GU et al. 2010). Die Mehrzahl der Revisionsstudien wurde allerdings an Zähnen mit geraden

Wurzelkanälen durchgeführt, da dies eine einfachere Standardisierung der Proben ermöglicht (IMURA et al. 2000, HÜLSMANN und BLUHM 2004, SCHIRRMEISTER et al. 2006b, BARLETTA et al. 2008, DE MELLO et al. 2009, FENOUL et al. 2010 u.a.). Im Gegensatz dazu ist die Anzahl der Studien zur Revisionsbehandlung gekrümmter Wurzelkanäle gering (FERREIRA et al. 2001, SCHIRRMEISTER et al. 2006c, BARLETTA et al. 2007, GERGI und SABBAGH 2007, AYDIN et al. 2009, ÇELIK ÜNAL et al. 2009). Während in geraden Kanälen eine Revisionsbehandlung leichter durchführbar ist, treten bei der Revision gekrümmter Wurzelkanäle häufiger Zwischenfälle wie z. B. eine Instrumentendeformation oder -fraktur auf (SCHIRRMEISTER et al. 2006c). Darüber hinaus ist sowohl die Präparation als auch die Reinigung in gekrümmten Kanälen erschwert (ÇELIK ÜNAL et al. 2009). Ein Versuchsaufbau mit gekrümmten Wurzelkanälen erscheint sinnvoller, da die Mehrzahl aller Wurzelkanäle gekrümmt ist und dieses eher der klinischen Realität entspricht. Es ist durchaus möglich, bei *In-vitro*-Untersuchungen künstliche gekrümmte Wurzelkanäle in Plastikblöcken zu verwenden, um eine verbesserte Standardisierung der Proben zu ermöglichen (HAYAKAWA et al. 2010). Da bei diesen artifiziellen Wurzelkanälen allerdings anatomische Besonderheiten wie Seitenkanäle, Isthmen oder Ramifikationen fehlen, wird die komplexe Anatomie des Wurzelkanalsystems nicht realistisch dargestellt.

In diesem Versuch wurden Unterkiefermolaren verwendet, bei denen die Parameter „Arbeitslänge“ und „Größe des apikalen Präparationsquerschnitts“ unbekannt waren. Ein Studiendesign dieser Art ist bisher in der Literatur nicht beschrieben. In vergleichenden Studien wurden Revisionen an gekrümmten Wurzelkanälen zwar vorgenommen, hier erfolgten allerdings Präparation, Obturation und die anschließende Revision durch denselben Untersucher, so dass die oben erwähnten Parameter bekannt waren. Dadurch, dass in der vorliegenden Studie die Arbeitslänge und die Größe des apikalen Präparationsquerschnitts für den Untersucher unbekannt waren, entspricht dieser Versuchsaufbau eher der klinischen Situation. In der Regel wird eine Revisionsbehandlung durchgeführt, ohne dass diese Parameter von der Primärbehandlung in Erfahrung gebracht werden können. Während der Revision wird versucht, das Wurzelkanalfüllmaterial zu entfernen und anschließend die Bestimmung der Arbeitslänge vorzunehmen.

Um möglichst viel Wurzelkanalfüllmaterial bei der Revision zu entfernen, wird ein größerer Präparationsquerschnitt im Vergleich zur Primärbehandlung empfohlen (HASSANLOO et al. 2007). ROGGENDORF et al. (2010) konnten zeigen, dass sich das Volumen an verbliebenem Füllmaterial nach Erweiterung der Wurzelkanäle um zwei zusätzliche Präparationsgrößen signifikant verringerte. In der vorliegenden Studie wurde eine abschließende ISO-Größe 35 beziehungsweise 40 festgelegt, die in vielen anderen Revisionsstudien ebenfalls die durchschnittliche Präparationsgröße ist (KOSTI et al. 2006, SCHIRRMEISTER et al. 2006b und 2006c, HAMMAD et al. 2008). Ob der Aufbereitungsquerschnitt im Vergleich zum primären Präparationsquerschnitt somit erweitert wurde, kann nicht gesagt werden. Jedoch muss hierbei berücksichtigt werden, dass durch eine weitere Wurzelkanalpräparation die Zahnwurzel geschwächt und damit das Perforations- und Frakturrisiko erhöht wird. Als minimaler apikaler Präparationsquerschnitt wurde die ISO-Größe 35 festgelegt. Wenn bei dieser ISO-Größe keine Guttapercha- oder Sealerreste am Instrument oder in der Spülflüssigkeit erkennbar waren, wurde die Revision beendet. Bei noch vorhandenen Resten des Füllmaterials wurde der Wurzelkanal bis zur ISO-Größe 40 erweitert, bis kein weiteres Wurzelkanalfüllmaterial entfernt werden konnte. Als Hilfsmittel hätte ein Operationsmikroskop (OPM) eingesetzt werden können, da die koaxiale Beleuchtung und mehrfache Vergrößerung des Arbeitsfeldes hierbei vor allem in der endodontischen Behandlung sehr hilfreich ist (CASTELLUCCI 2003) und eine gute Beurteilung des geraden Kanalanteils ermöglicht. Bei Revisionen eignet es sich, um Wurzelkanalfüllungsreste zu ermitteln und gezielt zu entfernen (BALDASSARI-CRUZ und WILCOX 1999). In einigen Revisionsstudien wurde aus diesem Grund ein OPM unterstützend eingesetzt (BALDASSARI-CRUZ und WILCOX 1999, SCHIRRMEISTER et al. 2006a, DE MELLO et al. 2009). Allerdings wurden in diesen Untersuchungen Wurzelkanalfüllungen aus geraden, gut einsehbaren Kanälen revidiert. Inwiefern die Effizienz einer Revision durch ein Mikroskop in gekrümmten Wurzelkanälen gesteigert werden kann, muss in weiteren Studien untersucht werden.

In einigen Revisionsstudien wurden Lösungsmittel zum Erweichen der Guttapercha verwendet, da dies eine Revision erleichtern (FRIEDMAN et al. 1990) beziehungsweise die Arbeitszeit verkürzen kann (HÜLSMANN und BLUHM 2004). Als Lösungsmittel wurden beispielsweise Chloroform (SAE-LIM et al. 2000,

FERREIRA et al. 2001) oder Eukalyptol (UEMURA et al. 1997, HÜLSMANN und BLUHM 2004) verwendet. Das Anlösen von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen empfiehlt sich bei gut kompaktierten Wurzelkanalfüllungen oder in gekrümmten Wurzelkanälen, wenn die Wurzelkanalfüllung apikal der Krümmung endet und daher nicht mehr einsehbar ist (FRIEDMAN et al. 1990). Aufgrund der zytotoxischen und kanzerogenen Nebenwirkungen von Chloroform wird die Anwendung heutzutage nicht mehr empfohlen (WENNERBERG und ØRSTAVIK 1989, ZAKARIASEN et al. 1990). Bei der vorliegenden Untersuchung wurde Eukalyptol als Lösungsmittel verwendet, da es eine gute Biokompatibilität bei ausreichender Effektivität besitzt (FRIEDMAN et al. 1990). Ein Lösungsmittel wurde aufgrund der dicht kompaktierten Guttapercha und der gekrümmten Wurzelkanäle notwendig. Ein Nachteil bei der Verwendung von Lösungsmitteln ist jedoch, dass erweichte Guttapercharesten in Dentintubuli oder Unebenheiten der Kanalwand penetrieren und eine Entfernung unmöglich wird (HORVATH et al. 2009). Die Desinfektion dieser Kanalbereiche ist somit nicht mehr möglich.

In dieser Studie wurden mit Hilfe prä- und postoperativer Micro-CT-Aufnahmen sowohl das Volumen des Wurzelkanalfüllungsmaterials als auch der Zahnhartsubstanz bestimmt. Es liegen zurzeit nur sehr wenige Studien zur Bestimmung des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials mit Hilfe eines Micro-CTs vor. So verglichen HAMMAD et al. (2008) und ROGGENDORF et al. (2010) in ihren Studien die Effektivität unterschiedlicher Instrumente, indem sie anhand der dreidimensionalen Bilder die verbliebenen Wurzelkanalfüllungsreste in geraden Kanälen ermittelten. Bisher liegt nur eine einzige Studie aus unserer Arbeitsgruppe zur Verwendung des Micro-CTs bei einer Revisionsbehandlung gekrümmter Wurzelkanäle vor (RÖDIG et al. 2012). Die meisten Autoren verwendeten für die Quantifizierung des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials entweder Röntgenaufnahmen (FERREIRA et al. 2001, MASIERO und BARLETTA 2005, GERGI und SABBAGH 2007), Fotografien der in Längsrichtung gespaltenen Wurzeln (HÜLSMANN und BLUHM 2004) oder betrachteten die gespaltenen Wurzeln mit Hilfe eines Mikroskops (IMURA et al. 2000, KOSTI et al. 2006). Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Reste des Füllmaterials ist die „Clearing-Technik“, bei der die Zähne mit verschiedenen Chemikalien transparent gemacht, fotografiert und anschließend mit Hilfe einer Computersoftware digital ausgewertet werden

(SCHIRRMEISTER et al. 2006b). Alle genannten Methoden weisen allerdings Limitationen auf. Zwar ist das Röntgen eine schnelle und non-invasive Technik, jedoch ist hier nur eine zweidimensionale Beurteilung möglich und aufgrund der niedrigen Auflösung können Wurzelfüllreste übersehen werden (DUNCAN und CHONG 2010). Auch bei der „Clearing-Technik“ besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der zweidimensionalen Darstellung Füllungsreste übersehen werden. Diesbezüglich ist die Längsspaltung der Wurzel präziser, da eine direkte Inspektion des verbliebenen Füllmaterials möglich ist. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch die Tatsache, dass es sich hierbei um ein destruktives Verfahren handelt und während der Spaltung der Wurzeln Füllmaterial entfernt und somit die Menge an verbliebener Guttapercha und Sealer unterschätzt wird (BARLETTA et al. 2007). Dieses Problem besteht bei der Micro-Computertomografie nicht, da es sich um ein nicht destruktives Verfahren handelt und somit weder Wurzelfüllmaterial noch Zahnhartsubstanz verloren gehen. Im Allgemeinen bietet auch die computertomografische Untersuchung (CT) die Möglichkeit zur Quantifizierung des Wurzelkanalfüllmaterials (BARLETTA et al. 2007). Ein Nachteil ist jedoch, dass die Auflösung des CTs 1 mm beträgt, während mit Hilfe des Micro-CTs deutlich höhere Auflösungen von bis zu 5 - 50 μm und damit genauere Messungen möglich sind (ENGELKE et al. 1999). Allerdings besitzt auch die micro-tomografische Untersuchung Nachteile. Es können beispielsweise nur kleine Objekte bis zu einer Größe von 5 cm untersucht werden, wobei lange Scanzeiten von mehreren Stunden entstehen und sehr große Datensätze bis zu 2150 MB produziert werden. Aufgrund der eingeschränkten Objektgröße und der hohen Strahlenbelastung eignet sich dieses Gerät allerdings nicht zur Untersuchung von Patienten. In diesem Fall ist die konventionelle Zahnfilmaufnahme das Mittel der Wahl. Bei der Micro-CT-Untersuchung muss zusätzlich darauf geachtet werden, dass durch Verwackeln der Proben während des Scanvorgangs keine Bildartefakte entstehen. Um dieses weitestgehend zu verhindern, wurden die Zahnproben beim Scannen mit Schaumstoff fixiert.

Bei der Auswertung der Volumina des Wurzelkanalfüllmaterials und der Zahnhartsubstanz war die Festlegung der Umkehrpunkte im Grauerthistogramm nicht standardisierbar, da jede einzelne Probe aufgrund unterschiedlicher Demineralisationsprozesse und einer verschiedenen Lagerung unterschiedliche

Grauwerte für Luft, Wurzelfüllmaterial und Zahnhartsubstanz lieferte. Daher wurde die Bestimmung der Umkehrpunkte der jeweiligen Kurvenabschnitte durch zwei kalibrierte Zahnärzte vorgenommen. Aus diesen beiden Werten wurde ein Mittelwert gebildet, der für die weiteren Berechnungen verwendet wurde. Ein weiterer Nachteil bei den mit Hilfe des Micro-CTs generierten Darstellungen der Proben ist der Partialvolumeneffekt, der ein Bildartefakt digitaler, bildgebender Verfahren darstellt. Das zu untersuchende Objekt wird schichtweise abgebildet, wobei diese Schichten eine bestimmte Dicke aufweisen und aus mehreren Voxeln bestehen. Jedes Voxel erhält einen Grauwert, welcher der Dichte des abgebildeten Mediums entspricht. Wenn ein Voxel zwei Medien unterschiedlicher Dichte erfasst (z. B. der Übergang von Wurzelkanalfüllmaterial und Zahnhartsubstanz), so wird diesem Voxel nur ein Grauwert zugeordnet, wobei die Grauwerte von Zahnhartsubstanz und Wurzelkanalfüllmaterial zu einem Mittelwert zusammengefasst werden. Die Grauwerte dieser Voxel sind demnach nicht eindeutig einem der beiden Medien zuzuordnen, woraus ein „verwaschener“ Grenzbereich zwischen beiden Medien resultiert. Der Partialvolumeneffekt stellt somit eine Fehlerquelle bei der Berechnung der unterschiedlichen Volumina dar, da die mittelwertig gebildeten Grauwerte der Voxel der Dichte des jeweiligen Mediums nicht korrekt entsprechen.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe des T-Tests und einem Signifikanzniveau von 5%. Es wurden die für die Revision benötigte Arbeitszeit, das Volumen des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials und der Dentinabtrag nach Einsatz zweier unterschiedlicher Instrumentengruppen verglichen. Das Auftreten prozeduraler Fehler wurde ebenfalls erfasst.

Ein direkter Vergleich der vorliegenden Untersuchungsergebnisse mit ähnlichen Studien ist aufgrund unterschiedlicher Versuchsdurchführungen erschwert. Einerseits wurden die Revisionen an unterschiedlichen Zahngruppen und mit verschiedenen Instrumententypen durchgeführt. Außerdem bestanden Unterschiede bezüglich der Verwendung eines Lösungsmittels. Eine vergleichende Untersuchung von FlexMaster-Instrumenten und Hedström-Feilen mit Verwendung von Eukalyptol in

gekrümmten Wurzelkanälen und unter Einsatz des Micro-CTs liegt bisher noch nicht vor.

Es ist von großer Bedeutung, dass die im Rahmen einer Revision eingesetzten Instrumente das bestehende Wurzelkanalfüllmaterial möglichst vollständig entfernen. Dadurch wird es möglich, nekrotisches Gewebe oder Bakterien, die für das Scheitern der Primärbehandlung verantwortlich sein können, zu entfernen. In der vorliegenden Untersuchung wurden in beiden Gruppen Füllungsreste festgestellt. In zahlreichen Revisionsstudien konnte das Wurzelkanalfüllmaterial ebenfalls nicht vollständig entfernt werden (IMURA et al. 2000, SCHIRRMESTER et al. 2006c, BUENO et al. 2006, KOSTI et al. 2006, GERGI und SABBAGH 2007, AYDIN et al. 2009, ÇELIK ÜNAL et al. 2009). Andererseits ist bis heute nicht erwiesen, dass im Wurzelkanal zurückgebliebenes Füllmaterial in jedem Fall zum Scheitern der Revisionsbehandlung führt (SCHIRRMESTER et al. 2006c, HORVATH et al. 2009). Die visuelle Darstellung der Ergebnisse erfolgte mithilfe des Micro-CTs. Diejenigen Bereiche, die verbliebenes Füllmaterial darstellten, wurden berechnet und anschließend als Relativwerte in % des Füllungsvolumens vor der Revision ausgedrückt. Anhand der Micro-CT-Aufnahmen konnte ermittelt werden, dass die Hedström-Feilen signifikant mehr Wurzelkanalfüllmaterial entfernten als die FlexMaster-Instrumente. In der Hedström-Gruppe verblieb durchschnittlich 9,0% Füllungsmaterial im Vergleich zur FlexMaster-Gruppe mit durchschnittlich 18,6%. In der Vergleichsarbeit von AYDIN et al. (2009) resultierte ebenfalls weniger Füllmaterial nach Anwendung von Hedström-Feilen als mit dem rotierenden NiTi-System HERO 642. BUENO et al. (2006) kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die manuellen Hedström-Feilen signifikant mehr Füllungsmaterial entfernen konnten als die rotierenden NiTi-Instrumente. Als möglichen Grund hierfür gaben sie den besseren Kontakt zwischen der Hedström-Feile und der Kanalwand und somit ein effizienteres Entfernen des Füllmaterials an. Nach HÜLSMANN und BLUHM (2004) ist es vor allem im apikalen Bereich schwierig, NiTi-Instrumente an einer bestimmten Stelle zu positionieren, um gezielt Guttapercha zu entfernen. Im Gegensatz dazu ermöglichten Hedström-Feilen eine Präparation isolierter Bereiche im Wurzelkanal. Diesen Aspekt konnten auch RÖDIG et al. (2002) in der Studie zur Präparation ovaler Wurzelkanäle feststellen. Die flexiblen NiTi-Instrumente ermöglichten keine kontrollierte Präparation der bukkalen und lingualen Ausläufer ovaler Wurzelkanäle.

In der vorliegenden Untersuchung konnte ebenfalls eine bessere Taktilität bei der Arbeit mit den Handinstrumenten festgestellt werden. Das Wurzelkanalfüllmaterial konnte mit den Hedström-Feilen „ertastet“ und dann effizienter entfernt werden.

In der Studie von ÇELIK ÜNAL et al. (2009) wurden die Wurzelkanalfüllungsreste anhand von Röntgenbildern aus zwei unterschiedlichen Projektionen ermittelt. Aus bucco-lingualer Projektion betrachtet, verblieb am wenigsten Füllmaterial nach Einsatz der Hedström-Feilen. Aus der proximalen Richtung war jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen Hand- und NiTi-Instrumenten festzustellen. In der Studie von SCHIRRMEISTER et al. (2006c) resultierten bezüglich der Füllungsreste keine signifikanten Unterschiede zwischen den Hedström-Feilen und den rotierenden FlexMaster- sowie ProTaper-Instrumenten. Als Grund für das verbliebene Füllmaterial gaben sie Furchen und Vertiefungen des Dentins an, in die das Füllmaterial gepresst wurde. Außerdem begründeten sie dieses Ergebnis mit dem ähnlichen Feilendesign der verwendeten Instrumente, wodurch keines in diesen Bereichen effizienter arbeiten könne.

In vielen Revisionsstudien wurden die Wurzelkanäle in koronale, mittlere und apikale Abschnitte eingeteilt (IMURA et al. 2000, BETTI und BRAMANTE 2001, HÜLSMANN und BLUHM 2004, KOSTI et al. 2006, GERGI und SABBAGH 2007). Auf diese Weise konnten die Füllungsreste räumlich genauer zugeordnet werden. In allen Untersuchungen verblieb das meiste Wurzelkanalfüllmaterial in der apikalen Region, was auf die anatomischen Unregelmäßigkeiten und die schwierige Instrumentation dieser Region zurückführbar ist (FERREIRA et al. 2001). In der vorliegenden Arbeit war wegen der fehlenden Information bezüglich der Arbeitslänge diese Unterteilung nicht möglich. Die Zähne wurden auf eine einheitliche Länge von 15 mm gekürzt, wobei die Länge der Wurzelkanalfüllung nicht einheitlich war. Die Zähne wurden allerdings anhand des Volumens der Wurzelkanalfüllung, welches präoperativ bestimmt wurde, homogen in zwei Gruppen aufgeteilt.

Aufgrund des zeitlichen Vorteils der rotierenden Instrumente und der besseren Sauberkeit der Wurzelkanäle bei Verwendung der Handinstrumente empfiehlt sich für Revisionsbehandlungen eine Kombination beider Systeme. HÜLSMANN und STOTZ (1997) gaben an, dass nach Einsatz von rotierenden Instrumenten und Hilfsmitteln wie Wärme oder Lösungsmittel eine sorgfältige Nachbearbeitung mit Hand-

instrumenten erfolgen sollte, um eine möglichst optimale Sauberkeit der Wurzelkanäle zu erreichen.

In der vorliegenden Studie wurde weiterhin der Dentinabtrag nach der Revision untersucht, da durch den Verlust von Zahnhartsubstanz eine Schwächung des Zahnes resultiert (IKRAM et al. 2009). Destruktionen im klinischen Kronenbereich können zur Destabilisierung der Höcker und sogar zu Frakturen führen (LANG und RAAB 2005). In ihrer Studie stellten LANG und RAAB (2005) fest, dass ein Zahnhartsubstanzabtrag im Wurzelkanal ebenfalls zu einer gesteigerten Verformbarkeit der Wurzel führt. Allerdings bewirkte eine minimal-invasive Wurzelkanalpräparation im Vergleich zu einer Stiftpräparation lediglich eine geringere Destabilisierung der Wurzel. In der Literatur liegen einige Studien vor, die mit Hilfe des Micro-CTs den Dentinabtrag während einer endodontischen Primärbehandlung untersuchten (RHODES et al. 1999, BERGMANS et al. 2001, PETERS et al. 2001, PAQUÉ et al. 2009). Im Rahmen von Revisionen ist ein übermäßiger Dentinabtrag ebenfalls zu vermeiden, um das Risiko einer Wurzellängsfraktur oder einer Perforation zu reduzieren (HÜLSMANN et al. 2011). Es existiert bislang nur eine Studie, in welcher der Dentinabtrag während einer Revisionsbehandlung untersucht wurde (RÖDIG et al. 2012). Hier resultierte ein zweifach höherer Zahnhartsubstanzabtrag nach Einsatz von rotierenden Instrumenten. Dieser Aspekt wurde durch die größeren Konizitäten der rotierenden Instrumente (4 - 10%) im Vergleich zu den Handfeilen (2%) begründet. In der vorliegenden Untersuchung betrug der durchschnittliche Dentinabtrag für das maschinelle System 9,26 mm³ und für die Hedström-Feilen 8,89 mm³, wobei der Unterschied nicht signifikant war. Dies ist auf das ähnliche Feilendesign beider Instrumentengruppen zurückzuführen. Beide besitzen einen aktiven Schneidewinkel und haben dadurch eine ähnliche Schneidleistung. Um das Frakturrisiko zu senken, empfiehlt sich nach abgeschlossener endodontischer Behandlung je nach Zahntyp sowie Destruktionsgrad der klinischen Krone eine entsprechende Restauration des Zahnes (RÖDIG et al. 2009).

Bei Revisionsbehandlungen können als Hauptkomplikationen Perforationen, Verblockungen, Verlust der Arbeitslänge, Stufenbildungen und Instrumentenfrakturen auftreten (DUNCAN und CHONG 2011). In der vorliegenden Studie traten ausschließlich drei Instrumentenfrakturen in der FlexMaster-Gruppe auf. Alle Instrumente wurden bei einer sichtbaren Deformation oder maximal nach der vierten Anwendung

ausgetauscht. Obwohl die Feilen nach Herstellerangaben und mit einem chipgesteuerten Motor mit Drehmomentkontrolle angewendet wurden, frakturierte das Instrument der Größe 30/.06 einmal bei der zweiten Anwendung und einmal bei der dritten Anwendung sowie das Instrument der Größe 25/.06 bei der ersten Anwendung. Hierbei war auffällig, dass lediglich die Instrumente in der initialen Phase der Revision frakturierten. Frühere Studien bestätigten ein erhöhtes Frakturrisiko bei rotierenden NiTi-Feilen im Vergleich zu Handinstrumenten (HÜLSMANN und STOTZ 1997, IMURA et al. 2000, BETTI und BRAMANTE 2001, SCHIRRMEISTER et al. 2006b, 2006c). In beiden Studien von SCHIRRMEISTER et al. (2006b und 2006c) frakturierten insgesamt fünf FlexMaster-Feilen der Größe 25/.06, ebenfalls Feilen der initialen Phase, wohingegen die Instrumente der Hedström-Gruppe intakt blieben. In der Studie von BRAMANTE und BETTI (2000) wurde das rotierende System Quantec SC bei der Entfernung von Guttapercha untersucht. Das System wurde bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten getestet. Es zeigte sich, dass die meisten Instrumente in Anwendung mit der kleinsten Geschwindigkeit (300 Umin^{-1}) frakturierten (insgesamt sechs Feilen). In der Gruppe mit der höchsten Umdrehungszahl (1500 Umin^{-1}) frakturierte lediglich nur ein Instrument. Als Grund hierfür gaben sie den niedrigeren Widerstand für die Instrumente bei höheren Umdrehungszahlen an. Da die vom Hersteller empfohlenen Umdrehungszahlen für FlexMaster-Instrumente zwischen 150 bis 300 Umin^{-1} liegen, wurde in der vorliegenden Untersuchung eine Geschwindigkeit von 300 Umin^{-1} gewählt. Ob eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit zu einer Reduktion der Frakturrate geführt hätte, war nicht Ziel der Untersuchung.

Um die Wirtschaftlichkeit verschiedener Instrumente bei einer Revisionsbehandlung zu untersuchen, spielt die benötigte Arbeitszeit eine große Rolle. Es wurden drei Arbeitszeiten (T1, T2 und T-gesamt) gemessen und miteinander verglichen. T1 beschreibt die benötigte Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge. T2 beschreibt den zeitlichen Aufwand der anschließenden Wurzelkanalpräparation bis zur ISO-Größe 35 oder 40, die gleichzeitig das vollständige Entfernen des Wurzelkanalfüllmaterials beinhaltet. T-gesamt ist die Summe von T1 und T2. Hierbei stellte sich heraus, dass das maschinelle System sowohl bis zum Erreichen der Arbeitslänge als auch beim gesamten Zeitaufwand für die Revision signifikant schneller als die Handinstrumente war. Es lag kein signifikanter Unterschied bei der Arbeitszeit T2 vor. HÜLSMANN und

BLUHM (2004) stellten in ihrer Studie fest, dass die Arbeitszeiten für die rotierenden Systeme ProTaper und FlexMaster bis zum Erreichen der Arbeitslänge sowie bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials signifikant kürzer im Vergleich zu den Hedström-Feilen waren. BETTI und BRAMANTE (2001) kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass das maschinelle System Quantec SC signifikant schneller arbeitete als die Handinstrumente. Der zeitliche Vorteil der FlexMaster-Instrumente könnte darin begründet liegen, dass diese Feilen rotierend im Kanal verwendet werden und einen negativen Schneidewinkel haben. Dadurch wird die Guttapercha erweicht und gleichzeitig aktiv geschnitten (HÜLSMANN und BLUHM 2004). Außerdem resultiert aufgrund der plastifizierten Guttapercha ein geringerer Widerstand für die Instrumente (BRAMANTE und BETTI 2000).

Es liegen allerdings auch Untersuchungen vor, in denen die benötigte Arbeitszeit für Revisionen mit Handinstrumenten geringer als mit rotierenden Systemen ausfällt. In der Studie von SCHIRRMEISTER et al. (2006c) war von vier unterschiedlichen Techniken der zeitliche Aufwand bei Revisionen mit Hedström-Feilen am geringsten. Am längsten dauerte die Revision mit den FlexMaster-Instrumenten. IMURA et al. (2000) kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Auch hier benötigten die Hedström-Feilen signifikant weniger Zeit für die Revision als die maschinellen Systeme Quantec LX oder ProFile.04. Als Grund hierfür gaben sie an, dass Guttapercha mit den Handinstrumenten in größeren Stücken entfernt werden konnte, so dass nur kleine Füllungsreste verblieben, die röntgenologisch nicht detektiert wurden. Im Gegensatz dazu zeigten die Wurzelkanäle nach rotierender Instrumentierung in der röntgenologischen Überprüfung größere Füllungsreste, die ein weiteres Nachbearbeiten erforderten. Aufgrund dessen ergaben sich längere Arbeitszeiten für die maschinellen Systeme. In der vorliegenden Studie wurde hingegen nach visueller Darstellung der Füllmaterialreste mit Hilfe des Micro-CTs nicht mehr nachgearbeitet. Der Zeitpunkt zum Beenden der Revision wurde dadurch festgelegt, dass nach Erweiterung der Kanäle bis zur ISO-Größe 35 oder maximal bis zur ISO-Größe 40 kein Wurzelkanalfüllmaterial mehr am Instrument zu sehen war. Dieser Endpunkt wurde mit dem rotierenden FlexMaster-System schneller erreicht als mit den Handinstrumenten.

7 Schlussfolgerungen

1. Eine vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials konnte mit keinem der getesteten Systeme unter Verwendung von Lösungsmittel erreicht werden.
2. Das maschinelle System arbeitete signifikant schneller als die Handinstrumente.
3. Die Handinstrumente konnten signifikant mehr Wurzelkanalfüllmaterial entfernen.
4. In der Gruppe der rotierenden Instrumente kam es zu Instrumentenfrakturen (3 Frakturen in 28 Wurzelkanälen). In der Gruppe der Handinstrumente traten keine Komplikationen auf.
5. Es wurde kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Systemen bezüglich des Dentinabtrags festgestellt.
6. Das Micro-CT eignet sich zur prä- und postoperativen Beurteilung von wurzelkanalgefüllten Zähnen.

8 Zusammenfassung

Eine erneute Wurzelkanalbehandlung kann notwendig sein, wenn die endodontische Erstbehandlung gescheitert ist. Es gibt unterschiedliche Methoden, eine Revision durchzuführen. In der vorliegenden Studie wurden an 28 extrahierten Zähnen die Effektivität sowie die Sicherheit zweier unterschiedlicher Revisionstechniken von Guttapercha-Wurzelkanalfüllungen verglichen. Die Obturation der Wurzelkanäle erfolgte bereits im Vorfeld von Zahnmedizinstudenten, somit waren die Parameter „Arbeitslänge“ und „Größe des zuletzt verwendeten Instrumentes“ unbekannt. Die Untersuchungen wurden jeweils an dem mesio-lingualen sowie mesio-bukkalen Wurzelkanal von Unterkiefermolaren mit moderaten bis starken Wurzelkanalkrümmungen durchgeführt. Die Auswertung erfolgte durch Untersuchung der Wurzeln mit Hilfe eines Micro-CTs. Hiermit wurden die Wurzelkanalfüllungsreste sowie der Dentinabtrag vermessen. Die Zähne wurden vor und nach der Revision gescannt und die Daten mit Hilfe der dazugehörigen Software MicroView ausgewertet. Nachdem die Zähne randomisiert in zwei Gruppen aufgeteilt wurden, erfolgte die Revision mit folgenden Instrumenten:

- manuell, mit Hedström-Feilen in Kombination mit Gates-Glidden-Bohrern
- maschinell, mit FlexMaster-Feilen in Kombination mit Gates-Glidden-Bohrern.

In beiden Gruppen wurde als Lösungsmittel Eukalyptol eingesetzt. Nachdem die geschätzte Arbeitslänge erreicht war, wurde ein konventionelles Röntgenbild angefertigt, um die Arbeitslänge zu überprüfen. Die weitere Präparation erfolgte in beiden Gruppen maximal bis zu der ISO-Größe 40. Die Instrumente wurden so lange eingesetzt, bis sich mit ihnen kein Füllungsmaterial mehr aus dem Wurzelkanal entfernen ließ. Während der Revision wurde bis zum Erreichen der Arbeitslänge sowie nach vollständiger Aufbereitung mit einer Stoppuhr die Zeit gemessen. Nach erfolgter Behandlung wurden die Sauberkeit der Wurzelkanäle und der Zahnhartsubstanzverlust mit Hilfe des Micro-CTs analysiert.

Beim Vergleich der Arbeitszeit resultierte ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Instrumentengruppen. Der durchschnittliche Zeitaufwand war sowohl bis zum Erreichen der Arbeitslänge als auch nach vollständiger Aufbereitung für das maschinelle System signifikant geringer als für die Handinstrumente.

Zur Bestimmung der Sauberkeit der Wurzelkanäle wurde das Volumen des verbliebenen Füllmaterials bestimmt und in Relation zum Volumen des Füllmaterials vor der Revision gesetzt. Hierbei resultierte, dass die manuellen Hedström-Feilen signifikant mehr Wurzelkanalfüllmaterial entfernen konnten als die FlexMaster-Feilen. Die Bestimmung des Dentinabtrags nach der Revision ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Instrumentengruppen.

Während der Revisionsbehandlung kam es zu prozeduralen Fehlern. In der FlexMaster-Gruppe frakturierten drei Instrumente, wohingegen keines der Handinstrumente frakturierte.

9 Literaturverzeichnis

AYDIN B, KÖSE T, ÇALI CAN 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

BALDASSARI-CRUZ LA, WILCOX LR (1999):

Effectiveness of gutta-percha removal with and without the microscope.

J Endod 25, 627-628

BARLETTA FB, DE MELLO RAHDE N, LIMONGI O, MOURA AAM, ZANESCO C, MAZOCATTO G (2007):

In vitro comparative analysis of 2 mechanical techniques for removing gutta-percha during retreatment.

J Can Dent Assoc 73, 65-65e

BARLETTA FB, DE SOUSA REIS M, WAGNER M, BORGES JC, DALL'AGNOL C (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

BERGENHOLTZ G, LEKHOLM U, MILTHON R, HEDEN G, ODESJÖ B, ENGSTRÖM B (1979):

Retreatment of endodontic fillings.

Scand J Dent Res 87, 217-224

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 LV, BRAMANTE CM, DE MORAES IG, BERNARDINELI 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, 46-50

BHARATHI G, CHACKO Y, LAKSHMINARAYANAN L (2002):

An in-vitro analysis of gutta-percha removal using three different techniques.

Endodontology 14, 41-45

BRAMANTE CM, BETTI LV (2000):

Efficacy of Quantec rotary instruments for gutta-percha removal.

Int Endod J 33, 463-467

BUENO CE, DELBONI MG, DE ARAÚJO RA, CARRARA HJ, CUNHA RS (2006):

Effectiveness of rotary and hand files in gutta-percha and sealer removal using chloroform or chlorhexidine gel.

Braz Dent J 17, 139-143

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 JJ, PERTOT WJ (1994):

Relationship between file size and stiffness of stainless steel instruments.

Endod Dent Traumatol 10, 260-263

CASTELLUCCI A (2003):

Magnification in endodontics: the use of the operating microscope.

Pract Proced Aesthet Dent 15, 377-384

ÇELİK ÜNAL G, ÜREYEN KAYA B, TAÇ AG, KEÇECİ 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

DE MELLO Jr JE, CUNHA RS, BUENO CE, ZUOLO ML (2009):

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

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 108, 59-62

DGZMK (2000):

Wurzelkanalaufbereitung.

Dtsch Zahnärztl Z 55, 719

DIANDRETH M, ELLIS RA, FAGUNDES D (1995):

The effectiveness of hand and rotary files to maintain canal curvature: a comparison.

J Endod 21, 236 (AAE –Abstract PC 22)

DUNCAN HF, CHONG BS (2010):

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

ENDO 4,111-126

DUNCAN HF, CHONG BS (2011):

Removal of root filling materials.

Endodontic Topics 19, 33-57

ENGELKE K, KAROLCZAK M, LUTZ A, SEIBERT U, SCHALLER S, KALENDER W (1999):

Mikro-CT. Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur.

Radiologie 39, 203-212

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

FENOUL G, MELESS GD, PÉREZ F (2010):

The efficacy of R-Endo rotary NiTi and stainless-steel hand instruments to remove gutta-percha and Resilon.

Int Endod J 43, 135-141

FERREIRA JJ, RHODES JS, PITT FORD TR (2001):

The efficacy of gutta-percha removal using ProFiles.

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 (2002):

Orthograde Revision von Wurzelkanalbehandlungen – Konzeption und praktische Umsetzung Teil 7: Wurzelkanalfüllung und andere Wurzelkanalobstruktionen (hier: Guttapercha).

Endodontie 11, 305-314

FRIEDMAN S, STABHOLZ A, TAMSE A (1990):

Endodontic retreatment – case selection and technique. Part 3. Retreatment techniques.

J Endod 16, 543-549

FRIEDMAN S, ABITBOL S, LAWRENCE HP (2003):

Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study. Phase 1: initial treatment.

J Endod 29, 787-793

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

GILBERT BO Jr, RICE CT (1987):

Re-treatment in endodontics.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 64, 333-338

GRESSMANN G, HÜLSMANN M (2001):

Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit dem FlexMaster-NiTi-System.

Endodontie 10, 227-241

GROSSMAN LI (1972):

Endodontic failures.

Dent Clin North Am 16, 59-70

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

GURNEY BF, BEST EJ, GERVASIO G (1971):

Physical measurements on gutta-percha.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 32, 260-270

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

HANCOCK HH 3rd, SIGURDSSON A, TROPE M, MOISEIWITSCH J (2001):

Bacteria isolated after unsuccessful endodontic treatment in a North American population.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 91, 579-586

HASSANLOO A, WATSON P, FINER Y, FRIEDMAN S (2007):

Retreatment efficacy of the Epiphany soft resin obturation system.

Int Endod J 40, 633-643

HAYAKAWA T, TOMITA F, OKIJI T (2010):

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

J Endod 36, 1676-1678

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

HÜLSMANN M:

Checklisten der Zahnmedizin – Endodontie,
hrsg. v. Thieme-Verlag, Stuttgart 2008

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

IDA RD, GUTMANN JL (1995):

Importance of anatomic variables in endodontic treatment outcomes: case report.

Endod Dent Traumatol 11, 199-203

IKRAM OH, PATEL S, SAURO S, MANNOCCI F (2009):

Micro-computed tomography of tooth tissue volume changes following endodontic procedures and post space preparation.

Int Endod J 42, 1071-1076

IMURA N, KATO AS, HATA GI, UEMARA 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

JUNG M, LOMMEL D, KLIMEK J (2005):

The imaging of root canal obturation using micro-CT.

Int Endod J 38, 617-626

KAPLOWITZ GJ (1990):

Evaluation of gutta-percha solvents.

J Endod 16, 539-540

KEREKES K, TRONSTAD L (1979):

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

J Endod 5, 83-90

KOSTI E, LAMBRIANIDIS T, ECONOMIDES N, NEOFITOU C (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

LANG H, RAAB WHM (2005):

Auswirkung endodontisch-präparativer Maßnahmen auf die Stabilität von Frontzähnen.

Dtsch Zahnärztl Z 60, 26-31

LIN LM, PASCON EA, SKRIBNER J, GÄNGLER P, LANGELAND K (1991):

Clinical, radiographic, and histological study of endodontic treatment failures.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 71, 603-611

LÖST C (1994):

Symptomatologie und Therapie der Infektion eines vor Jahren instrumentierten und gefüllten Wurzelkanals.

Endodontie 3, 143-152

LÖST C, WESSELINK PR, WINKLER R (1992):

Grundlagen und Prinzipien der modernen Endodontie.

Endodontie 1, 7-18

MACHTOU P, FRIEDMAN S (1997):

Advances in endodontic retreatment.

Alpha-Omega 90, 47-55

MADARATI A, QUALTROUGH A, WATTS D (2009):

A microcomputed tomography scanning study of root canal space: changes after the ultrasonic removal of fractured files.

J Endod 35, 125-128

MANDEL E, FRIEDMAN S (1992):

Endodontic retreatment: a rational approach to root canal reinstrumentation.

J Endod 18, 565-569

MARLIN J, SCHILDER H (1973):

Physical properties of gutta-percha when subjected to heat and vertical condensation.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 36, 872-879

MARXEN M, THORNTON MM, CHIAROT CB, KLEMENT G, KOPRIVINIKAR J, SLED JG, HENKELMAN RM (2004):

MicroCT scanner performance and considerations for vascular specimen imaging.

Med Phys 31, 305-313

MASIERO AV, BARLETTA FB (2005):

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

Int Endod J 38, 2-7

MILLS JC (1999):

The endodontic autopsy: a valid learning tool.

J Endod 25, 451-452

MÖLLER AJR (1966):

Microbiological examination of root canals and periapical tissues of human teeth.

Odontol Tidskr 74, 1-380

MOLANDER A, REIT C, DAHLÉN G, KVIST T (1998):

Microbiological status of root-filled teeth with apical periodontitis.

Int Endod J 31, 1-7

MOORE J, FITZ-WALTER P, PARASHOS P (2009):

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

Int Endod J 42, 1057-1064

NAIR RPN (2004):

Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures.

Crit Rev Oral Biol Med 15, 348-381

NAIR RPN, 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

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 44, 583-609

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 microcomputed tomography study.

J Endod 36, 703-707

PETERS OA, LAIB A, RÜEGSEGG 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

PINHEIRO ET, GOMES BP, FERRAZ CC, SOUSA EL, TEIXEIRA FB, SOUZA-FILHO FJ (2003):

Microorganisms from canals of root-filled teeth with periapical lesions.

Int Endod J 36, 1-11

REIT C, HOLLENDER L (1983):

Radiographic evaluation of endodontic therapy and the influence of observer variation.

Scand J Dent Res 91, 205-212

RHODES JS, PITT FORD TR, LYNCH JA, LIEPINS PJ, CURTIS RV (1999):

Micro-computed tomography: a new tool for experimental endodontology.

Int Endod J 32, 165-170

RÖDIG T, HÜLSMANN M, MÜHGE M, SCHÄFERS F (2002):

Quality of preparation of oval distal root canals in mandibular molars using nickel-titanium instruments.

Int Endod J 35, 919-928

RÖDIG T, HÜLSMANN M, NORDMEYER S, DREBENSTEDT S:

Restauration mit Faserstiften und definitive koronale Versorgung.

In: Grundlagen der modernen Endodontie.

hrsg. v. Spitta Verlag, Balingen 2009, 247-262

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, doi: 10.1111/j.1365-2591.2012.02014.x.

ROGGENDORF MJ, LEGNER M, EBERT J, FILLERY E, FRANKENBERGER R, FRIEDMAN S (2010):

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

Int Endod J 43, 200-209

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

SCELZA MF, COIL JM, MACIEL AC, OLIVEIRA LR, 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, 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

SCHILDER H (1974):

Cleaning and shaping the root canal.

Dent Clin North Am 18, 269–296

SCHILDER H, GOODMAN A, ALDRICH W (1974a):

The thermomechanical properties of gutta-percha. Part I. The compressibility of gutta-percha.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 37, 946-953

SCHILDER H, GOODMAN A, ALDRICH W (1974b):

The thermomechanical properties of gutta-percha. Part III. Determination of phase transition temperatures for gutta-percha.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 38, 109-114

SCHIRRMEISTER JF, HERMANN S P, MEYER KM, GOETZ F, HELLWIG E (2006a):

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

SCHIRRMEISTER JF, WRBAS KT, MEYER KM, ALTENBURGER MJ, HELLWIG E (2006b):

Efficacy of different rotary instruments for gutta-percha removal in root canal retreatment.

J Endod 32, 469-472

SCHIRRMEISTER JF, WRBAS KT, SCHNEIDER FH, ALTENBURGER MJ, HELLWIG E (2006c):

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

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

SCHMALZ G (1990):

Die Wurzelkanalbehandlung – Klinische Erfolge.

Dtsch Zahnärztl Z 45, 251-256

SCHNEIDER SW (1971):

A comparison of canal preparations in straight and curved root canals.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 32, 271-275

SIQUEIRA JF Jr (2001):

Ursachen endodontischer Misserfolge.

Endodontie 10, 243-257

SIQUEIRA JF Jr, DE UZEDA M (1996):

Disinfection by calcium hydroxide pastes of dentinal tubules infected with two obligate and one facultative anaerobic bacteria.

J Endod 22, 674-676

SIQUEIRA JF Jr, DE UZEDA M, FONSECA ME (1996):

A scanning electron microscopic evaluation of in vitro dentinal tubules penetration by selected anaerobic bacteria.

J Endod 22, 308-310

SIQUEIRA JF Jr, ARAÚJO MCP, GARCIA PF, FRAGA RC, SABÓIA DANTAS CJ (1997):

Histological evaluation of the effectiveness of five instrumentation techniques for cleaning the apical third of root canals.

J Endod 23, 499-502

SIRÉN EK, HAAPASALO MP, WALTIMO TM, ØRSTAVIK D (2004):

In vitro antibacterial effect of calcium hydroxide combined with chlorhexidine or iodine potassium iodide on *Enterococcus faecalis*.

Eur J Oral Sci 112, 326-331

SJÖGREN U, HAGGLUND B, SUNDQVIST G, WING K (1990):

Factors affecting the long-term results of endodontic treatment.

J Endod 16, 498-504

SUNDQVIST G, FIGDOR 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

SWAIN MV, XUE J (2009):

State of the art of Micro-CT applications in dental research.

Int J Oral Sci 1, 177-188

TAMSE A, UNGER U, METZGER Z, ROSENBERG M (1986):

Gutta-percha solvents: a comparative study.

J Endod 12, 337-339

UEMURA M, HATA G, TODA T, WEINE FS (1997):

Effectiveness of eucalyptol and d-limonene as gutta-percha solvents.

J Endod 23, 739-741

VAN NIEUWENHUYSEN JP, AOUAR M, D'HOORE W (1994):

Retreatment or radiographic monitoring in endodontics.

Int Endod J 27, 75-81

VIANNA ME, GOMES BP, BERBER VB, ZAIA AA, FERRAZ CC, DE SOUZA-FILHO FJ (2004):

In vitro evaluation of the antimicrobial activity of chlorhexidine and sodium hypochlorite.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 97, 79-84

WALTIMO T (2006):

Hefepilz bei endodontischen Infektionen
Häufigkeit, Virulenz und Behandlungsstrategien.
Endodontie 15, 123-134

WALTIMO TM, SIRÉN EK, ØRSTAVIK D, HAAPASLO MP (1999):

Susceptibility of oral Candida species to calcium hydroxide in vitro.
Int Endod J 32, 94-98

WEIGER R, LÖST C, HÜLSMANN M (1994):

Die Revision von Wurzelkanalbehandlungen Teil I: Indikationsstellung.
Endodontie 3, 27-37

WENBERG A, ØRSTAVIK D (1989):

Evaluation of alternatives to chloroform in endodontic practice.
Endod Dent Traumatol 5, 234-237

WESSELINK PR (1992):

Therapiemöglichkeiten nach Fraktur endodontischer Instrumente im Wurzelkanal.
Endodontie 1, 131-139

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

WOLLARD RR, BROUGH SO, MAGGIO J, SELTZER S (1976):

Scanning electron microscopic examination of root canal filling materials.
J Endod 2, 98-110

WOURMS DJ, CAMPBELL AD, HICKS ML, PELLEU GB Jr (1990):

Alternative solvents to chloroform for gutta-percha removal.

J Endod 16, 224-226

YAN MT (2006):

The management of periapical lesions in endodontically treated teeth.

Aust Endod J 32, 2-15

ZAKARIASEN KL, BRAYTON SM, COLLINSON DM (1990):

Efficient and effective root canal retreatment without chloroform.

J Can Dent Assoc 56, 509-512

10 Anhang: Materialliste, Tab. 10.1Materialliste

Diamantschleifkörper	Komet, Lemgo
Digitales Röntgengerät	Trophy Elitys, Croissy-Beaubourg, Frankreich
EDTA (20 %)	Lege Artis Pharma GmbH + Co KG, Dettenhausen
Endo IT professional-Motor	Woodinville, WA, USA
Eukalyptol	Klinikumsapotheke Göttingen
FlexMaster-Feilen bis ISO-Größe 02./40	VDW, München
Gates-Glidden-Bohrer Größe 2 und 3	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz
Handspülung	EndoNeedle, Vedefar N.V, Dilbeek, Belgien
Hedström-Feilen bis ISO-Größe 40	VDW, München
Micro-CT	eXplore Locus SP, General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada
NaOCl (1%)	Hedinger, Stuttgart
Papierspitzen	Alfred Becht GmbH, Offenburg
Silberstift	VDW, München
Winkelstück	Sirona, Bensheim

Zahn	Gruppe	BL		MD mb		MD ml		vor Revision		nach Revision		Abtrag		vor Revision		nach Revision		Restvol. in %	T1 ml in sec	T1 mb in sec	T2 ml in sec	T2 mb in sec	Tgesamt ml in sec	Tgesamt mb in sec
		Mittelwert Winkel	Mittelwert Radius	Mittelwert Winkel	Mittelwert Radius	Mittelwert Winkel	Mittelwert Radius	Vol. Zahn in mm³	Vol. Zahn nach Revision in mm³	Vol. Zahn in mm³	Vol. Zahn nach Revision in mm³	Vol. WKF in mm³	Vol. WKF nach Revision in mm³	Vol. WKF in mm³	Vol. WKF nach Revision in mm³									
1	1	21.821	7.386	20.576	5.74	26.745	2.119	251.557	247.2185	4.3385	8.3015	2.557	30.75	38	82	139	168	177					250	
5	1	35.236	5.656	27.389	4.859	19.056	12.346	233.631	229.9955	4.2355	11.7505	3.31	29.47	199	104	129	176	328					280	
14	1	40.184	4.593	22.246	5.252	27.311	3.754	267.215	255.6095	11.6115	14.1945	3.205	20.41	96	122	116	132	212					254	
15	1	24.041	7.506	19.567	11.931	12.278	14.609	266.6195	250.0805	16.539	15.893	1.569	9.53	200	93	125	133	325					226	
23	1	19.329	11.792	31.4	7.87	7.879	14.698	189.8775	181.172	8.7055	18.3975	2.514	14.7	40	77	81	96	121					173	
38	1	24.689	8.966	12.354	16.446	13.554	20.279	204.055	192.091	11.964	15.126	1.939	12.1	152	95	68	95	220					190	
42	1	17.107	12.338	12.163	10.201	21.153	10.413	239.986	232.9805	7.0055	14.551	2.82	20.19	226	213	76	62	302					275	
44	1	17.629	8.541	21.863	2.321	17.586	8.912	233.602	224.8055	8.7965	7.7595	1.051	10.54	178	98	50	94	228					192	
57	1	28.115	5.554	15.202	14.445	13.538	12.992	237.706	226.867	10.839	14.3615	2.85	16.22	87	66	88	75	175					141	
59	1	25.17	9.214	27.992	7.446	18.865	11.152	273.0385	263.2285	9.81	18.5525	6.459	36.01	171	112	58	93	229					205	
62	1	20.196	8.8	13.089	16.179	15.195	14.195	242.2765	232.4165	9.86	16.598	3.783	23.13	163	162	120	140	283					302	
75	1	17.988	7.695	20.175	7.539	13.53	9.903	261.9115	252.414	9.4975	12.924	0.41	2.89	139	255	99	78	238					333	
78	1	22.04	7.112	16.882	10.271	5.417	28.171	229.7425	220.962	8.7805	6.526	0.839	12.38	142	167	68	62	210					229	
86	1	21.219	7.568	12.666	14.324	13.482	8.146	304.679	297.0365	7.6425	21.0135	4.541	22.08	142	122	117	60	259					182	
2	2	23.919	9.009	19.804	7.616	25.562	7.782	254.547	249.866	4.681	10.7485	0.906	7.09	361	356	71	80	432					436	
3	2	14.041	11.515	21.35	10.034	12.833	12.394	261.2875	251.4245	9.863	14.9845	1.801	11.38	393	494	113	105	506					599	
16	2	25.05	4.686	12.278	10.016	14.758	6.424	255.626	252.212	3.414	14.783	1.065	7.48	126	255	240	87	366					342	
21	2	20.159	9.791	11.969	11.575	15.078	12.527	258.7785	255.774	3.0045	12.009	1.021	8.41	265	287	53	71	318					358	
22	2	20.208	9.895	14.65	10.805	7.127	13.016	292.7615	279.3555	13.404	19.421	1.298	6.66	256	198	122	120	378					318	
34	2	24.879	8.892	23.454	7.836	14.682	13.792	220.757	207.807	12.95	13.129	1.887	11.48	252	223	120	99	372					322	
37	2	16.48	11.723	23.036	10.93	8.82	23.398	246.9325	240.3805	6.552	16.9515	0.458	2.16	254	252	60	80	314					332	
60	2	26.708	6.323	20.047	10.987	20.118	10.888	260.942	254.49	6.452	12.2355	3.515	27.66	274	225	156	173	430					398	
67	2	18.793	10.234	17.016	12.553	23.134	10.183	266.3685	255.4955	10.873	8.271	0.998	11.08	114	116	58	71	172					187	
79	2	28.05	4.473	11.56	15.992	13.952	16.792	342.4775	321.358	21.1195	21.0965	1.001	4.47	162	210	138	137	200					347	
85	2	24.489	5.679	23.41	4.414	22.474	4.383	225.2665	218.61	6.6565	13.047	0.196	1.41	293	462	67	30	360					492	
87	2	26.446	4.319	23.239	6.759	12.069	8.925	212.8065	205.5605	7.246	11.5375	1.547	12.86	312	308	182	121	494					429	
88	2	27.281	6.528	45.674	1.853	35.862	5.112	183.484	179.58	3.904	15.278	1.55	10.51	365	107	95	123	460					230	
90	2	21.845	8.492	14.822	12.274	9.668	17.787	304.7125	290.407	14.3055	17.366	0.703	3.88	184	134	59	56	243					190	

Tab. 10.1 Übersicht der erfassten Krümmungswinkel und -radien, Volumina der Zahnhartsubstanz sowie Wurzelkanalfüllung und Arbeitszeiten

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. dent. Michael Hülsmann für die freundliche Überlassung des Themas. Weiterhin möchte ich mich bei Frau Dr. med. dent. Tina Rödiger für die engagierte und zuverlässige Betreuung und Unterstützung dieser Arbeit bedanken. Ein großer Dank gilt Herrn Dipl.-Phys. Christian Dullin aus der Abteilung Diagnostische Radiologie der Universitätsmedizin Göttingen für die Einweisung in das Micro-CT. Für die statistische Auswertung danke ich Herrn Dr. rer. nat. Frank Konietschke aus der Abteilung Medizinische Statistik der Universität Göttingen.