

Aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie
(Prof. Dr. med. dent. A. Wiegand)
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Effizienz von ProTaper-Universal-
Retreatment-Instrumenten für die
Entfernung thermoplastischer
Guttapercha aus gekrümmten
Wurzelkanälen
- Eine Mikro-CT-Studie**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Johanna Wagner

aus

Essen

Göttingen 2019

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

Betreuungsausschuss

Betreuerin Priv.-Doz. Dr. med. dent. T. Rödiger

Ko-Betreuer: Priv.-Doz. Dr. med. dent. W. Hahn

Prüfungskommission

Referent/in Priv.-Doz. Dr. med. dent. T. Rödiger

Ko-Referent/in: Priv.-Doz. Dr. med. dent. W. Hahn

Promotor: Prof. Dr. med. M. Oppermann

Datum der mündlichen Prüfung: 12.11.2019

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel "Effizienz von ProTaper-Universal-Retreatment-Instrumenten für die Entfernung thermoplastischer Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen - Eine Mikro-CT-Studie" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den

.....
(Unterschrift)

Diese Promotionsschrift ist die Grundlage für folgende Publikation:

Rödig T, Wagner J, Wiegand A, Rizk M (2018):

Efficacy of the ProTaper retreatment system in removing Thermafil, GuttaCore or vertically compacted gutta-percha from curved root canals assessed by micro-CT

Int Endod J 51, 808-815

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
2 Ziel der Untersuchung.....	3
3 Literaturübersicht	4
3.1 Ziele und Prognosen einer Wurzelkanalbehandlung.....	4
3.2 Misserfolge von Wurzelkanalbehandlungen	6
3.3 Techniken und Materialien für die Wurzelkanalfüllung.....	7
3.3.1 Kalte Fülltechniken.....	8
3.3.2 Warme Fülltechniken.....	9
3.4 Indikationen und Prognosen von Revisionen	12
3.4.1 Revision mit Handinstrumenten.....	14
3.4.2 Revision mit ProTaper Next und ProTaper Universal Retreatment	15
3.4.3 Einsatz von Lösungsmitteln	18
3.5 Komplikationen bei Revisionen.....	19
3.6 Mikro-Computertomografie	20
3.6.1 Aufbau des Mikro-CTs.....	20
3.6.2 Verwendung des Mikro-CTs in der Endodontologie.....	24
4 Material und Methoden	26
4.1 Auswahl der Zähne und Präparation der Wurzelkanäle	26
4.2 Revision.....	32
4.3 Mikro-CT.....	34
4.4 Volumetrie.....	35
4.5 Statistische Auswertung.....	36
5 Ergebnisse.....	37
5.1 Verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial.....	37
5.2 Dentinabtrag.....	39
5.3 Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1).....	40
5.4 Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2).....	41
5.5 Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung (Tgesamt).....	42
5.6 Zwischenfälle	43

6	Diskussion.....	45
6.1	Diskussion der Methode	45
6.1.1	Gruppeneinteilung.....	45
6.1.2	Revision.....	46
6.1.3	Berechnung des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials und des Dentinabtrags.....	47
6.2	Diskussion der Ergebnisse.....	50
6.2.1	Verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial.....	50
6.2.2	Zahnhartsubstanzverlust	51
6.2.3	Arbeitszeit.....	52
6.2.4	Prozedurale Fehler	53
7	Schlussfolgerungen	56
8	Zusammenfassung.....	57
9	Anhang	58
9.1	Materialliste.....	58
10	Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Mikro-CTs	21
Abbildung 2: Zweidimensionale Darstellung einer Wurzel.....	21
Abbildung 3: Dreidimensionale Darstellung einer Wurzel.....	22
Abbildung 4: Mikro-CT SkyScan 1272 und zugehöriger Bildschirmarbeitsplatz.....	23
Abbildung 5: Zahn in bucco-oraler und mesio-distaler Richtung.....	27
Abbildung 6: Sequenz der ProFile-Instrumente entsprechend dem Präparationsprotokoll mit eingestellter Arbeitslänge	29
Abbildung 7: Trägerbasierte Füllmethoden.....	31
Abbildung 8: BeFill 2in1 für die Füllmethode der warmen vertikalen Kompaktion.....	32
Abbildung 9: Sequenz der Revisionsinstrumente ProTaper Universal Retreatment D1-D3 und der ProTaper-Next-Instrumente X2-X4 mit eingestellter Arbeitslänge entsprechend dem Revisionsprotokoll.....	33
Abbildung 10: Dreidimensionale Darstellung eines prä- und postoperativen Scans mit rot eingefärbtem Wurzelkanalfüllungsmaterial.....	36
Abbildung 11: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste (in %) nach der Revision	37
Abbildung 12: Ermittlung der Effektivität der Revision durch Beurteilung des nach der Revision im Wurzelkanal verbliebenen Füllmaterials GuttaCore beispielhaft in Form von dreidimensionalen Bildern dargestellt.....	38
Abbildung 13: Ermittlung der Effektivität der Revision durch Beurteilung des nach der Revision im Wurzelkanal verbliebenen Füllmaterials Thermafil beispielhaft in Form von dreidimensionalen Bildern dargestellt.....	38
Abbildung 14: Boxplot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags während der Revision	39
Abbildung 15: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T1 bis zum Erreichen der Arbeitslänge	40
Abbildung 16: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T2 bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung und der apikalen Präparation bis zum Instrument X4.....	41
Abbildung 17: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Zeit Tgesamt für die gesamte Revisionsbehandlung.....	42
Abbildung 18: Lateral perforierte Wurzel.....	43
Abbildung 19: Deformiertes Instrument D3	44
Abbildung 20: Apikal extrudierter Debris	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Proben	26
Tabelle 2: Standardisiertes Protokoll für die maschinelle Präparation der Wurzelkanäle.....	29
Tabelle 3: Mittelwerte und Homogenität der Gruppen in Bezug auf die Krümmungswinkel und -radien mit dem Kruskal-Wallis-Test ermittelt.....	30
Tabelle 4: Standardisiertes Revisionsprotokoll	33

Abkürzungsverzeichnis

AL	Arbeitslänge
bo	bukko-oral
CCD-Kamera	<i>Charge-Coupled-Device-Kamera</i>
CT	Computertomograf
GC	GuttaCore
md	mesio-distal
Mikro-CT	Mikro-Computertomograf
PTUR	ProTaper Universal Retreatment
ROI	<i>Region of Interest</i>
TF	Thermafil
WVK	Warme vertikale Kompaktion

1 Einleitung

Eine Wurzelkanalbehandlung ist indiziert, wenn das Gefäß-Nervenbündel eines Zahns, also die Pulpa, symptomatisch oder asymptomatisch irreversibel geschädigt oder nekrotisch ist und/oder eine apikale Parodontitis vorliegt. Diese Zustände werden in der Regel durch eine tiefe Karies oder ein Trauma verursacht.

Die Therapie besteht darin, das erkrankte Gewebe zu entfernen, den Kanal mechanisch und chemisch zu reinigen, mit Guttapercha und Sealer zu obturieren und die Zugangskavität bakteriendicht zu verschließen.

Sollten auch einige Zeit nach der Wurzelkanalbehandlung noch Symptome bestehen oder das periapikale Gewebe keine Anzeichen von Heilung zeigen, ist eine Revision der Wurzelkanalbehandlung indiziert.

Bei ordnungsgemäßer Durchführung liegen die Erfolgswahrscheinlichkeiten primärer Wurzelkanalbehandlungen bei über 80% (Kerekes und Tronstad 1979; Friedman 2002; Ng et al. 2011b). Ein Misserfolg dieser primären Wurzelkanalbehandlung kann nach 4-5 Jahren röntgenologisch und klinisch diagnostiziert werden (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006). Einer der Hauptgründe für das Versagen einer primären Wurzelkanalbehandlung sind im Kanal persistierende Mikroorganismen, entweder durch unzureichende Reinigung während der Primärbehandlung oder durch Reinfektion des Kanalsystems nach Abschluss der Primärbehandlung (Nair et al. 1990; Lin et al. 1992).

Das Ziel einer Revisionsbehandlung ist es dann, diese Bakterien durch erneute Säuberung und Desinfektion des Wurzelkanalsystems zu eliminieren. Um dies zu erreichen, sollte das primäre Füllmaterial möglichst umfassend entfernt werden, um das Kanalsystem gängig zu machen und zu desinfizieren (Nair 2006).

Im Allgemeinen wird zwischen kalten und warmen Techniken für die Wurzelkanalfüllung unterschieden. Die kalte laterale Kompaktion von Guttapercha wird als der Goldstandard der Wurzelkanalfüllung angesehen (Peng et al. 2007). Sie ist relativ wenig techniksensitiv, kostengünstig und ermöglicht eine permanente Längenkontrolle während des Füllvorgangs (Levitan et al. 2003). Das Auftreten von Inhomogenitäten innerhalb der Wurzelkanalfüllung ist jedoch signifikant höher als bei warmen Füllmethoden (Li et al. 2014).

Bei den warmen Fülltechniken unterscheidet man zwischen trägerbasierten und nicht-trägerbasierten Methoden. Die beiden gängigsten Produkte für die Durchführung einer trägerbasierten Wurzelkanalfüllung sind Thermafil und GuttaCore (Dentsply Sirona, Tulsa, OK, USA).

Bei der Verwendung warmer Fülltechniken wird die Guttapercha plastifiziert. Somit kann eine Wurzelfüllung mit weniger Inhomogenitäten erreicht werden als bei kalten Füllmethoden (Li et al. 2014; Schäfer et al. 2016). Warme Fülltechniken zeigen jedoch ein höheres Risiko für das Überpressen von Füllmaterial in das periapikale Gewebe (Clinton und Van Himel 2001; Peng et al. 2007).

Zur Entfernung des Füllmaterials stehen verschiedene maschinelle und manuelle Techniken und Systeme zur Verfügung. In vorangegangenen Revisionsstudien wurden häufig maschinelle Nickel-Titan-(NiTi)-Instrumente mit Edelstahl-Handfeilen in Bezug auf die Arbeitszeiten und die Effektivität der Feilen verglichen, wobei unterschiedliche Ergebnisse beobachtet wurden (Hülsmann und Stotz 1997; Barrieshi-Nusair 2002; Gergi und Sabbagh 2007; Barletta et al. 2008; Çelik Ünal et al. 2009; Kfir et al. 2012; Rödiger et al. 2012, 2014b; Delai et al. 2018).

In vielen Studien wurden die Revisionsbehandlungen an geraden Kanälen durchgeführt (Hülsmann und Stotz 1997; Hülsmann und Bluhm 2004; Gu et al. 2008; Hammad et al. 2008; Somma et al. 2008; Roggendorf et al. 2010; Kfir et al. 2012; Yürüker et al. 2016). Jedoch spiegeln gerade Kanäle das häufig sehr komplexe Wurzelkanalsystem von Zähnen mit mehreren Kanälen nicht wider (Duncan und Chong 2010). Deshalb wurden in den letzten Jahren vermehrt Revisionsstudien an gekrümmten Wurzelkanälen durchgeführt (Barletta et al. 2007; Gergi und Sabbagh 2007; Dall’Agnol et al. 2008; Çelik Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012, 2014a, b; Teles Rodrigues et al. 2016; Özyürek und Özsezer-Demiryürek 2017).

Zur Beurteilung einer Wurzelkanal- und Revisionsbehandlung wird am Patienten in der Regel ein konventionelles Röntgenbild angefertigt. Die Zuhilfenahme eines Mikroskops kann die Revisionsbehandlung verbessern, indem es eine Detektion verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials ermöglicht, das auf konventionellen Röntgenbildern nicht zu sehen ist (Schirrmester et al. 2006a; Kfir et al. 2012). In der Forschung hat sich die Verwendung eines Mikro-Computertomografen (Mikro-CT) zur Beurteilung einer Revisionsbehandlung etabliert, da Reste von Füllmaterial und Zahnhartsubstanzabträge non-invasiv und dreidimensional beurteilt werden können (Barletta et al. 2007, 2008; Dall’Agnol et al. 2008; Ma et al. 2012; Rödiger et al. 2012, 2014b; Nevares et al. 2016; Martins et al. 2017).

2 Ziel der Untersuchung

Das Ziel dieser Mikro-CT-Studie war die Ermittlung der Revidierbarkeit der trägerbasierten Wurzelkanalfüllmaterialien Thermafil und GuttaCore (Dentsply Sirona) und der nicht-trägerbasierten vertikalen Kompaktion warmer plastischer Guttapercha aus gekrümmten Kanälen. Die Revisionsbehandlung wurde mit dem maschinellen NiTi-System ProTaper Universal Retreatment (PTUR), ergänzt von ProTaper Next (Dentsply Sirona), durchgeführt. Es wurden folgende Parameter untersucht:

- die Menge des nach der Revision im Wurzelkanal verbliebenen Füllmaterials
- der im Rahmen der Revision stattgefundene Dentinabtrag
- die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)
- die Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2)
- die Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung (Tgesamt)
- prozedurale Fehler

3 Literaturübersicht

3.1 Ziele und Prognosen einer Wurzelkanalbehandlung

Die Endodontologie beschäftigt sich mit Form, Funktion und Gesundheit der Pulpa und der periapikalen Gewebe (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006). Dabei ist das Ziel einer endodontischen Behandlung, eine Erkrankung der periapikalen Gewebe (apikale Parodontitis) zu verhindern oder zu heilen.

Eine apikale Parodontitis entsteht dadurch, dass Mikroorganismen in das Kanalsystem eindringen. Diese Mikroorganismen und ihre Endotoxine führen zu einer entzündlichen Reaktion der periapikalen Gewebe, während die im Wurzelkanalsystem angesiedelten Mikroorganismen vom Immunsystem nicht erreicht werden können (Kakehashi et al. 1965; Byström et al. 1987; Nair 1997, 2004; Dalton et al. 1998). Für eine erfolgreiche Therapie muss die Anzahl der intrakanalären Mikroorganismen reduziert und ihr Wiedereintritt in das Kanalsystem verhindert werden (Weiger et al. 2000).

Eine Wurzelkanalbehandlung besteht grundsätzlich aus einer Entfernung des irreversibel entzündeten oder infizierten Pulpagewebes, einer mechanischen und chemischen Reinigung sowie dem dichten Verschluss des Wurzelkanalsystems. Darüber hinaus muss eine bakteriendichte koronale Restauration der Zahnkrone erfolgen, um eine Reinfektion des Endodonts zu verhindern (Hall 1930; Saunders und Saunders 1994; Siqueira 2001). In vielen Studien wird bei der Beurteilung des Behandlungsergebnisses zwischen vollständiger klinischer und radiologischer Heilung (strenge Kriterien) und Funktionstüchtigkeit (weniger strenge Kriterien), also einer asymptomatischen, röntgenologisch jedoch noch erkennbaren apikalen Parodontitis, unterschieden. Die Behandlungsergebnisse für eine endodontische Primärbehandlung liegen bei 79-91% Erfolg nach 5-19 Jahren bei strengen Kriterien (Kerekes und Tronstad 1979; Pirani et al. 2015) und 86-98% Funktionstüchtigkeit nach 1-10 Jahren bei weniger strengen Kriterien (Lazarski et al. 2001; Ng et al. 2011b; Burry et al. 2016).

In einer prospektiven klinischen Studie wurde eine vollständige Heilung der periapikalen Gewebe bei 91,3% der Fälle innerhalb der ersten 2 Jahre nach der Primärbehandlung erreicht. Bei 4,9% der behandelten Zähne dauerte die Zeit bis zur Heilung länger als drei Jahre (Ng et al. 2011a).

In einer retrospektiven klinischen Studie wurde die Funktionstüchtigkeit endodontisch behandelter Zähne mit insgesamt 89,66% der Fälle angegeben. Dabei zeigte sich ein signifikanter Unterschied in der Funktionstüchtigkeit von Fällen mit präoperativer apikaler Parodontitis (82,91%) und Fällen ohne präoperative apikale Parodontitis (94,22%). Ebenfalls signifikante Unterschiede wurden in Bezug auf die Länge der Wurzelkanalfüllung beobachtet. In das periapikale Gewebe überpresste Wurzelkanalfüllungen reduzierten die Funktionstüchtigkeit des Zahnes im Vergleich zu kurzen oder apikal abschließenden Füllungen signifikant (Swartz et al. 1983).

Anhand dieser Vergleiche wird deutlich, dass bei der prognostischen Beurteilung einer endodontischen Behandlung verschiedene Faktoren berücksichtigt werden müssen, die das Ergebnis der Behandlung signifikant verbessern können (Ng et al. 2011a):

1. Abwesenheit einer präoperativen periapikalen Läsion,
2. Beim Vorhandensein einer periapikalen Läsion verbessert sich die Prognose mit abnehmender Größe der Läsion,
3. Abwesenheit eines präoperativen Fistelgangs,
4. Durchgängigkeit des Kanalsystems für Instrumente bis zum Apex,
5. Chemo-mechanische Reinigung des Kanals bis zum Apex,
6. Chemische Desinfektion mit Natriumhypochlorit ohne Ergänzung von Chlorhexidin,
7. Abwesenheit von Wurzel- oder Zahnperforationen,
8. Kein Überpressen von Füllmaterialien über den Apex und
9. Suffiziente koronale Restauration nach Abschluss der endodontischen Behandlung.

Diese prognostischen Faktoren wurden genauer untersucht und in prä-, intra- und postoperative Faktoren unterteilt. Als signifikante präoperative Faktoren wurden das Vorhandensein tiefer parodontaler Taschen über 5 mm, Schmerzen vor allem in den ersten 22 Monaten und das Auftreten eines Fistelgangs identifiziert. Als intraoperative Faktoren gelten iatrogene Perforationen, die fehlende Durchgängigkeit des Kanalsystems nach apikal und Überpressen von Füllmaterial. Postoperativ beeinflussen sowohl die koronale Restauration nach Abschluss der Wurzelkanalbehandlung, das Vorhandensein proximaler Kontakte auf beiden Seiten als auch die Lokalisation des Zahnes die Prognose eines endodontisch behandelten Zahnes (Ng et al. 2011b).

Weiterhin besitzt auch die apikale Ausdehnung der Wurzelkanalfüllung einen Einfluss auf die Prognose. Zähne mit bis zum Apex reichenden Wurzelkanalfüllungen weisen eine höhere Erfolgswahrscheinlichkeit auf als Zähne mit Wurzelfüllungen, die mehr als 2 mm zu kurz sind (Sjögren et al. 1990; Smith et al. 1993) oder Zähne mit über den Apex hinaus überpressen Wurzelkanalfüllungen (Seltzer et al. 1963; Bender et al. 1964; Engstrom und Frostell 1964; Swartz et al. 1983; Sjögren et al. 1990; Smith et al. 1993). Darüber hinaus zeigen mehr als 2 mm zu kurze Wurzelkanalfüllungen eine signifikant bessere Erfolgswahrscheinlichkeit als über den Apex extendierte Füllungen (Seltzer et al. 1963; Bender et al. 1964; Engstrom und Frostell 1964; Swartz et al. 1983).

Die Mehrzahl der Untersuchungen belegt jedoch eindeutig, dass die Abwesenheit einer präoperativen periapikalen Läsion als der entscheidende Faktor für eine gute Prognose einer endodontischen Behandlung gilt (Engstrom und Frostell 1964; Kerekes und Tronstad 1979; Sjögren et al. 1990; Lin et al. 1992; Hoskinson et al. 2002; Molven et al. 2002).

Ob die Größe der apikalen Läsion immer eine Rolle spielt, ist unklar. So wurden in manchen Studien bei Zähnen mit Läsionen kleiner als 5 mm bzw. kleiner als 2 mm signifikant höhere Erfolgchancen beobachtet als bei größeren Läsionen (Matsumoto et al. 1987; Friedman et al. 1995; Hoskinson et al. 2002), während in einer anderen Studie keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Läsionen mit einem Durchmesser unter und über 5 mm gefunden wurden (Sjögren et al. 1990).

Zusammenfassend sollte die klinische und röntgenologische Nachkontrolle von Wurzelkanalbehandlungen über einen Zeitraum von mindestens vier Jahren durchgeführt werden, um eine abschließende Bewertung über den Erfolg der Therapie geben zu können (Weiger et al. 2000; Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006).

3.2 Misserfolge von Wurzelkanalbehandlungen

Ein endodontischer Misserfolg liegt vor, wenn der Zahn klinische Symptome einer Infektion aufweist und/oder eine radiologische Vergrößerung der apikalen Läsion vorliegt. Darüber hinaus führt eine nicht nachweisbare Verkleinerung der apikalen Läsion und/oder Anzeichen einer weiter fortschreitenden Wurzelresorption nach mindestens vier Jahren dazu, dass die vorangegangene Behandlung als Misserfolg eingestuft wird (Weiger et al. 2000; Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006).

Die Ursachen für einen solchen endodontischen Misserfolg liegen zu 20,3% im Bereich der Prothetik, zu 16,6% im Bereich der Endodontologie und zu 4,5% im Bereich der Parodontologie. Weitere Ursachen sind u.a. tiefe Karies oder Zahnfrakturen (14,7%). Die häufigste Ursache ist jedoch ein zeitgleiches prothetisches und endodontisches Versagen (43,9%) (Olcay et al. 2018).

Die endodontisch bedingten Gründe für einen Misserfolg können weiter differenziert werden: koronales Leakage (30,4%), ungefüllter Kanal (19,7%), zu kurze Wurzelkanalfüllung (14,2%), anatomische Komplexität des Wurzelkanalsystems (8,7%), apikale Extrusion von Wurzelkanalfüllungsmaterial (3,0%), iatrogene Probleme (2,8%) und apikale Risse (1,2%) (Song et al. 2011).

Diese Auslöser begünstigen die Persistenz einer mikrobiellen Infektion, die als einer der entscheidenden Faktoren für einen Misserfolg der endodontischen Behandlung angesehen wird (Lin et al. 1992; Siqueira 2001; Nair 2004; Tabassum und Khan 2016).

Der Faktor der persistierenden mikrobiellen Infektion ist deshalb so wichtig, weil eine apikale Parodontitis nicht ohne die Anwesenheit intrakanalärer Mikroorganismen entstehen kann (Kakehashi et al. 1965; Lin et al. 1992). Eine apikale Parodontitis ist eine lokalisierte periradikuläre Immunantwort auf intrakanaläre Mikroorganismen und deren Endotoxine. Durch diese vom Immunsystem ausgelöste Entzündungsreaktion werden Entzündungsmediatoren, entzündungsfördernde Zytokine und Wachstumsfaktoren ausgeschüttet, die zu Knochenresorption und Gewebszerstörung führen (Márton und Kiss 2014).

In Kanälen mit präoperativer apikaler Parodontitis werden signifikant häufiger (80%) Bakterien gefunden als in Zähnen ohne (20%) und Zähne mit einer präoperativen apikalen Parodontitis weisen eine signifikant höhere Misserfolgsrate auf (71%) als Zähne ohne präoperative apikale Parodontitis (29%) (Lin et al. 2005).

Die Gründe für eine Persistenz von Mikroorganismen können vielseitig sein: So werden inadäquates Debridement oder ein unvollständiger Kanalverschluss (Lin et al. 1992), unbehandelte Haupt- oder Nebenkanäle (Tabassum und Khan 2016), schlechte Qualität der Wurzelkanalfüllung (Tronstad et al. 2000), inadäquate Asepsis, zu geringes Ausmaß der Zugangskavität, unvollständige Instrumentierung sowie undichte temporäre oder definitive Füllungen (Sundqvist et al. 1998) oder nicht adäquate Kronenversorgungen (Molven et al. 2002) genannt.

Ein Faktor, der zu einem Misserfolg beitragen kann, ist eine deutlich zu kurze oder zu lange Wurzelkanalfüllung. Als akzeptabel werden Füllungen angesehen, die sich 0-2 mm vom röntgenologischen Apex entfernt innerhalb des Kanals befinden (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006).

In einer retrospektiven klinischen Studie wurde ein signifikanter Unterschied in Bezug auf das Vorkommen einer apikalen Parodontitis zwischen Kanälen mit akzeptabler Füllungs-länge und zu lang oder zu kurz gefüllten Kanälen festgestellt (Hommez et al. 2002). 27,2% der Kanäle mit akzeptabler Fülltiefe zeigten dabei eine apikale Parodontitis, während 36,4% der nicht akzeptabel, also zu kurz oder zu lang gefüllten Kanäle, eine apikale Entzündung aufwiesen. Bei den als Misserfolg eingestuften Zähnen wurden bei 46,9% der Zähne zu kurze und bei 13% der Zähne zu lange Wurzelkanalfüllungen festgestellt (Akbar 2015).

Auch Instrumentenfrakturen begünstigen die Persistenz einer intrakanalären Infektion. Ein im Kanal abgebrochenes Instrument erhöht zwar das Risiko für einen Misserfolg, weil der Kanalabschnitt apikal des Instruments nicht mehr adäquat gereinigt werden kann, jedoch führt auch hier wieder eine mikrobielle Infektion eher als das Instrument selbst zum Misserfolg (Lin et al. 2005; Tabassum und Khan 2016).

3.3 Techniken und Materialien für die Wurzelkanalfüllung

Ein wichtiger Teil der erfolgreichen endodontischen Behandlung ist die dreidimensionale Obturation des Kanals bis zur Arbeitslänge (Schilder 1967), denn eine adäquate Versiegelung des Kanals ist ein entscheidender Faktor für die Langzeitprognose des Zahns (Kerekes und Tronstad 1979; Ng et al. 2008; Song et al. 2011; Tabassum und Khan 2016).

An eine ideale Wurzelkanalfüllung werden dafür folgende Ansprüche gestellt: Sie versiegelt alle Foramina, ist gut kompaktiert, an die Kanalwände adaptiert und endet an der apikalen Konstriktion (Michanowicz et al. 1989; Leduc und Fishelberg 2003).

Als Material für eine Wurzelkanalfüllung wird weitestgehend Guttapercha, das natürlich vorkommende Polymer des Isopren (Goodman et al. 1974), genutzt. Guttapercha ist biokompatibel, dimensionsstabil, bei Erhitzung plastisch, kompaktierbar und einfach zu revidieren (Schilder 1967).

Guttapercha tritt in zwei verschiedenen kristallinen Formen auf, der alpha- und der beta-Form. Grundsätzlich wird für warme Fülltechniken alpha- und bei kalten Fülltechniken beta-Guttapercha verwendet.

Wird die alpha-Form auf über 65 °C erhitzt, wird sie amorph und schmilzt. Wird sie dann sehr langsam abgekühlt (0,5 °C/h), bleibt die alpha-Form bestehen und kristallisiert wieder. Wird sie jedoch schnell abgekühlt, wie es bei der Wurzelkanalbehandlung am Patienten der Fall ist, kristallisiert sich die beta-Form (Bunn 1942), was zu unumkehrbaren Volumenveränderungen führt (Goodman et al. 1974).

Kalte und warme Fülltechniken erfordern zusätzlich die Verwendung eines Sealers, der auf die Kanalwände aufgetragen wird. Der Sealer kann Irregularitäten der Kanalwand und der Kanalmorphologie ausgleichen und kleine akzessorische Kanäle füllen, sodass die Homogenität der Wurzelkanalfüllung gesteigert wird (Wu et al. 2000; Kebudi Benezra et al. 2018). Jedoch ist zu beachten, dass Sealer in der Regel nicht volumenstabil sind (Resende et al. 2009; Sonntag et al. 2015).

Einige Modifikationen der warmen und kalten Techniken werden im Folgenden vorgestellt.

3.3.1 Kalte Fülltechniken

3.3.1.1 Einstifttechnik

Bei der Einstifttechnik wird ein genormter Guttapercha-Stift in der Größe der letzten, auf Arbeitslänge verwendeten Feile, zusammen mit Sealer in den Wurzelkanal eingebracht. Diese Technik ist signifikant schneller als andere kalte Fülltechniken, vor allem als die kalte laterale Kompaktion (Gordon et al. 2005; Schäfer et al. 2011), bringt aber auch einige Nachteile mit sich. So ist der Anteil der formstabilen Guttapercha (Schilder 1967) in der Wurzelkanalfüllung signifikant geringer und der Anteil des nicht-formstabilen Sealers deutlich höher als bei anderen Füllmethoden (Kontakiotis et al. 1997; Schäfer et al. 2011, 2016; Neuhäus et al. 2016).

Der durchschnittliche Anteil der mit Guttapercha gefüllten Teile des Kanals liegt für die Einstifttechnik bei 61,1-83,6%, während er für kalte laterale Kompaktion und warme vertikale Kompaktion zwischen 76,2% und 93,4% liegt (Schäfer et al. 2011). Der Anteil an Poren und Blasen in der Sealerfuge ist bei der Einstifttechnik signifikant höher als bei anderen Fülltechniken (Mokhtari et al. 2015; Krug et al. 2017). Im Gegensatz dazu fanden Schäfer et al. (2011) keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das Vorkommen von Blasen und Poren zwischen Einstifttechnik, kalter lateraler und warmer vertikaler Kompaktion.

Es herrscht überwiegende Einigkeit, dass die Einstifttechnik durch den großen Anteil nicht-formstabilen Sealers der kalten lateralen Kompaktion in Bezug auf den prozentualen Anteil von Guttapercha unterlegen ist (Kontakiotis et al. 1997; Robberecht et al. 2012; Neuhaus et al. 2016; Krug et al. 2017) und es wird geraten, sie nur in runden Kanälen mit zirkulärer Präparation zu nutzen (Mokhtari et al. 2015).

3.3.1.2 Laterale Kompaktion

Die laterale Kompaktion kalter Guttapercha ist die am häufigsten gelehrt Methode der Wurzelkanalfüllung (Tennert et al. 2013) und der Goldstandard der kalten Füllmethoden (Peng et al. 2007). Hierbei wird ein apikal passgenauer Guttapercha-Stift in den Kanal eingeführt, der mithilfe eines Spreaders an die Kanalwand kompaktiert wird. Der Kanal wird dann mit akzessorischen, ebenfalls an die Kanalwand kompaktierten Guttapercha-Stiften und Sealer nach koronal aufgefüllt.

Diese Füllmethode ist wenig techniksensitiv, kostengünstig und ermöglicht eine permanente Längenkontrolle beim Einbringen des Wurzelkanalfüllmaterials (Levitan et al. 2003). Dementsprechend werden signifikant geringere Überpressungen von Füllmaterial bei der kalten lateralen Kompaktion im Vergleich zu warmen Füllmethoden beobachtet (Peng et al. 2007; Kandemir Demirci und Çalışkan 2016; Krug et al. 2017).

Als Nachteile dieser Fülltechnik werden u. a. das Auftreten von Blasen und Poren in der Wurzelkanalfüllung angegeben (Li et al. 2014), wodurch sich die Dichte der Wurzelkanalfüllung verringert (Ho et al. 2016; Krug et al. 2017). Zudem ist die Technik eine relativ zeitaufwändige Füllmethode (Gordon et al. 2005).

3.3.2 Warme Fülltechniken

Bei den warmen Fülltechniken gibt es einen Unterschied zwischen trägerbasierten und nicht-trägerbasierten Fülltechniken.

3.3.2.1 Trägerbasierte Techniken

Bei den trägerbasierten Systemen werden solche mit Kunststoffträger (Thermafil (Dentsply Sirona)) und Systeme mit Guttaperchaträger (GuttaCore (Dentsply Sirona), GuttaFusion (VDW, München)) voneinander unterschieden.

Die Thermafil-Träger bis Größe 40 bestehen aus *liquid crystal polymer* und sind von alpha-Guttapercha ummantelt (Dentsply 1995a), die der Größe 45-140 bestehen aus Polysulfonen und alpha-Guttapercha (Dentsply 1995b). GuttaCore und GuttaFusion verfügen über einen Kern aus kreuzvernetzter Guttapercha und einer Ummantelung aus alpha-Guttapercha (Dentsply 2012).

3.3.2.1.1 GuttaCore

Die Homogenität von Wurzelkanalbehandlungen mit GuttaCore wird kontrovers diskutiert. So traten in Studien signifikant weniger Blasen und Poren in der Wurzelkanalfüllung auf als bei kalten Fülltechniken (Li et al. 2014; Schäfer et al. 2016). In einer Studie war eine vollständige Blasenfreiheit der Wurzelkanalfüllung mit dieser Methode nicht möglich (Li et al. 2014), während in der anderen Studie 96,88%-100% aller mit GuttaCore und GuttaFusion gefüllten Proben eine blasenlose Wurzelkanalfüllung aufwiesen (Schäfer et al. 2016).

Verglichen miteinander zeigen GuttaCore, GuttaFusion und die warme vertikale Kompaktion keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Homogenität der Wurzelkanalfüllung (Zogheib et al. 2016).

Im Vergleich zu Thermafil geht man davon aus, dass die flexiblen Guttapercha-Träger von GuttaCore/GuttaFusion sich besser an die Anatomie vor allem gekrümmter Kanäle anpassen. Der starre Thermafil-Träger führt dazu, dass der Kunststoff die Kanalwände in 80% der Proben einer Studie berührt (Neuhaus et al. 2016).

Generell ist die Gefahr des Überpressens von Wurzelkanalfüllmaterial in die periapikalen Gewebe bei der Verwendung von warmen Fülltechniken signifikant höher ist als bei kalter lateraler Kompaktion (Clinton und Van Himel 2001; Peng et al. 2007). Bei der Verwendung von GuttaCore scheint die Präparationstechnik einen Einfluss auf diese Gefahr zu haben: So ist das Risiko des Überpressens signifikant geringer, wenn das für die Kanalpräparation verwendete Instrument an seiner Spitze verschiedene Konizitäten aufweist als ein Instrument, das eine einheitliche Konizität besitzt (Whitten und Levitan 2015).

3.3.2.1.2 Thermafil

Für Wurzelkanalfüllungen mit Thermafil ist eine gute Adaptation an die Kanalwände, vor allem im apikalen Teil der Wurzel, belegt (Li et al. 2014; Neuhaus et al. 2016). Limitationen bestehen in einer blasenfreien Obturation ovaler Kanäle (De-Deus et al. 2008). Die Anzahl der Blasen ist allerdings signifikant geringer als bei der Verwendung der kalten lateralen Kompaktion (Clinton und Van Himel 2001; De-Deus et al. 2008). Auch bei einer Wurzelkanalfüllung mit Thermafil stellen Überpressungen von Füllmaterial ein potentielles Problem dar (Clinton und Van Himel 2001; Da Silva et al. 2002; Tennert et al. 2013).

Aufgrund des kunststoffbasierten Trägers ist die Präparation für einen Wurzelkanalstift erschwert und es treten signifikant häufiger Abweichungen vom Kanalverlauf auf als bei GuttaCore (Schroeder et al. 2017).

Bei der Revision von Thermafil kann die Entfernung des Plastikträgers ebenfalls ein Problem darstellen. Die Revision mithilfe einer Wärmequelle kann sich als nützlich erweisen, da so der Plastikträger erweicht wird und schneller entfernt werden kann (Wolcott et al. 1999).

3.3.2.2 Warme vertikale Kompaktion

Die vertikale Kompaktion warmer Guttapercha wurde erstmalig von Schilder (1967) beschrieben. Bei dieser Technik wird zunächst ein Hauptstift aus alpha-Guttapercha zusammen mit Sealer in den Kanal eingebracht. Dieser Guttapercha-Stift wird anschließend mithilfe eines Hitzeträgers portionsweise abgetrennt und nach apikal verdichtet (*downpack*). Auf diesen apikalen Guttapercheteil werden in mehreren Schritten kleine Portionen erwärmter, fließfähiger Guttapercha injiziert und mit kalten Pluggern nach koronal verdichtet (*backfill*). Diese Technik wurde von Buchanan (1994) modifiziert und als *continuous wave*-Technik beschrieben. Im Gegensatz zu der ursprünglichen warmen vertikalen Kompaktion, bei der das *downpack* in 3-4 Erwärmungs- und Kondensationszyklen erfolgte, wird bei der *continuous wave*-Technik die Erwärmung und Kompaktion mit einem hitzefähigen Instrument in einem Schritt durchgeführt. Dadurch wird die thermoplastische Guttapercha vor allem nach lateral und koronal gepresst. Laterale Kanäle und Foramina werden häufiger gefüllt als bei der Nutzung anderer Techniken, zum Beispiel der ursprünglichen warmen vertikalen Kompaktion und der kalten lateralen Kompaktion (Schilder 1967; DuLac et al. 1999).

In Bezug auf apikales Leakage besteht keine einheitliche Meinung. In einer Studie wird die apikale Dichtigkeit der warmen vertikalen Kompaktion in Form der *continuous wave*-Technik im Vergleich zu einer Einstifttechnik als signifikant überlegen bezeichnet (Robberecht et al. 2012). Eine andere Studie stellte keinen signifikanten Unterschied zur kalten lateralen Kompaktion und zur Einstifttechnik fest (Cueva-Goig et al. 2016). Weitere Studien finden gerade den apikalen Bereich der Wurzelkanalfüllung oft unvollständig gefüllt (Ho et al. 2016) bzw. kalte Füllmethoden den warmen Füllmethoden in Bezug auf Blasen und Hohlräume im apikalen Bereich des Wurzelkanals überlegen (Gok et al. 2017).

Auch bei der warmen vertikalen Kompaktion besteht die Gefahr des Überpressens von Wurzelkanalfüllmaterial. Im Vergleich zu einer kalten Einstifttechnik mit angepasstem Guttapercha-Stift wurde signifikant mehr apikal extrudiertes Material bei der Anwendung der warmen vertikalen Kompaktion beobachtet (Schäfer et al. 2011). Im Vergleich zu Thermafil (80% Überpressung) wurden bei der warmen vertikalen Kompaktion jedoch deutlich weniger Überpressungen beobachtet (42%) (Tennert et al. 2013). Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass ein kontrolliertes Einbringen der erwärmten und verflüssigten Thermafil-Guttapercha schwierig ist, während bei der warmen vertikalen Kompaktion der apikale Anteil der Guttapercha nicht erwärmt wird und somit seine Form behält.

Allerdings wird für die warme vertikale Kompaktion signifikant mehr Zeit als für die kalte laterale Kompaktion und die Einstifttechnik benötigt (Keçeci et al. 2005; Schäfer et al. 2011).

Mithilfe einer Meta-Analyse wurden die klinischen Ergebnisse von mit kalter lateraler Kompaktion oder warmen Fülltechniken durchgeführten Wurzelkanalbehandlungen betrachtet (Peng et al. 2007). Aus dieser geht hervor, dass es in Bezug auf postoperative Schmerzen,

Langzeiterfolge der Behandlung und Qualität der Obturation keine signifikanten Unterschiede zwischen den warmen und kalten Techniken gibt. Allerdings ist die Gefahr des Überpressens von Wurzelkanalfüllmaterial bei den warmen Techniken signifikant höher als bei der kalten lateralen Kompaktion (Peng et al. 2007).

3.4 Indikationen und Prognosen von Revisionen

Eine Revisionsbehandlung (engl. *retreatment*) ist die erneute Therapie einer bereits zu einem früheren Zeitpunkt behandelten Erkrankung, in diesem Fall der apikalen Parodontitis, mit gleichen oder anderen Therapiemaßnahmen (U.S. National Library of Medicine 2000).

Die Revision einer Wurzelkanalbehandlung ist demnach indiziert, wenn eine apikale Parodontitis durch die primäre endodontische Therapie nicht geheilt ist oder präventiv der Entstehung einer apikalen Parodontitis vorgebeugt werden soll (Schäfer et al. 2000; Friedman 2002; Friedman und Mor 2004; Heidemann 2004; Schirrmeister et al. 2006c). So kann auch die Revision einer technisch insuffizienten Wurzelkanalfüllung ohne apikale Parodontitis indiziert sein, wenn anschließend eine prothetische Versorgung des Zahns geplant ist (Sundqvist et al. 1998).

Zum Misserfolg einer primären endodontischen Therapie können verschiedene Faktoren wie unzureichende Säuberung, ungefüllte oder zu kurz gefüllte Kanäle oder ein koronales Leakage führen (Kirkevang et al. 2001; Siqueira 2001; Song et al. 2011). Die meisten dieser Faktoren führen zu einer intrakanalären Persistenz von Mikroorganismen, die den Hauptgrund für den Misserfolg einer primären endodontischen Therapie darstellt (Nair et al. 1990; Lin et al. 1992).

Im Fall einer Primärbehandlung werden üblicherweise grampositive, anaerobe Mikroorganismen aus dem Wurzelkanal isoliert (Siqueira 2001; Zehnder et al. 2002). Bei persistierenden apikalen Parodontitiden werden in 90% der Fälle *Enterococcus faecalis* (Siqueira 2001) und in 86% der Fälle verschiedene Streptokokken-Spezies nachgewiesen (Rôças und Siqueira 2010). Da in einem Biofilm organisierte Bakterien ungefähr 1000mal resistenter sind als dieselben Bakterien in planktonischer Form (Tronstad et al. 1990), ist es das Ziel einer Revision der Wurzelkanalbehandlung, diesen Biofilm zu zerstören und die Bakterien zu eliminieren. Um eine erneute, möglichst umfassende Reinigung und Desinfektion des Kanalsystems zu ermöglichen, muss das kontaminierte Wurzelkanalfüllmaterial möglichst vollständig entfernt werden (Stabholz und Friedman 1988; Saunders und Saunders 1994; Dalton et al. 1998; Nair 2006; Rossi-Fedele und Ahmed 2017).

Da eine solche intraradikuläre Infektion den häufigsten Grund für den Misserfolg einer endodontischen Primärbehandlung darstellt, sollte der Revision der Vorzug vor einer operativen Wurzelspitzenresektion oder der Extraktion des Zahnes gegeben werden (Siqueira 2001). Dies wird vor allem durch eine Studie unterstützt, die sich mit dem subjektiven Empfinden des Patienten nach einer Revisionsbehandlung beschäftigte (He et al. 2017). Die Patienten beantworteten dabei nach der Revision einer endodontischen Behandlung

verschiedene Fragen zu Kaufunktion, Sprachvermögen, Sozialfaktoren, psychologischen Aspekten und Schmerzen. Nach der Revisionsbehandlung verbesserten sich alle Faktoren signifikant für die Patienten, vor allem in der ersten Woche nach der Behandlung (He et al. 2017).

Die Erfolgsraten für endodontische Revisionen liegen etwa zwischen 47% und 98% (Bergenholtz et al. 1979; Allen et al. 1989; Sjögren et al. 1990; Sundqvist et al. 1998; Farzaneh et al. 2004; Friedman und Mor 2004; Gorni und Gagliani 2004; Ng et al. 2008). Diese sehr unterschiedlichen Erfolgsraten müssen im Hinblick auf die Kriterien und beeinflussenden Faktoren kritisch betrachtet werden, da häufig zwischen vollständiger klinischer und radiologischer Heilung und einer Funktionstüchtigkeit des Zahns trotz Vorliegens einer apikalen Parodontitis unterschieden wird. Ebenfalls müssen die unterschiedlichen Kriterien und Versuchsaufbauten der Studien in Betracht gezogen werden.

Wie auch bei der primären Wurzelkanalbehandlung, spielt es eine entscheidende Rolle für die Prognose einer Revision, ob der Zahn eine präoperative apikale Parodontitis aufweist. Eine prospektive klinische Studie zeigte Erfolgsraten von 89,5% bei der Revision von Zähnen ohne vorhandene präoperative apikale Parodontitis und 61,7% bei Zähnen mit präoperativer apikaler Parodontitis (Gorni und Gagliani 2004). In dieser Studie wurde zusätzlich gezeigt, dass eine Veränderung der Kanalmorphologie im Zuge der Primär- oder Revisionsbehandlung die Prognose signifikant verschlechterte. Die untersuchten Zähne ohne Veränderungen der Kanalmorphologie zeigten Erfolgsraten von 86,8%, während die Behandlung von Zähnen mit Beeinträchtigung der Morphologie lediglich in 47% der Fälle erfolgreich war (Gorni und Gagliani 2004).

Ein systematisches Review zu den Erfolgsraten von Revisionsbehandlungen nennt das Vorhandensein einer präoperativen apikalen Parodontitis als einen der entscheidenden prognostischen Faktoren (Ng et al. 2008). Als weitere wichtige Faktoren werden außerdem die Qualität der Wurzelkanalfüllung in Bezug auf ihre Distanz zum apikalen Foramen sowie die Qualität der postendodontischen Versorgung des Zahns genannt. Darüber hinaus wird auch die möglichst umfassende Entfernung des alten Wurzelkanalfüllmaterials als prognostisch günstig angesehen. Auch wenn nicht bewiesen ist, dass verbliebenes Material die Prognose beeinflusst, erscheint die Entfernung von kontaminiertem Wurzelkanalfüllmaterial sinnvoll (Nair 2006), weil Mikroorganismen und deren Endotoxine zwischen der Kanalwand und dem Wurzelkanalfüllmaterial zu einer persistierenden apikalen Entzündung führen können (Fukushima et al. 1990).

Die verschiedenen Möglichkeiten für die Entfernung des Füllmaterials sind dabei von der Wurzelkanalanatomie, der Art des primär verwendeten Wurzelkanalfüllmaterials, der Größe des zuletzt verwendeten Instrumentes (Rossi-Fedele und Ahmed 2017) und vor allem vom Krümmungswinkel der Wurzel abhängig. Dabei sind Wurzelkanalfüllungen in gekrümmten Wurzeln schwieriger zu revidieren als in geraden Wurzeln, weil die Gefahr für Instrumentendeformationen oder -frakturen steigt und prozedurale Fehler wie Perforationen, Verlust von Arbeitslänge, Schwächungen des Zahns und damit Frakturen und Veränderungen der

Wurzelkanalanatomie häufiger stattfinden (Aydın et al. 2009; Çelik Ünal et al. 2009; Duncan und Chong 2010; Hülsmann et al. 2011).

Es wird allgemein empfohlen, den Wurzelkanal bei der Revisionsbehandlung im Durchmesser zu erweitern, um das Füllmaterial möglichst umfassend zu entfernen. Dabei sollte der Kanalquerschnitt vor allem im Apikalbereich mit Instrumenten präpariert werden, die größer als die bei der Primärbehandlung verwendeten Instrumente sind (Hassanloo et al. 2007; Somma et al. 2008; Roggendorf et al. 2010), da sich verbliebenes Füllmaterial hauptsächlich im apikalen Drittel der Wurzel befindet (Wilcox et al. 1987; Hülsmann und Bluhm 2004; Masiero und Barletta 2005; Barletta et al. 2008; Dall’Agnol et al. 2008; Aydın et al. 2009; Çelik Ünal et al. 2009; Gergi et al. 2010; Rödiger et al. 2012; Reddy ES et al. 2013). Problematisch ist allerdings, dass dem Behandler während der Revision sowohl Arbeitslänge als auch Durchmesser der primären Wurzelkanalpräparation in der Regel nicht bekannt sind (Rossi-Fedele und Ahmed 2017).

Die Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials kann sowohl mit Hand- als auch rotierenden Instrumenten oder einer Kombination aus beiden durchgeführt werden.

3.4.1 Revision mit Handinstrumenten

Handinstrumente können aus verschiedenen Legierungen bestehen. Üblich sind Chrom-Nickel-Edelstahl-Legierungen, Titan-Aluminium-Legierungen (95 m% Titan, 5 m% Aluminium) und zwei verschiedene Nickel-Titan-(NiTi-)Legierungen (55 m% Nickel, 45 m% Titan (55-Nitinol) oder 60 m% Nickel und 40 m% Titan (60-Nitinol)) (Schäfer et al. 2000). Alle Instrumente weisen eine nicht-schneidende Spitze auf (VDW Dental 2017a, b, c).

Nach ISO-Standard (International Organization for Standardization) ist der schneidende Teil eines Instruments immer 16 mm lang, die Gesamtlänge des Instruments kann unterschiedlich sein. Die Konizität der Instrumente, also die Zunahme des Instrumentendurchmessers pro Millimeter des schneidenden Arbeitsteils, ist ebenfalls nach ISO-Norm festgelegt und beträgt 2%, also 0,02 mm Zunahme pro Millimeter Länge.

Hedström-Feilen werden durch Fräsung aus einem runden Rohling gefertigt, während Reamer und K-Feilen durch Verdrillung aus einem drei- bzw. viereckigen Rohling hergestellt werden. Durch die verschiedenen Herstellungsweisen unterscheiden sich die Instrumente vor allem in der Form ihres Querschnitts.

So sind Reamer dreieckig, K-Feilen quadratisch und Hedström-Feilen rund mit spiralförmigem Einschnitt. Daraus folgt, dass Reamer und K-Feilen bei Rotationsbewegungen effizient Dentin abtragen, während Hedström-Feilen bei Translationsbewegungen die größte Effizienz zeigen (Weber 2010). Hedström-Feilen weisen die größte Schneidleistung der Edelmetallinstrumente auf, zeigen jedoch auch die größte Frakturanfälligkeit (International Medical College).

Vor allem in gekrümmten Kanälen ist es wichtig, dass die Handinstrumente eine ausreichende Flexibilität aufweisen (Camps und Pertot 1994a). Starre Instrumente können zu

Stufen, Perforationen und Veränderungen der Morphologie des Wurzelkanalsystems führen (Weine et al. 1975). Eine Zunahme der Flexibilität kann zum Beispiel durch die Verwendung von Nickel-Titan-Legierungen anstelle von Edelstahl-Legierungen (Camps und Pertot 1994b) und durch die Verringerung des Kerndurchmessers des Instruments erreicht werden (Lautenschlager et al. 1977). In früheren Untersuchungen wurden häufig Handinstrumente mit rotierenden Instrumenten im Hinblick auf verschiedene Parameter verglichen. In Bezug auf die für die Revision benötigte Arbeitszeit stellten die meisten Studien eine signifikant kürzere Arbeitszeit für rotierendes Instrumentarium fest (Hülsmann und Stotz 1997; Somma et al. 2008; Kfir et al. 2012; Rödiger et al. 2012, 2014b; Reddy ES et al. 2013), jedoch beobachteten andere Studien eine kürzere Zeit für Handinstrumente (Barrieshi-Nusair 2002; Çelik Ünal et al. 2009).

Hinsichtlich der Sauberkeit des Kanals nach Revision wurden unterschiedliche Beobachtungen gemacht. Entweder wurde weniger im Kanal verbliebenes Material bei der Nutzung von Handinstrumenten gefunden (Aydın et al. 2009; Çelik Ünal et al. 2009) oder die Benutzung von rotierenden Instrumenten führte zu einer größeren Sauberkeit des Kanals (Barletta et al. 2008; Reddy ES et al. 2013).

In Bezug auf die Instrumentensicherheit wurden weniger oder gar keine Instrumentenfrakturen und -deformationen bei der Benutzung von Handinstrumenten festgestellt, während bei der Verwendung von rotierenden Instrumenten häufig Frakturen auftraten (Uezu et al. 2010; Rödiger et al. 2012, 2014b).

Zusätzlich zu Handinstrumenten werden rotierende Gates-Glidden-Bohrer verwendet, um die kompaktierte Guttapercha aus dem koronalen Wurzelkanaldrittel zu entfernen (Bertrand et al. 1997; Hülsmann und Stotz 1997; Barletta et al. 2008; Somma et al. 2008; Çelik Ünal et al. 2009; Horvath et al. 2009; Rödiger et al. 2012). Auch Ultraschall und Hitze (Wilcox 1989) sowie Lösungsmittel können unterstützend verwendet werden (Wilcox 1993; Hülsmann und Stotz 1997; Aydın et al. 2009; Horvath et al. 2009; Reddy ES et al. 2013).

3.4.2 Revision mit ProTaper Next und ProTaper Universal Retreatment

ProTaper Universal Retreatment (PTUR) ist ein rotierendes NiTi-System, das speziell für die Revision von Wurzelkanalfüllungen aus Guttapercha entwickelt wurde und aus drei Instrumenten (D1, D2, D3) besteht.

D1 weist eine schneidende Spitze auf, um die Guttapercha aus dem koronalen Wurzelkanaldrittel zu entfernen und hat einen Arbeitsteil von 16 mm. Der Durchmesser an der Instrumentenspitze beträgt 0,3 mm und die Feile hat eine Konizität von 9%.

D2 hat eine nicht-schneidende Spitze mit einem Durchmesser von 0,25 mm und das Instrument verfügt über eine Konizität von 8% bei einem Arbeitsteil von 18 mm Länge. Das Instrument wird demnach für die Entfernung der Wurzelkanalfüllung aus dem mittleren Kanaldrittel eingesetzt.

Die D3-Feile ist mit einem 22 mm langen Arbeitsteil das längste der drei Instrumente und

wird für die Entfernung des apikalen Drittels der Wurzelkanalfüllung verwendet. Der Querschnitt an der Instrumentenspitze ist 0,2 mm groß und das Instrument weist eine Konizität von 7% auf. Die empfohlene Umdrehungsgeschwindigkeit der Instrumente in einem drehmomentkontrollierten Motor zur Entfernung von Wurzelkanalfüllungen aus Guttapercha liegt bei 500-700 Umin⁻¹ (Dentsply 2010).

ProTaper Next ist ein System von Nickel-Titan-Feilen, das für die initiale Wurzelkanalpräparation entwickelt wurde. Die Instrumente verfügen über einen exzentrischen, rechteckigen Querschnitt und weisen variable Konizitäten in jedem Instrument auf. Das System besteht aus insgesamt fünf Feilen (X1-X5):

X1 = 17/.04

X2 = 20/.06

X3 = 30/.07

X4 = 40/.06

X5 = 50/.06.

Der Hersteller empfiehlt den Gebrauch von X1 und X2 als zwingend, X3-X5 sollten dann verwendet werden, wenn das apikale Foramen einen größeren Durchmesser als 0,25 mm aufweist (Dentsply 2013; Ruddle et al. 2014).

Je nach Geometrie und Morphologie des Kanals ist die Benutzung von Systemen mit unterschiedlichen Eigenschaften indiziert. So sollte beispielsweise ein Kanal mit einem kleinen Krümmungsradius mit Instrumenten behandelt werden, die hochflexibel sind und eine kleine Konizität aufweisen, um die Frakturgefahr des Instruments zu verringern (Dannemann et al. 2017).

Die Flexibilität und die Schneidleistung von NiTi-Instrumenten sind unter anderem von der Form ihres Querschnitts abhängig. Anders als bei den Handinstrumenten ist dieser nicht durch eine ISO-Norm vorgegeben, sondern kann frei vom Hersteller gewählt werden. So hat beispielsweise FlexMaster (VDW) einen Querschnitt, der einem konvexen Dreieck entspricht und dadurch drei scharfe Schneidekanten besitzt, MTwo (VDW) zeigt einen S-förmigen Querschnitt und dadurch eine hohe Flexibilität und ProFile (Dentsply Sirona) weist ein *radial lands*-Design mit U-förmigem Querschnitt bei ebenfalls hoher Flexibilität auf.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal von Hand- und NiTi-Instrumenten ist der sogenannte *memory effect*. Das bedeutet, dass sich die NiTi-Feile aufgrund ihres niedrigen Elastizitäts-Moduls nach dem Verbiegen ohne Verformung wieder in ihre Ausgangsposition zurückstellt. Daher wird vor allem in gekrümmten Wurzelkanälen die Anwendung dieser hochflexiblen NiTi-Feilen gegenüber Edelstahl-Handinstrumenten empfohlen (Camps und Pertot 1994b).

In zahlreichen Revisionsstudien wurde bereits die Effektivität rotierender NiTi-Instrumente mit Handinstrumenten verglichen (Hülsmann und Stotz 1997; Gergi und Sabbagh 2007; Barletta et al. 2008; Dall'Agnol et al. 2008; Aydın et al. 2009; Çelik Ünal et al. 2009; Rödig et al. 2012, 2014b; Reddy ES et al. 2013). Dabei wurde die für die Revision mit PTUR benötigte Arbeitszeit entweder als signifikant schneller als für manuelle Instrumente beschrieben (Somma et al. 2008; Rödig et al. 2012, 2014b; Reddy ES et al. 2013) oder es wurden keine Unterschiede beobachtet (Çelik Ünal et al. 2009).

Die Studien untersuchten die Effektivität der Revision entweder mit Mikro-CT (Barletta et al. 2008; Dall'Agnol et al. 2008; Rödig et al. 2012, 2014b), mit konventionellen Röntgenbildern (Gergi und Sabbagh 2007; Çelik Ünal et al. 2009) oder mit dem Elektronenmikroskop (Reddy ES et al. 2013). Auch die Verwendung von Lösungsmitteln bei der Entfernung des alten Füllmaterials wurde in früheren Studien unterschiedlich bewertet (Hülsmann und Stotz 1997; Gergi und Sabbagh 2007; Barletta et al. 2008; Aydın et al. 2009; Çelik Ünal et al. 2009).

Bei der Menge des während der Revision aufgetretenen Dentinabtrags ist die Studienlage ebenfalls nicht eindeutig. Der Dentinabtrag während der Revisionsbehandlung mittels PTUR war signifikant geringer als der bei der Verwendung von Hedström-Feilen (Rödig et al. 2014b) oder aber signifikant höher (Rödig et al. 2012).

Das Mikro-CT ermöglicht die nicht-invasive, dreidimensionale Darstellung eines Zahns vor und nach der Revisionsbehandlung und die Unterscheidung von Materialien mit unterschiedlicher Röntgenopazität. Mithilfe volumetrischer Berechnungen ist es deshalb möglich, den Dentinabtrag unabhängig von der Entfernung des Füllmaterials zu untersuchen.

In früheren Studien unserer Arbeitsgruppe wurden ebenfalls prozedurale Fehler wie Instrumentenfrakturen, Perforationen oder Stufenbildung untersucht (Rödig et al. 2012, 2014b). Im Vergleich zu Hedström-Feilen zeigten die PTUR-Feilen eine höhere Anfälligkeit für prozedurale Fehler (Rödig et al. 2012, 2014b). Im Gegensatz dazu traten in einer anderen Ex-vivo-Studie weder bei Hedström-Feilen noch bei PTUR-Feilen prozedurale Fehler auf (Somma et al. 2008).

In Bezug auf das im Kanal verbliebene Füllmaterial zeigten sich ebenfalls unterschiedliche Ergebnisse.

In einer Studie wurden nach der Anwendung von PTUR weniger Reste als nach Anwendung der Hedström-Feilen gefunden (Reddy N et al. 2013). Dabei wurden gerade Kanäle untersucht, die mit kalter, lateral kompakterter Guttapercha gefüllt und mit Hedström- oder PTUR-Feilen jeweils mit und ohne Lösungsmittel revidiert wurden. Anschließend wurden sie längs gespalten und die Menge an verbliebenem Füllmaterial zweidimensional mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht.

In anderen Studien wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen Revisionstechniken ermittelt (Rödig et al. 2012, 2014b). In beiden Mikro-CT-Studien wurden gekrümmte Kanäle mit kalter lateral kompakterter Guttapercha gefüllt und unter anderem mit Hedström- und PTUR-Feilen revidiert, wobei kein Lösungsmittel verwendet wurde.

Eine weitere Studie beobachtete mehr verbliebenes Material nach der Revision mit PTUR als nach der Verwendung von Hedström-Feilen (Somma et al. 2008). Hierbei wurden gerade Kanäle revidiert, die zuvor mit verschiedenen, lateral kompaktierten Guttapercha-Stiften gefüllt wurden. Bei der Revision mittels Hedström-Feilen wurde ein Lösungsmittel verwendet, bei den anderen Instrumenten nicht. Die zweidimensionale Untersuchung des verbliebenen Materials fand nach Längsspaltung der Wurzel mit verschiedenen Mikroskopen statt. Durch die unterschiedlichen Versuchsaufbauten wird der Vergleich der Studien untereinander erschwert.

Der größte Anteil verbliebenen Füllmaterials befindet sich häufig im apikalen Drittel des Wurzelkanals (Barletta et al. 2008; Çelik Ünal et al. 2009; Reddy ES et al. 2013). Um das Volumen verbliebenen Wurzelkanalfüllungsmaterials signifikant verringern zu können, wird dementsprechend die Vergrößerung des apikalen Kanaldurchmessers mit Instrumenten empfohlen, die bis zu zwei Größen größer sind als das bei der Primärbehandlung zuletzt verwendete Instrument (Hassanloo et al. 2007; Roggendorf et al. 2010).

Da das ProTaper-Next-System für die initiale Wurzelkanalpräparation und nicht für die Revision entwickelt wurde, gibt es nur wenige Studien, welche die Effizienz von ProTaper Next in Bezug auf die Revision untersuchten. In einer Mikro-CT-Studie wurde die Effektivität von ProTaper Next mit dem ebenfalls maschinellen Reciproc-System (VDW) bei der Behandlung von gekrümmten Kanälen verglichen (Nevares et al. 2016). Es wurden keine Unterschiede zwischen den beiden Systemen in Bezug auf die benötigte Arbeitszeit, das verbliebene Wurzelkanalfüllungsmaterial und das Volumen des entfernten Dentins ermittelt. Im Gegensatz dazu verblieb nach Revision mit ProTaper Next und PTUR signifikant weniger Wurzelkanalfüllungsmaterial im Kanal als bei den beiden anderen untersuchten NiTi-Systemen (Twisted File Adaptive; SybronEndo, Orange, CA, USA und Reciproc, VDW). Außerdem war die Arbeitszeit mit PTUR signifikant geringer als bei den anderen Systemen (Özyürek und Özseser-Demiryürek 2016).

Zusammenfassend wird häufig die Kombination maschineller und manueller Revisionstechniken empfohlen, um vor allem die Reinigung des apikalen Kanaldrittels zu verbessern (Hülsmann und Stotz 1997; Somma et al. 2008; Preetam et al. 2016) und die Menge an extrudiertem Debris zu verringern (Somma et al. 2008).

3.4.3 Einsatz von Lösungsmitteln

Die genannten Revisionstechniken können durch verschiedene zusätzliche Techniken, wie zum Beispiel den Einsatz von Lösungsmitteln, ergänzt werden. Die Anwendung von Lösungsmitteln ist vor allem sinnvoll, wenn die initiale Penetration des Revisionsinstrumentes in die Wurzelkanalfüllung nicht möglich ist. Als Lösungsmittel werden unter anderem Chloroform (Wilcox et al. 1987; Bertrand et al. 1997; Hülsmann und Stotz 1997; Barrieshi-Nusair 2002; Somma et al. 2008; Takahashi et al. 2009; Kfir et al. 2012; Karataş et al. 2016),

Xylene (Rotstein et al. 1999; Reddy N et al. 2013; Cavenago et al. 2014), Eukalyptusöl (Hülsmann und Bluhm 2004; Barletta et al. 2007, 2008; Gergi und Sabbagh 2007; Dall’Agnol et al. 2008; Çelik Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Karataş et al. 2016), Methylenchlorid, Methylchloroform oder Tetrahydrofuran (Wennberg und Ørstavik 1989) verwendet.

Chloroform ist zwar das effektivste Lösungsmittel (Tamse et al. 1986; Wennberg und Ørstavik 1989; Wilcox 1995), es wird jedoch als hepato- und nephrotoxisch (McDonald und Vire 1992) sowie möglicherweise karzinogen eingestuft (International Agency for Research on Cancer 1987). Als Alternative ist die Anwendung von Methylchloroform möglich, weil es eine ähnliche Erweichung der Guttapercha hervorruft, aber im Vergleich zu Chloroform weder nephrotoxisch noch karzinogen und weniger hepatotoxisch ist (Wennberg und Ørstavik 1989).

Die Nutzung von Lösungsmitteln reduzierte die zum Erreichen der Arbeitslänge benötigte Zeit (Ma et al. 2012; Reddy N et al. 2013), resultierte jedoch nicht generell in einem schnelleren Vordringen der Instrumente auf Arbeitslänge (Hülsmann und Stotz 1997; Hülsmann und Bluhm 2004; Kfir et al. 2012).

Die Reinigung des Kanals nach dem Einsatz von Lösungsmitteln wird ebenfalls kritisch betrachtet. So wurde der Kanal nach Anwendung eines Lösungsmittels in manchen Studien als sauberer eingestuft (Hülsmann und Bluhm 2004; Reddy N et al. 2013), während andere Autoren eine schlechtere Reinigung des Wurzelkanals im Gegensatz zu Revisionen ohne Lösungsmittel beschrieben (Horvath et al. 2009; Ma et al. 2012). Nach Verwendung eines Lösungsmittels verblieben Wurzelkanalfüllungsreste vor allem in Dentintubuli und Wandirregularitäten, da eine Entfernung des erweichten Füllmaterials aus diesen mechanisch unzugänglichen Bereichen nicht mehr möglich war (Horvath et al. 2009).

Darüber hinaus führte die Anwendung von Chloroform und Xylene zu einer reduzierten Schmelz- und Dentinhärte, wodurch sich das Risiko für iatrogene Veränderungen der Kanalmorphologie oder Perforationen während der Revision erhöhen kann (Rotstein et al. 1999). Aus diesen Gründen wird die Verwendung von Lösungsmitteln nur dann empfohlen, wenn die Arbeitslänge nicht mit anderen Hilfsmitteln erreicht werden kann (Rotstein et al. 1999; Horvath et al. 2009).

3.5 Komplikationen bei Revisionen

Bei der Revision einer Wurzelkanalbehandlung ist das Auftreten verschiedener Komplikationen möglich.

Ein Risiko ist dabei u. a. die Instrumentenfraktur, wobei das Risiko für eine Fraktur mit Abnahme des Krümmungsradius und bei Benutzung dickerer Instrumente zunimmt (Haïkel et al. 1999; Schirmeister et al. 2006b). Weiterhin sollten auch starke Veränderungen der Kanalmorphologie in Form von Stufen oder Perforationen vermieden werden, da dies durch den erhöhten Zahnhartsubstanzabtrag zu einer Schwächung der Wurzel und somit zu einem

erhöhten Risiko für eine Fraktur des Zahns führen kann (Hülsmann et al. 2011). Bei einer möglicherweise auftretenden Wurzellängsfraktur besteht die einzige Therapie in der Extraktion des betroffenen Zahnes (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006).

Im Wurzelkanalsystem verbliebenes Füllmaterial verhindert die Desinfektion der dadurch unzugänglichen Kanalbereiche und führt möglicherweise zu einem Misserfolg der Behandlung (Gorni und Gagliani 2004).

Die Erfolgswahrscheinlichkeiten der Therapie einer möglicherweise auftretenden lateralen Perforation der Wurzel wurden in einem Review untersucht (Siew et al. 2015). Dabei wurde bei adäquat durchgeführter Reparatur von Perforationen eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 72,5% angegeben. Die Verwendung von Mineraltrioxidaggregat und ein präoperativ gesundes apikales Parodont verbesserten hierbei die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Perforationsdeckung (Siew et al. 2015).

3.6 Mikro-Computertomografie

Zur Untersuchung der Effektivität von Revisionen wurden einige unterschiedliche Methoden entwickelt.

So werden zum einen destruktive Modelle wie die Längsspaltung der Wurzeln (Wilcox et al. 1987; Hülsmann und Stotz 1997; Hülsmann et al. 2003; Hülsmann und Bluhm 2004; Schirrmeister et al. 2006a; Aydın et al. 2009; Reddy N et al. 2013) und zum anderen nicht-destruktive Methoden vorgestellt. Diese bestehen unter anderem darin, Reste von Wurzelkanalfüllmaterialien röntgenologisch darzustellen (Masiero und Barletta 2005; Gergi und Sabbagh 2007; Çelik Ünal et al. 2009) oder die Wurzeln mithilfe von Chemikalien transparent zu machen (Vertucci 1984; Schirrmeister et al. 2006c). Eine weitere nicht-invasive Möglichkeit zur Evaluation von Wurzelkanalfüllungsresten und zusätzlichen Parametern, wie beispielsweise dem Dentinabtrag, ist die Verwendung eines Mikro-Computertomografen (Mikro-CT) (Rödig et al. 2007, 2012, 2014b; Barletta et al. 2008; Dall'Agnol et al. 2008), welcher in der vorliegenden Studie Verwendung fand.

3.6.1 Aufbau des Mikro-CTs

Die Mikro-Computertomografie (Mikro-CT) wurde in den 1980er Jahren von Feldkamp et al. (1984) entwickelt und ist eine Variante des in der Humanmedizin verwendeten Computertomografen (CT). Sie ermöglicht die nicht-invasive, hochauflösende dreidimensionale Darstellung kleiner Objekte.

Ein Mikro-CT besteht im Wesentlichen aus einer mikrofokalen Röntgenstrahlenquelle, verschiedenen Filtern zur Reduktion von Störeinflüssen, einem strahlensensitiven Sensor und einem um 360° rotierenden Objektträger (Abbildung 1).

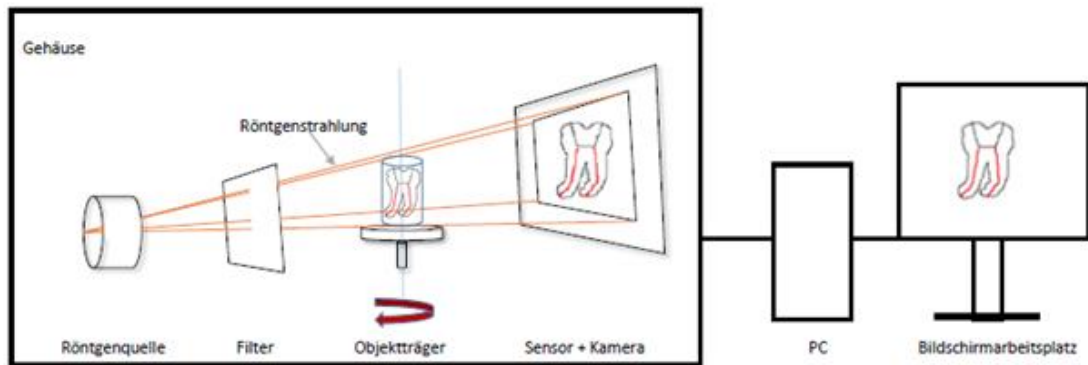


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Mikro-CTs

Während der Erfassung der Bilder dreht sich das Objekt auf dem Objektträger in festgelegten Rotationsschritten um 180° oder 360° . Bei jedem Schritt treffen Röntgenstrahlen durch das Objekt auf den Sensor und hinterlassen dort ein Muster abgeschwächter oder nicht-abgeschwächter Röntgenstrahlen. Die Intensität der Strahlung beim Auftreffen auf den Sensor wird mit der Intensität der Strahlung beim Verlassen der Röntgenquelle verglichen. Durch diese Differenz wird die Abschwächung der Strahlung durch das Objekt deutlich. Diese Intensitätsunterschiede werden in verschiedene Grauwerte umgewandelt, die mithilfe eines Algorithmus zu einem Volumendatensatz verrechnet werden. Dieser Datensatz ermöglicht nach weiterer Verarbeitung, der sogenannten Rekonstruktion, eine zwei- und dreidimensionale Darstellung des Objekts (Swain und Xue 2009; Bruker Corporation 2013) (Abbildung 2 und Abbildung 3).

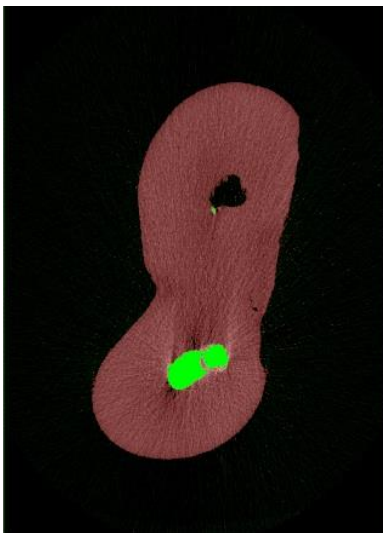


Abbildung 2: Zweidimensionale Darstellung einer Wurzel (rot: Zahnhartsubstanz, grün: Wurzelkanalfüllmaterial)



Abbildung 3: Dreidimensionale Darstellung einer Wurzel (rot: Wurzelkanalfüllmaterial)

Gegenüber klassischen klinischen CTs mit einer isotropen Ortsauflösung von etwa 1 mm lässt sich mit einem Mikro-CT eine Ortsauflösung von 5-50 μm erreichen, was einem minimalen Voxelvolumen (*volume element*) von $1 \times 10125 \mu\text{m}^3$ entspricht, sodass eine detailreiche Darstellung kleiner Objekte möglich ist (Engelke et al. 1999; Bruker Corporation 2013). Diese erhöhte Ortsauflösung wird durch einige Unterschiede zum konventionellen CT ermöglicht:

Konventionelle CT-Röntgenröhren können wegen der zu großen Größe ihres Fokuspunktes nicht für das Mikro-CT verwendet werden. Stattdessen werden Mikrofokus-Röntgenröhren verwendet, sodass eine kleinere Fokusgröße erreicht werden kann. Diese verringerte Fokusgröße geht mit einer verringerten Strahlungsintensität einher, da die Intensität, also die pro Fläche in einem gegebenen Zeitintervall zur Verfügung stehende Quantenzahl, von der Röhrenleistung bestimmt wird. Dementsprechend sind nur Proben mit kleinem Durchmesser für die Untersuchung mittels Mikro-CT geeignet und die Messzeiten sind im Vergleich zum klinischen CT wesentlich verlängert. Sie können sich je nach Auflösung im Minuten- bis Stundenbereich befinden (Engelke et al. 1999).

Außerdem ist es mithilfe der Mikrofokus-Röntgenröhren nicht möglich, Parallelstrahlen zu erzeugen. Sie erzeugen eine Kegelstrahlengeometrie, die dazu führt, dass die auf das Objekt treffenden und die das Objekt verlassenden Strahlen nicht auf einer Höhe liegen. Daraus würde eine vergrößerte Darstellung des Objektes resultieren. Dieser Fehler wird während der Rekonstruktion durch einen Algorithmus verrechnet und ausgeglichen (Bruker Corporation 2013).

Zudem benötigt man für die Erfassung der Kegelstrahlen einen technisch aufwendigen Flächendetektor, der den benötigten Algorithmus wesentlich komplexer macht. Allerdings wird es durch diese gleichzeitige Erfassung aller Schichten eines zu rekonstruierenden Volumens möglich, die Messzeiten zu verringern (Engelke et al. 1999). Nicht nur die geringere Röhrenleistung, sondern auch das Volumen gewonnener Daten beschränkt die Größe des zu untersuchenden Objekts (Engelke et al. 1999). Aufgrund der hohen technischen Anforderungen

ist es möglich, etwa 2600 Schichten pro Objekt zu generieren, speichern, visualisieren und weiter zu verarbeiten (Bruker Corporation 2013).

In dieser Studie wurde das Mikro-CT SkyScan 1272 (Bruker, Billerica, MA, USA) verwendet. Dieses System besteht aus einem Scanner und einem Bildschirmarbeitsplatz (Abbildung 4).



Abbildung 4: Mikro-CT SkyScan 1272 und zugehöriger Bildschirmarbeitsplatz

Der Scanner beinhaltet eine Röntgenquelle, einen Röntgenstrahlensensor und einen rotierenden Objektträger. Die Röntgenquelle ist eine mikrofokale Röntgenquelle, die je nach Filter eine Spannung zwischen 20 kV und 100 kV und eine Leistung von 10 W aufweist. Der SkyScan 1272 stellt sechs verschiedene Filter zur Verfügung. Die Filter kontrollieren das Energiespektrum der Strahlen, indem niedrigerenergetische Strahlung absorbiert wird, um die Strahlung insgesamt monoenergetischer zu gestalten. Die Intensität der Strahlung wird durch die Stromstärke reguliert. Außerdem ist eine Blende vorhanden, welche die Belichtungszeit reguliert, also die Bestrahlungszeit des Sensors durch die Röntgenquelle.

Der Röntgensensor besitzt eine Auflösung von 16 MP (4904 x 3280 Pixel) bzw. 11 MP (4032 x 2688 Pixel) und kann dadurch Pixel von $0,35 \mu\text{m}^2$ (16 MP) bzw. $0,45 \mu\text{m}^2$ (11 MP) unterscheiden und darstellen. Er besteht aus einem Szintillator und einer CCD-Kamera (*charge-coupled device*), die miteinander verbunden sind. Der Szintillator beinhaltet Cäsiumiodid, das die Röntgenphotonen beim Auftreffen auf den Sensor in sichtbares Licht umwandelt. Dieses Licht wird dann von der CCD-Kamera erfasst. Zwischen der Röntgenquelle und dem Sensor befindet sich der rotierende Objektträger. Der Objektträger kann in Schritten bis zu $0,1^\circ$ rotieren, an denen jeweils ein Bild aufgenommen wird. Der SkyScan 1272 kann Objekte mit einem maximalen Durchmesser von 75 mm erfassen.

Alle Bilder werden schließlich auf dem Computer zu einem Volumendatensatz zusammengefasst, aus dem die dreidimensionalen Darstellungen und Analysen möglich sind.

3.6.2 Verwendung des Mikro-CTs in der Endodontologie

Das Mikro-CT stellt seit seiner Entwicklung ein wertvolles Untersuchungswerkzeug im Forschungsbereich dar. In der Endodontologie liegen die Forschungsschwerpunkte in der Untersuchung der Kanalmorphologie (Rhodes et al. 1999; Peters et al. 2001; Ordinola-Zapata et al. 2017), der Wurzelkanalpräparation (Peters et al. 2001; Ikram et al. 2009; Metzger et al. 2010), der Wurzelkanalfüllung (Jung et al. 2005; Hammad et al. 2009; Kierklo et al. 2015) und der Revision (Rödig et al. 2012, 2014b; Monguilhott Crozeta et al. 2016).

So wurden in einer Studie die externe und interne Morphologie von 100 Oberkiefer-Molaren mit verschmolzenen Wurzeln mittels Darstellung im Mikro-CT untersucht (Ordinola-Zapata et al. 2017). Die Zähne wurden mit einer Voxel-Größe von $19,6 \mu\text{m}^3$ eingescannt. Mithilfe der dreidimensionalen Darstellung wurde ermittelt, dass in der mesio-bukkalen Wurzel sehr häufig eine komplexe Kanalanatomie (beispielsweise C-förmige oder miteinander verschmolzene Kanäle) zu finden war, vor allem, wenn diese Wurzel mit einer der anderen beiden verschmolzen war. In 49% der untersuchten Zähne wurde keine veränderte Kanalanatomie im Vergleich zur üblichen Anatomie von Oberkiefer-Molaren mit drei getrennten Wurzeln beobachtet (Ordinola-Zapata et al. 2017).

Die Mikro-Computertomografie dient ebenfalls der Überprüfung der Wurzelkanalpräparation und der Auswirkungen dieser Instrumentierung auf die Kanalmorphologie (Peters et al. 2001). Bei den nicht-instrumentierten Zähnen war es möglich, die äußeren Konturen der Zähne und das Wurzelkanalsystem detailliert darzustellen. Dabei wurde deutlich, dass alle 40 untersuchten palatinalen und disto-bukkalen Wurzeln einen einzelnen Wurzelkanal hatten, während 37 Zähne einen zweiten mesio-bukkalen Kanal aufwiesen. Außerdem zeigten palatinale und disto-bukkale Kanäle eher rundere Querschnitte, während mesio-bukkale Kanalsysteme vorwiegend oval oder schlitzförmig waren (Peters et al. 2001).

Anhand der Mikro-CT-Aufnahmen wurden ebenfalls die Effekte der Wurzelkanalpräparation bewertet. Die mit GT-Feilen (Dentsply Sirona) präparierten Kanäle wiesen eine konische Wurzelkanalform auf, während die mit NiTi-K-Feilen (Dentsply Sirona), Lightspeed (Lightspeed Inc, San Antonio, TX, USA) und ProFile (Dentsply Sirona) präparierten Kanäle eine vorwiegend parallele Kanalform zeigten. Insgesamt führte die Wurzelkanalpräparation zu einer Zunahme des Wurzelkanalvolumens um $1,85 \text{ mm}^3$ bis $2,18 \text{ mm}^3$ (Peters et al. 2001).

Mithilfe des Mikro-CTs ist es auch möglich, Volumenveränderungen der Zahnhartsubstanz nach endodontischen Verfahren zu untersuchen (Ikram et al. 2009). Mikro-CT-Bilder mit einer Voxel-Größe von $21 \mu\text{m}^3$ zeigten, dass die Präparation der Zugangskavität und die Präparation für einen Stift zu signifikanten Verlusten von Zahnhartsubstanz führten. Die alleinige Wurzelkanalpräparation führte dabei zu keinem signifikanten Unterschied in Bezug auf den Zahnhartsubstanzverlust im Vergleich zum nicht präparierten Kanal (Ikram et al. 2009).

In einer weiteren Studie wurden Mikro-CT-Bilder mit Voxel-Größen von $10,6 \mu\text{m}^3$ erstellt, anhand derer der Unterschied zwischen manueller und rotierender Wurzelkanalpräparation, kalter lateraler und warmer vertikaler Kompaktion als Fülltechnik sowie die Eignung des Mikro-CTs für derartige Fragestellungen überprüft wurden (Kierklo et al. 2015). Obwohl mit keiner der untersuchten Instrumentations- und Füllmethoden blasenfreie Wurzelkanalfüllungen erzielt wurden, stuften die Autoren diese Methoden für die klinische Anwendung als akzeptabel ein. Auch eine frühere Mikro-CT-Studie zeigte, dass eine vollständige Blasenfreiheit der Wurzelkanalfüllung mit keiner der untersuchten kalten Füllmethoden möglich war (Hammad et al. 2009).

Frühere Studien unserer Arbeitsgruppe zur Effizienz verschiedener Instrumente für die Revision von Wurzelkanalfüllungen aus gekrümmten Wurzelkanälen wurden mithilfe von Mikro-CT-Bildern mit Voxel-Größen von $29 \mu\text{m}^3$ durchgeführt (Rödig et al. 2012, 2014a, b). Als Parameter für die Effizienz wurden das verbliebene Wurzelkanalfüllmaterial, die abgetragene Zahnhartsubstanz und die für die Revision benötigte Arbeitszeit ermittelt. In keiner Studie war eine vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials möglich. Die maschinelle Revision war schneller als die Revision mit Handinstrumenten, während die Benutzung von Handinstrumenten zu weniger prozeduralen Fehlern führte als die maschinelle Revision (Rödig et al. 2012, 2014a, b).

Alle genannten Studien schlussfolgerten, dass der Gebrauch des Mikro-CTs mit den heute zu erreichenden Auflösungen und die detaillierte dreidimensionale, non-invasive Darstellung von externen und internen Strukturen eines Zahns ein geeignetes Instrument für die Forschung im Bereich der Endodontologie darstellt.

Als gute Alternative für die klinische Anwendung am Patienten wird die Digitale Volumentomografie (DVT) genannt, die ebenfalls in relativ hoher Auflösung von $125 \mu\text{m}^3$ (Zhang et al. 2017) Hart- und Weichgewebsstrukturen im Kieferbereich dreidimensional darstellen kann und die mit deutlich geringerer Strahlenbelastung als eine Computertomografie einhergeht (Patel 2009; Patel et al. 2009).

4 Material und Methoden

Die verwendeten Materialien und ihre Bezugsquellen sind in der Materialliste im Anhang (Kap. 9.1) aufgeführt.

4.1 Auswahl der Zähne und Präparation der Wurzelkanäle

Nach Genehmigung der Studie durch die Ethik-Kommission der Universitätsmedizin Göttingen (Antragsnummer 27/8/13) wurden extrahierte, menschliche Molaren mit gekrümmten Wurzeln gesammelt. Zuvor wurde eine Einverständniserklärung der Patienten für die Nutzung dieser Zähne zur Forschung eingeholt. Die Zähne wurden zur Desinfektion für fünf Tage in Isopropyl-Alkohol 70% eingelegt. Anschließend wurden Konkrementen und andere Verschmutzungen mit einem Scaler entfernt und die Zähne in Leitungswasser gelagert. Die Zähne wurden mithilfe eines roten Winkelstücks und einem Diamanten unter Wasserkühlung trepaniert, die apikale Gängigkeit des Wurzelkanals mit einem Reamer der ISO-Größe 10 geprüft und die Wurzel von der Zahnkrone abgetrennt. Jede Probe wurde mit einem wasserfesten OHPen nummeriert. Beim Vorliegen von zwei separaten Wurzelkanälen in einer Wurzel wurden beide vermessen und der in Bezug auf die Homogenität der Gruppen geeignetere Kanal für die Weiterverwendung ausgewählt und markiert.

Es wurden Wurzeln von Ober- und Unterkiefer-Molaren verwendet, die folgende Einschlusskriterien erfüllten (Tabelle 1):

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Proben

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
- Durchgängiger Kanal	- Vorherige Wurzelkanalbehandlung
- Abgeschlossenes Wurzelwachstum	- S-förmige Kanäle
- Krümmungswinkel zwischen 20° und 45° und Krümmungsradius bis einschließlich 12 mm in derselben Ebene	- Resorptionen, Perforationen der Wurzel o. ä.
- Mindestlänge des Kanals: 10 mm	
- Referenzpunkt bei 18 mm	

Zur Bestimmung der Krümmungswinkel und -radien wurden die Wurzeln in zwei Ebenen, in bucco-oraler (bo) und mesio-distaler (md) Richtung, geröntgt. Für die Bestimmung des Abbildungsmaßstabs wurde auf jeder Aufnahme ein Referenzdraht mit der Länge 13,1 mm mitgeröntgt. Während der Röntgenaufnahme befand sich ein Reamer der ISO-Größe 15 im Wurzelkanal, der am apikalen Foramen sichtbar war.

Um eine standardisierte Projektionsrichtung und einen standardisierten Abstand zwischen Sensor und Röntgenröhre zu gewährleisten, wurde ein Röntgenhalter aus Silaplast FUTUR hergestellt, in dem der digitale Röntgensensor befestigt wurde. Mithilfe einer über dem Sensorhalter platzierten Folie und Peripherie-Wachs wurden jeweils eine Wurzel und der Referenzdraht befestigt. Der Röntgenröhre wurde bei jeder Aufnahme mit einem standardisierten Abstand von 18 mm zum Sensorhalter positioniert. Die digitalen Röntgenaufnahmen wurden mit dem Röntgengerät Heliodont Plus mit den folgenden Einstellungen vorgenommen: Strom 4 mA, Spannung 60 kV, Belichtungszeit 0,05 s.

Anschließend wurden die Krümmungswinkel nach Schneider (1971) und die Krümmungsradien nach Schäfer et al. (2002) berechnet. Dazu wurden die Röntgenbilder mit dem Bildbearbeitungsprogramm ImageJ 1.49v geöffnet und der Abbildungsmaßstab durch Vermessung des Referenzdrahts berechnet. Weiterhin wurden die Koordinaten von drei Punkten A (X_1, X_2), B (Y_1, Y_2) und C (Z_1, Z_2) bestimmt (Abbildung 5). Punkt A wurde am Kanaleingang, Punkt B am Beginn der Krümmung des Kanals und Punkt C am röntgenologischen Apex eingezeichnet.

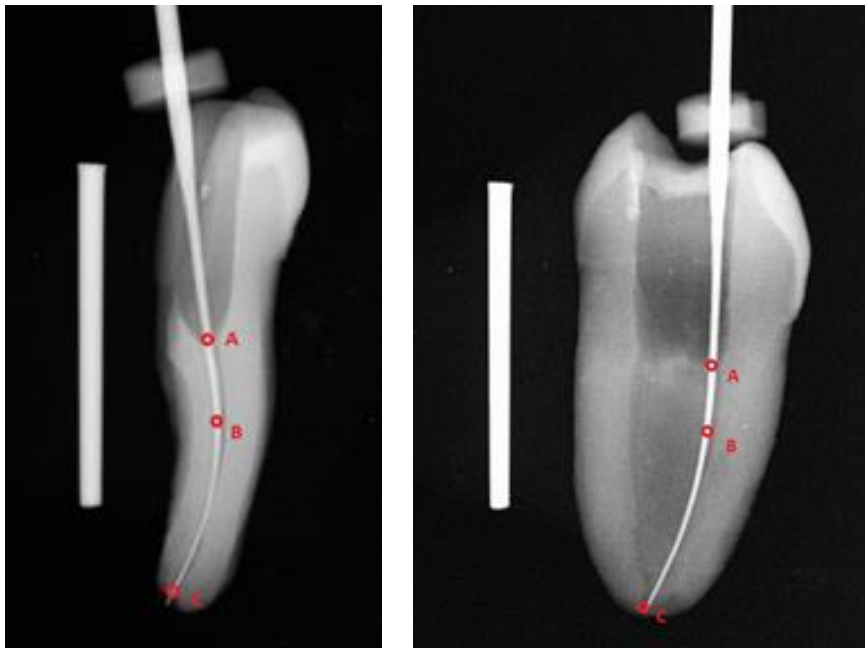


Abbildung 5: Zahn in bucco-oraler und mesio-distaler Richtung mit festgelegten Punkten A, B und C. Die Koordinaten wurden in eine Excel-Tabelle eingetragen, mit deren Hilfe die vier Parameter (Krümmungswinkel θ_{bo} und θ_{md} , Krümmungsradius r_{bo} und r_{md}) für jede Probe errechnet wurden.

Die Formel für die Bestimmung des Krümmungsradius nach Schneider (1971) lautet:

$$= 180 - (\text{ARCCOS}(((X1-X2)*(X3-X2)+(Y1-Y2)*(Y3-Y2))/\text{WURZEL}((X1-X2)^2+(Y1-Y2)^2)/\text{WURZEL}((X3-X2)^2+(Y3-Y2)^2)) * 180 / \text{PI}()$$

Zunächst wird eine Senkrechte parallel zum geraden Anteil des Kanals gelegt und eine zweite Gerade vom Foramen apicale bis zum Beginn der Krümmung des Kanals gezogen. Anschließend wird der Winkel zwischen den beiden Geraden ausgemessen. Ein Winkel bis 20° gilt als moderate und ab 25° als starke Krümmung (Schneider 1971).

Mithilfe des Krümmungswinkels wurde zusätzlich der Krümmungsradius nach Schäfer et al. (2002) errechnet:

$$= \text{WURZEL}((X3-X2)^2+(Y3-Y2)^2)/2/\text{SIN}(\text{Krümmungswinkel}*\text{PI}()/180)*\text{Abbildungsmaßstab}$$

Auf der Grundlage eines gleichschenkligen Dreiecks und des Bogenmaßes kann mithilfe der festgelegten Koordinatenpunkte und des ermittelten Krümmungswinkels der Krümmungsradius mit der Formel

$$r = \frac{s}{\sin-\alpha}$$

errechnet werden. s stellt den Abstand zwischen Punkt A und Punkt B dar (Schäfer et al. 2002).

Alle vier Parameter wurden von einer Untersucherin ermittelt. Letztendlich erfüllten 60 Wurzeln alle Einschlusskriterien. Bei diesen 60 Proben wurde entweder durch Abtrennen der Zahnkrone oder durch einen Kompositaufbau mit iBond Universal und Venus Diamond ein eindeutiger Referenzpunkt bei einer Wurzelkanallänge von 18 mm mit einer Arbeitslänge von 17 mm geschaffen.

Die Wurzelkanäle wurden anschließend mit einer standardisierten Instrumentensequenz (Abbildung 6) präpariert. Dabei wurden die rotierenden Instrumente (Gates-Glidden-Bohrer und ProFile-Instrumente) mit einem drehmomentkontrollierten Motor (Endo IT Control Motor) und einem Winkelstück mit einer Übersetzung von 4:1 entsprechend dem folgenden Präparationsprotokoll angewendet (Tabelle 2):

Tabelle 2: Standardisiertes Protokoll für die maschinelle Präparation der Wurzelkanäle (PF = ProFile, AL = Arbeitslänge)

Instrument	Geschwindigkeit [U/min]	Torque [g/cm]	Arbeitslänge (AL)
Gates-Glidden Gr. 3	1000	400	AL - 10 mm
Gates-Glidden Gr. 2	1000	240	AL - 8 mm
PF 25/.06	300	78	AL - 6 mm
PF 20/.06	300	60	AL - 4 mm
PF 25/.04	300	51	AL - 2 mm
PF 20/.04	300	39	AL
PF 25/.04	300	51	AL
PF 30/.04	300	76	AL

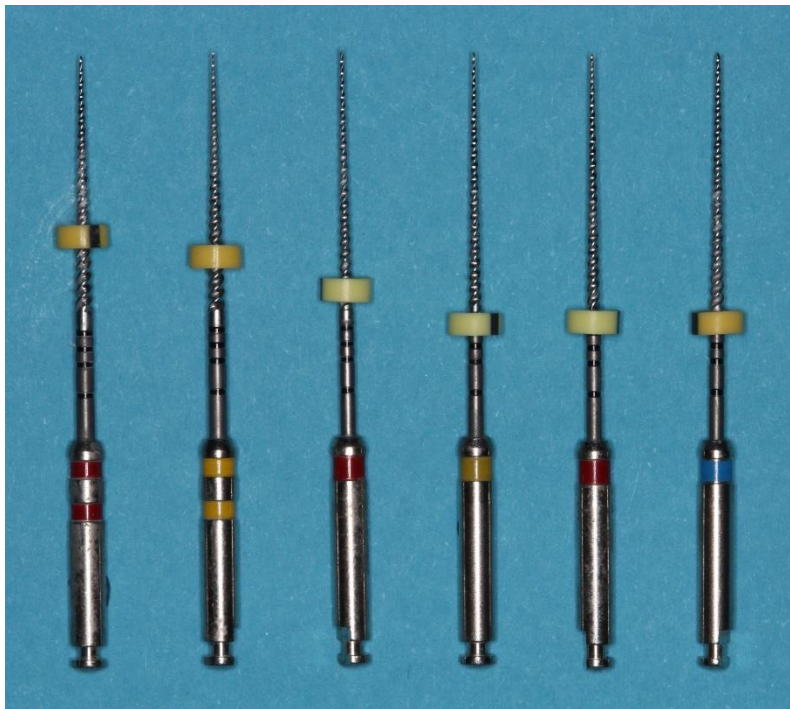


Abbildung 6: Sequenz der ProFile-Instrumente entsprechend dem Präparationsprotokoll mit eingestellter Arbeitslänge

Nach jedem Instrument wurde mit 2 ml Natriumhypochlorit-Lösung 1% gespült, die Abschlusspülung bestand aus 5 ml Zitronensäure-Lösung 10% und 5 ml Natriumhypochlorit-Lösung 1%. Die Spüllösungen wurden mit einer 5 ml Spritze und einer Spülkanüle Größe 30 appliziert, wobei die Spülkanüle wurde so tief wie möglich in den Kanal ohne Friktion eingeführt wurde. Am Ende der Präparation wurde die Spülkanüle auf Arbeitslänge minus 2-3 mm inseriert. Nach jeder Spülung wurde der Kanal mit einem Reamer der

ISO-Größe 10 auf Arbeitslänge rekapituliert, um seine Durchgängigkeit sicherzustellen. Die NiTi-Instrumente wurden nach Benutzung in fünf Wurzelkanälen ausgetauscht.

Nach der Präparation der Wurzelkanäle wurden die 60 Proben mithilfe von Statistica 12 entsprechend der Krümmungswinkel und -radien in drei homogene Gruppen eingeteilt. Dazu wurden jeweils die Parameter, die die Einschlusskriterien erfüllten, zu „Krümmungswinkel und -radius 1“ bestimmt. Die Parameter aus der zweiten Röntgenebene wurden als „Krümmungswinkel und -radius 2“ definiert.

Die Homogenität der Gruppen wurde mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests überprüft ($p > 0,05$) (Tabelle 3) und die Gruppen anschließend randomisiert auf die jeweilige Methode der Wurzelkanalfüllung aufgeteilt.

Tabelle 3: Mittelwerte und Homogenität der Gruppen in Bezug auf die Krümmungswinkel und -radien mit dem Kruskal-Wallis-Test ermittelt (SD = Standardabweichung)

	Krümmungswinkel 1 [°] ± SD	Krümmungsradius 1 [mm] ± SD	Krümmungswinkel 2 [°] ± SD	Krümmungsradius 2 [mm] ± SD
Thermafil	27,0 ± 5,9	7,7 ± 2,6	12,2 ± 6,8	22,6 ± 21,8
GuttaCore	26,9 ± 6,1	7,3 ± 2,2	12,2 ± 7,5	21,9 ± 18,1
Vertikale Kompaktion	27,1 ± 5,5	7,0 ± 2,4	15,7 ± 14,3	27,6 ± 34,3
p-Wert	0,944	0,784	0,795	0,886

Gruppe 1: Thermafil (TF)

Zunächst wurde die Größe der Präparation mit einem Verifier der Größe 25 überprüft, indem dieser auf Arbeitslänge in den Kanal eingebracht wurde. Der Kanal wurde mit Papier spitzen der Größen 15 bis 40 getrocknet. Anschließend wurde eine gleichmäßige Menge AH Plus Jet-Sealer mithilfe eines Guttapercha Points der ISO- Größe 25 bis auf Arbeitslänge in den Wurzelkanal appliziert. Der Thermafil-Obturator der Größe 25 (Abbildung 7) wurde in dem Thermaprep 2 Ofen auf Stufe 1 erhitzt. Der erwärmte Obturator wurde bis auf die Arbeitslänge von 17 mm in den Kanal eingeführt, sodass Sealer am Foramen apicale sichtbar wurde, um eine zu kurze Wurzelkanalfüllung zu verhindern.

Gruppe 2: GuttaCore (GC)

Hierfür wurden die Proben entsprechend denen der Gruppe 1 vorbereitet und die Kanalwände mit AH Plus benetzt. Anstelle eines Thermafil-Obturators wurde ein GuttaCore-Obturator der Größe 25 (Abbildung 7) in dem Thermaprep 2 Ofen erhitzt und bis auf Arbeitslänge in den Kanal inseriert.



Abbildung 7: Trägerbasierte Füllmethoden, links Thermafil-, rechts GuttaCore-Obturator

Gruppe 3: Vertikale Kompaktion (WVK)

Im feuchten Kanal wurde ein Guttapercha-Masterpoint der Größe 25 oder 30 mit einer Konizität von 4% so in den Kanal eingepasst, dass er eine geringe Klemmpassung auf Arbeitslänge aufwies. Nach Trocknen des Kanals wurde der Masterpoint mit AH Plus Jet-Sealer benetzt und auf Arbeitslänge in den Kanal eingebracht. Er wurde anschließend mit dem Hitzeplugger (40/.03) des Geräts BeeFill 2in1 (Abbildung 8) der *continuous-wave*-Technik bei 220 °C abgetrennt und kondensiert, sodass die apikalen 5 mm des Kanals mit Guttapercha gefüllt waren. Anschließend wurde die Guttapercha bis zum Abkühlen mit einem Plugger der Größe 1 und 2 verdichtet. Nach Kompaktion des apikalen Teils der Wurzelkanalfüllung wurde erwärmte thermoplastische Guttapercha für die Füllung des restlichen Kanals genutzt. In das dafür vorgesehene BeeFill-Handstück wurde eine BeeFill Guttapercha-Kartusche mit einem Durchmesser von 0,45 mm eingelegt. Diese Kartusche wurde so in den Kanal eingebracht, dass sie Kontakt zum bereits bestehenden apikalen Teil der Wurzelkanalfüllung hatte, um Luft einschließen in der Wurzelkanalfüllung zu vermeiden.

Die auf 170 °C erwärmte, flüssige Guttapercha wurde daraufhin mit einer Fließrate von 40% in den Kanal injiziert, bis dieser vollständig gefüllt war. Abschließend wurde die Guttapercha mit einem Hand-Plugger der Größe 3 und 4 kompaktiert.



Abbildung 8: BeFill 2in1 für die Füllmethode der warmen vertikalen Kompaktion

In allen drei Gruppen wurde nach Abkühlung der Guttapercha die Wurzelkanalfüllung mit Endo-Rosenbohrern der Größe 006 und 010 auf eine standardisierte Länge von 10 ± 1 mm gekürzt. Die Länge und Homogenität der Wurzelkanalfüllung wurde durch digitale Einzelaufnahmen in zwei Ebenen überprüft. Bei unzureichender Qualität der Wurzelkanalfüllung wurde diese umgehend mit Hedström-Feilen revidiert und der Kanal erneut obturiert. Abschließend wurde die Zugangskavität mit Cavit verschlossen und die Probe wurden für mindestens 4 Wochen in einem verschlossenen Behälter auf einem mit Leitungswasser getränkten Tuch feucht gelagert, um eine vollständige Erhärtung des Sealers zu gewährleisten.

4.2 Revision

Nach dem Erstellen einer ersten Mikro-CT-Aufnahme zur Bestimmung des präoperativen Volumens des Wurzelkanalfüllmaterials und Dentins wurde die Wurzelkanalfüllung revidiert. Dazu wurde zunächst das Cavit mit einem Scaler entfernt.

Die NiTi-Instrumente der Systeme ProTaper Universal Retreatment (D1-D3) und ProTaper Next (X2-X4) (Abbildung 9) wurden in ein Winkelstück mit einer Übersetzung von 4:1 eingespannt und mit dem drehmomentkontrollierten Endo IT Control Motor verbunden. Anschließend wurden die Wurzelkanalfüllungen nach einem standardisierten Revisionsprotokoll (Tabelle 4) revidiert.

Tabelle 4: Standardisiertes Revisionsprotokoll (D1-D3 = ProTaper Universal Retreatment, X2-X4 = ProTaper Next, AL = Arbeitslänge)

Instrument	Geschwindigkeit [U/min]	Torque [g/cm]	Arbeitslänge (AL)
D1	500	200	AL - 7 mm
D2	500	200	AL - 3,5 mm
D3	500	150	AL
X2	300	200	AL
X3	300	200	AL
X4	300	200	AL

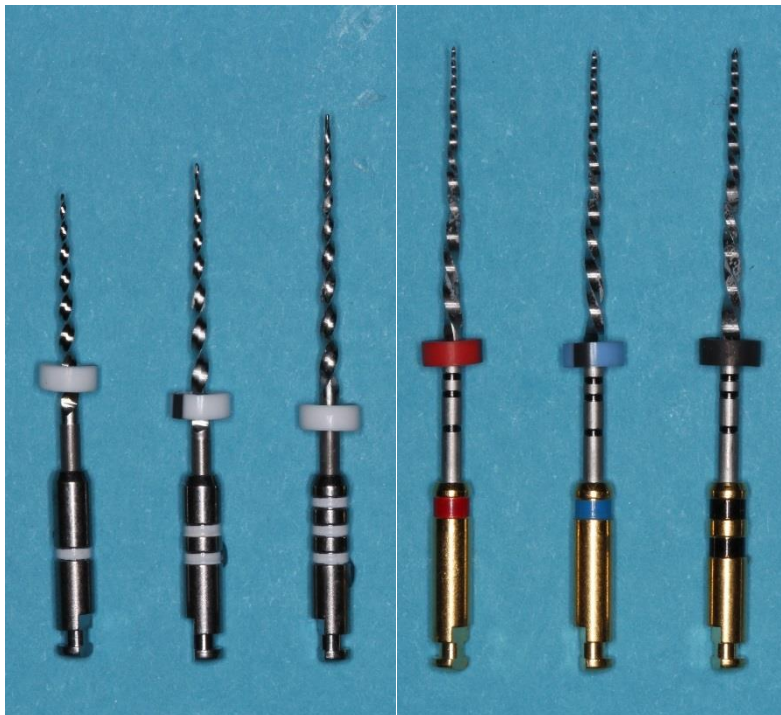


Abbildung 9: Sequenz der Revisionsinstrumente ProTaper Universal Retreatment D1-D3 und der ProTaper-Next-Instrumente X2-X4 mit eingestellter Arbeitslänge entsprechend dem Revisionsprotokoll

Die Instrumente D1-D3 gehören zu dem System ProTaper Universal Retreatment und wurden speziell für die Revision entwickelt. Die Instrumente X2-X4 gehören zu dem System ProTaper Next und wurden zur Kanalaufbereitung entwickelt. Die Systeme werden in dem Kapitel 3.4.2. erläutert. Die Instrumente wurden nach der vierten Benutzung, bei sichtbarer Deformation oder einer Instrumentenfraktur ausgetauscht (Abbildung 19).

Nach jedem Instrumentenwechsel wurde der Wurzelkanal mit 2 ml 1%iger Natriumhypochlorit-Lösung gespült. Eine Abschlusspülung fand mit 5 ml 10%iger Zitronensäure und

5 ml 1%iger Natriumhypochlorit-Lösung statt. Die Spülungen wurden mit 5 ml-Einmalspritzen und Spülkanülen der Größe 30 appliziert.

Der Endpunkt der Revision war erreicht, wenn in den Schneiden des letzten Instruments (X4) nach einmaliger Zwischenspülung mit 2 ml Natriumhypochlorit (NaOCl) kein Wurzelkanalfüllungsmaterial mehr sichtbar war und in der Flüssigkeit ebenfalls keine Reste des Füllmaterials erkennbar waren.

Während der Revision wurde jeweils die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge mit D3 (T1) und die Zeit bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung mit X4 (T2) gemessen und notiert.

Außerdem wurden extrudierter Debris mit einer Ja-/Nein-Entscheidung beurteilt und prozedurale Fehler wie Perforationen, Arbeitslängenverlust oder Instrumentenfrakturen sowie -deformationen notiert.

Die revidierten Zähne wurden erneut im Mikro-CT eingescannt. Bis dahin wurden sie ohne Cavit in einem geschlossenen Behälter auf einem mit Wasser getränkten Tuch feucht aufbewahrt.

4.3 Mikro-CT

Nach der Wurzelkanalfüllung wurden die Proben zum ersten Mal mit dem Mikro-CT gescannt. Ein zweiter Scan fand nach der Revision statt. Nach der Entfernung des Cavits und der Trocknung der Wurzelkanäle mit Papierspitzen wurden jeweils zwei Zähne übereinander mit einem feuchten Schaumstoff in einem Kunststoffröhrchen fixiert. Mithilfe der Einstellung *oversize and batch scan* wurden zwei Zähne gleichzeitig gescannt, jedoch als separate Dateien abgespeichert.

Die Proben wurden mit dem Mikro-CT SkyScan 1272 mit einem 1 mm dicken Aluminium-Filter bei 80 kV und 125 μ A gescannt. Die Proben wurden in 0,4°-Schritten um 180° rotiert und mit einer Belichtungszeit von 2231 ms und einer Pixel-Größe von 10,5 μ m aufgenommen. Jedes Bild wurde als Durchschnitt von drei, in gleicher Position gescannten Bildern zusammengerechnet, wobei der Scan insgesamt 1 h und 1 min dauerte.

Nach dem Scannen wurde die 3D-Darstellung der Probe mithilfe einer Rekonstruktion berechnet. Dazu wurde die Software NRecon 1.7.0.3 verwendet. Die thermische Driftkompensation wurde durch den Vergleich mit einem Referenzscan durchgeführt. Dieser wurde direkt nach der Messung in wenigen Rotationsschritten erfasst. Für alle Scans wurden der Wert für das *beam hardening* auf 60 und für das *smoothing* auf 2 festgelegt.

Beam hardening führt dazu, dass mehr Photonen von dem Niedrig-Energie-Spektrum in einigen Projektionen mit einer höheren Masse Zahnhartsubstanz absorbiert wurden als in anderen Projektionen. Durch diese Korrektur wird die Intensität angepasst, sodass keine falschen Informationen über die Dichte der Zahnhartsubstanz durch hellere Voxel entstehen. Mit *smoothing* wird die Graustufe von jedem Pixel aus den durchschnittlichen Graustufen von

den Pixeln in der Umgebung berechnet. Dadurch werden starke Unterschiede zwischen benachbart liegenden Pixeln verringert.

Individuell für jede Probe und jede Messung mussten die Werte für *ring artefact reduction* und *post-alignment* festgelegt werden.

Die *ring artefact reduction* dient dazu, Ringe, die durch fehlerhafte Pixel im Bild entstanden sind, herauszurechnen. Mit dem *post-alignment* werden Abweichungen von dem Drehpunkt der Probe von der zentralen Linie vom Quellen-Detektor korrigiert.

Alle diese Einstellungen ermöglichen, Ungenauigkeiten in der Messung zu verbessern.

Als letzter Schritt der Rekonstruktion wurden die Anfangs- und Endpunkte des Histogramms für jede Probe mit 0-0,1 festgelegt. Die rekonstruierten Bilder wurden anschließend in dem Programm DataViewer 1.5.2.4 rotiert.

Mithilfe der Option *3D Registration* können ein Referenzbild und ein zu veränderndes Bild gleichzeitig geladen und bearbeitet werden. Als Referenz wurde immer das präoperative Bild und als zu veränderndes Bild das postoperative Bild eines Zahnes gewählt. Die beiden Messungen wurden durch Rotation des postoperativen Bilds übereinander gelagert, sodass prä- und postoperative Bilder die gleichen Referenzpunkte erhielten.

4.4 Volumetrie

Das Volumen von Dentin und Wurzelkanalfüllungsmaterial wurde mit der Software CTAnalyser 1.16 4.1 berechnet.

Für jede Probe wurde zunächst eine *region of interest* (ROI) festgelegt und gespeichert. Diese ROI umschloss jeweils die Wurzelkanalfüllung, das umliegende Dentin und, wenn nicht anders möglich, einen Teil der die Probe umgebenden Luft. Durch die 3D-Registration und Schaffung gleicher Referenzpunkte von prä- und postoperativem Bild umfasste diese ROI für beide Messungen den gleichen Bereich der Probe. Anschließend wurde das Histogramm der jeweiligen Probe betrachtet. In dem Histogramm werden die verschiedenen Bestandteile der Probe (Schmelz, Dentin, Wurzelkanalfüllungsmaterial und Luft) mit unterschiedlichen Abschwächungskoeffizienten dargestellt, allerdings ist der Übergang ineinanderfließend. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass es keinen eindeutigen gemeinsamen Anfangsschwellenwert für die optimale Bestimmung des Dentins jeder Probe gibt. Daher wurden als mögliche Anfangsschwellenwerte 30 und 40 festgelegt. Für jede Probe wurde individuell entschieden, welcher dieser Werte geeigneter war.

Der Anfangsschwellenwert des Dentins wurde für die prä- und postoperativen Bilder einer Probe gleich gewählt. Als Endschwellenwert des Dentins wurde immer 214 gewählt, der Histogramm-Bereich für das Wurzelkanalfüllungsmaterial wurde als 215-255 festgelegt. Die Analysen wurden durch Erstellung von 3D-Bildern mit CTvox 3.2.0 überprüft, in denen das Wurzelkanalfüllmaterial farbiger dargestellt wurde (Abbildung 10).

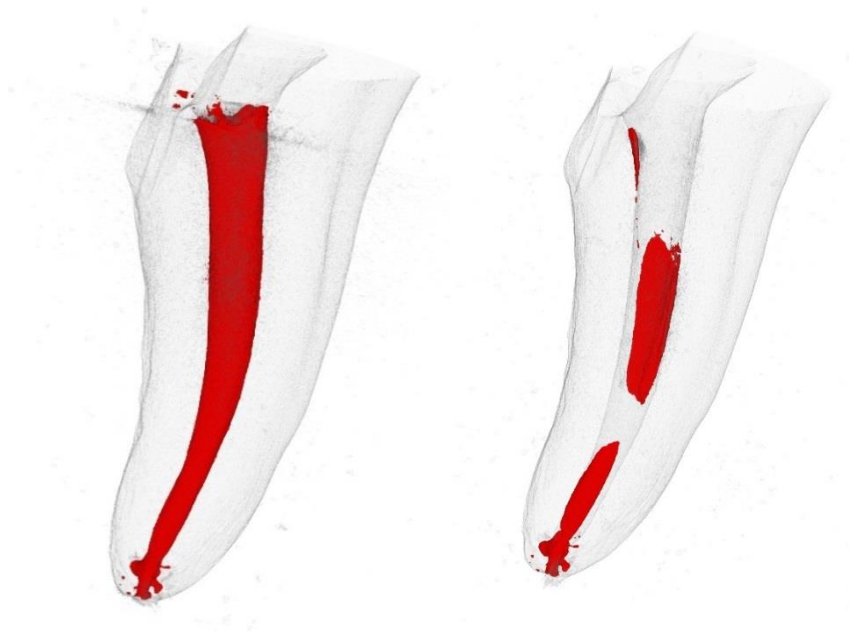


Abbildung 10: Dreidimensionale Darstellung eines prä- und postoperativen Scans mit rot eingefärbtem Wurzelkanalfüllungsmaterial

Die Volumina für das Dentin wurden in mm^3 berechnet, und das postoperative Volumen einer Probe wurde von dem präoperativen Volumen subtrahiert, um das bei der Revision entfernte Dentin zu ermitteln.

Die Volumina der Wurzelkanalfüllungen wurden ebenfalls in mm^3 berechnet und das verbliebene Wurzelkanalfüllungsmaterial in % bezogen auf das initiale Füllvolumen berechnet. Die Analysen aller Proben wurden von einer Untersucherin durchgeführt.

4.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung fand mittels Statistica 12 statt.

Zunächst wurde die Normalverteilung der Ergebnisse für jeden einzelnen Parameter anhand von Quantilen-Plots (Q-Q-Plots) beurteilt. Alle Q-Q-Plots wurden als nicht normalverteilt befunden.

Die Auswertung erfolgte separat für die 5 Parameter (verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial, Dentinabtrag, T1, T2, Tgesamt). Der Vergleich der 3 Materialien wurde mittels Kruskal-Wallis-Test durchgeführt.

Im Falle eines signifikanten Ergebnisses wurden Paarvergleiche zwischen den einzelnen Gruppen mithilfe des Wilcoxon-Tests durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt.

5 Ergebnisse

5.1 Verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial

Bei keiner Probe fand eine vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials statt (Abbildung 12). Hinsichtlich der Menge des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials unterschieden sich die Ergebnisse nicht signifikant voneinander ($p = 0,699$) (Abbildung 11). Der Anteil des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials lag bei den mit Thermafil gefüllten Wurzeln bei 14,2%, bei GuttaCore bei 15,9% und bei der warmen vertikalen Kompaktion bei 19,3% (Abbildung 13).

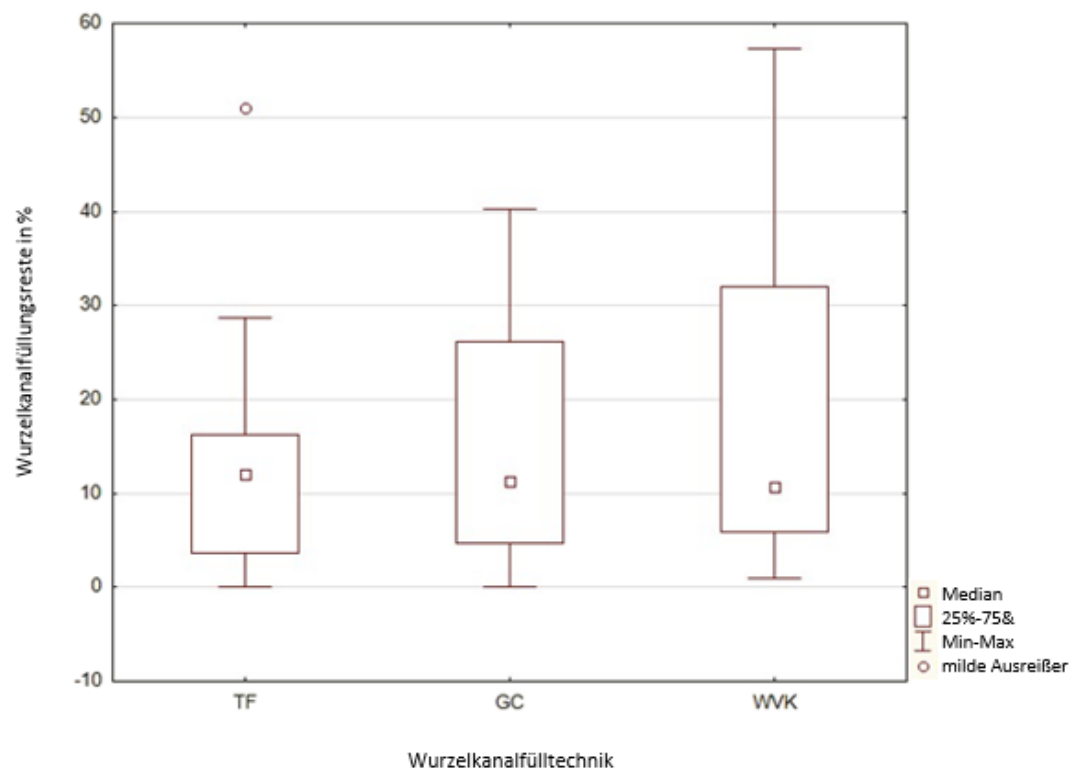


Abbildung 11: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Wurzelkanalfüllungsreste (in %) nach der Revision (TF = Thermafil, GC = GuttaCore, WVK = warme vertikale Kompaktion)

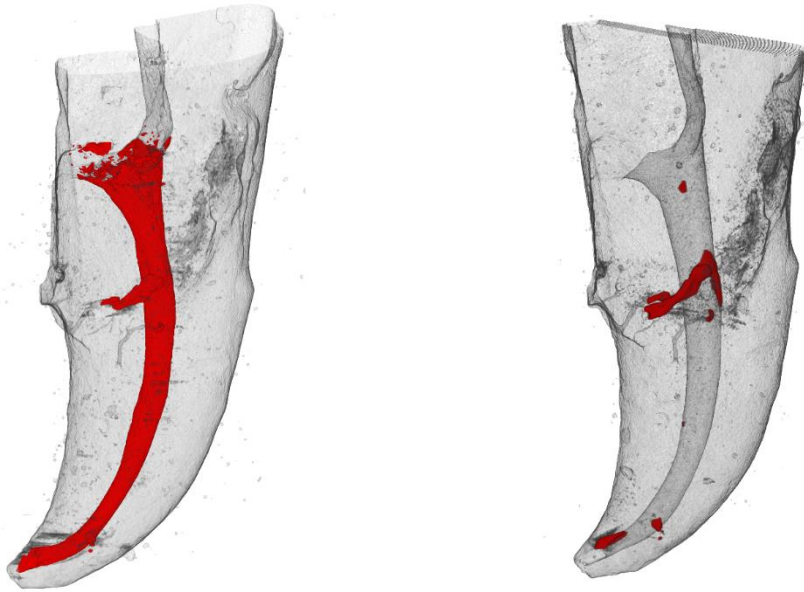


Abbildung 12: Ermittlung der Effektivität der Revision durch Beurteilung des nach der Revision im Wurzelkanal verbliebenen Füllmaterials GuttaCore beispielhaft in Form von dreidimensionalen Bildern dargestellt (Rot = Wurzelkanalfüllmaterial, vor und nach der Revision)

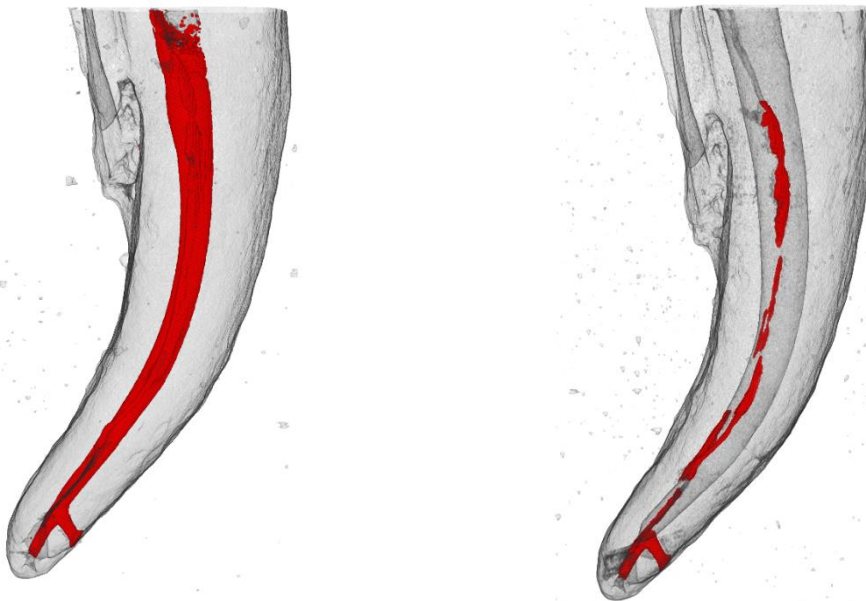


Abbildung 13: Ermittlung der Effektivität der Revision durch Beurteilung des nach der Revision im Wurzelkanal verbliebenen Füllmaterials Thermanfil beispielhaft in Form von dreidimensionalen Bildern dargestellt (Rot = Wurzelkanalfüllmaterial, vor und nach der Revision)

5.2 Dentinabtrag

In Bezug auf den während der Revisionsbehandlung erfolgten Dentinabtrag (in mm³) wurden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei verschiedenen Fülltechniken beobachtet ($p = 0,204$).

Der durchschnittliche Dentinabtrag betrug 2,7 mm³ bei der Revisionsbehandlung der warmen vertikalen Kompaktionstechnik, 3,1 mm³ bei GuttaCore und 3,2 mm³ bei Thermafil (Abbildung 14).

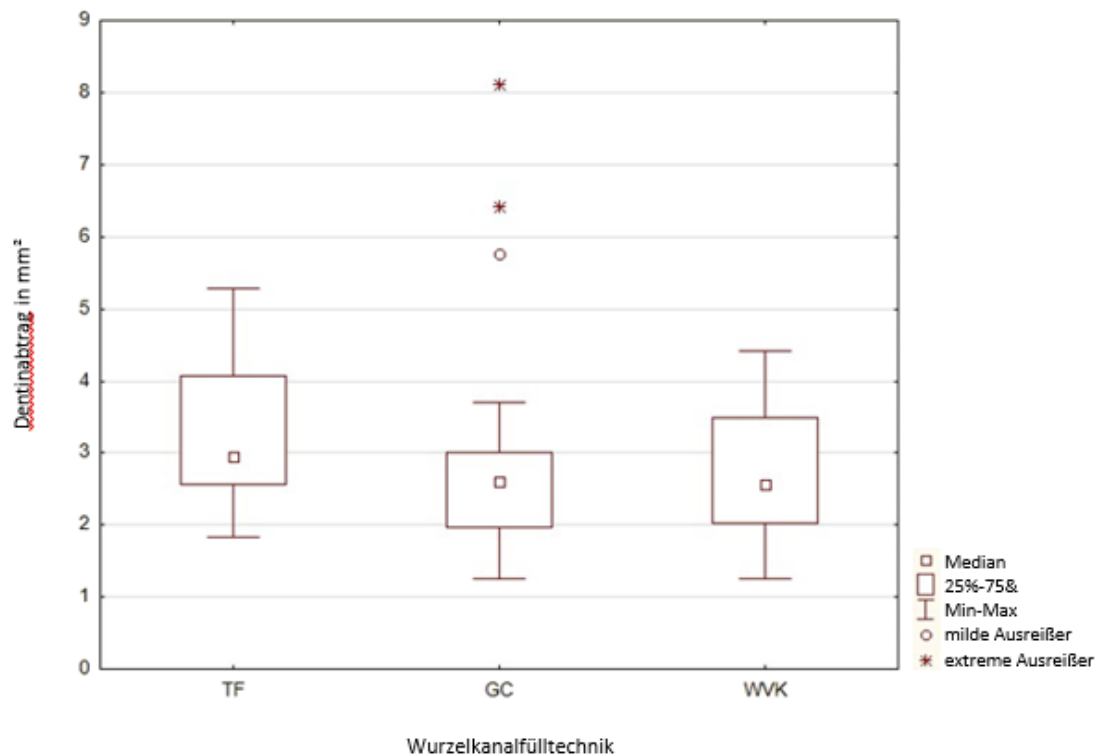


Abbildung 14: Boxplot-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrags (in mm³) während der Revision (TF = Thermafil, GC = GuttaCore, WVK = warme vertikale Kompaktion)

5.3 Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)

Die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) war bei GuttaCore mit durchschnittlich 44 s signifikant kürzer als bei Thermafil (75 s) und der warmen vertikalen Kompaktion (109 s) ($p < 0,01$). Der Vergleich von Thermafil und der warmen vertikalen Kompaktion ergab keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,844$) (Abbildung 15).

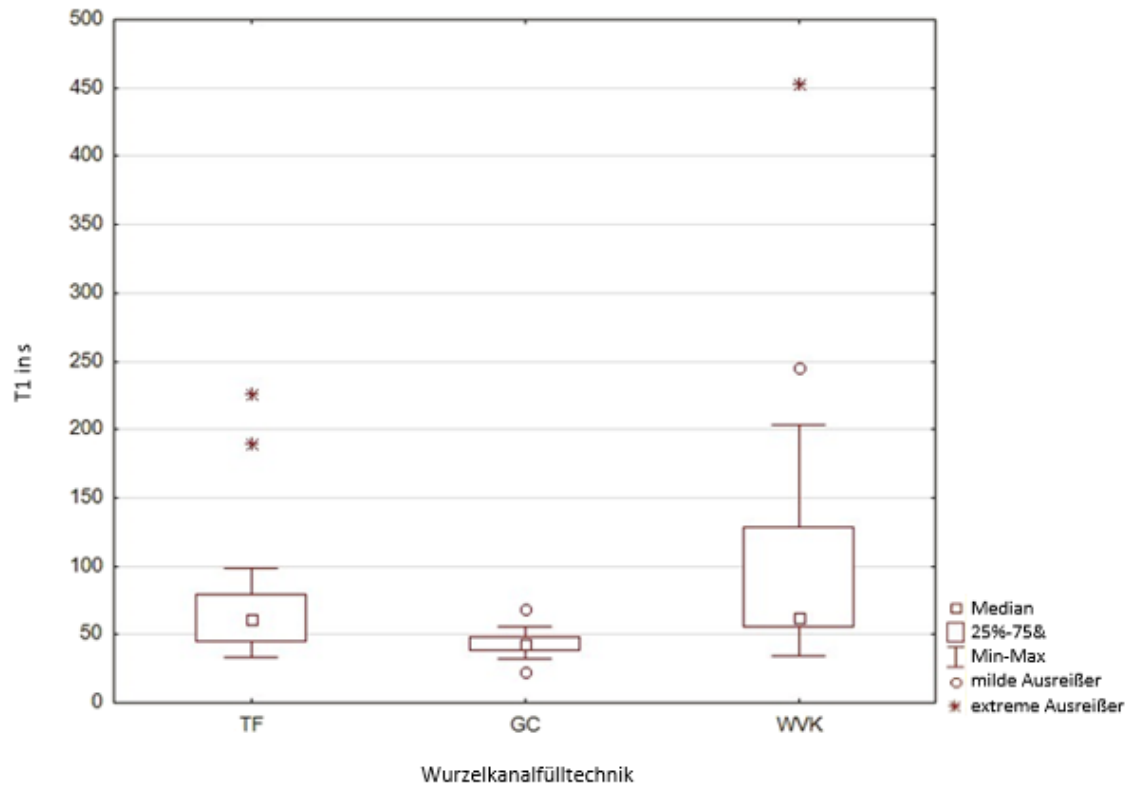


Abbildung 15: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge (TF = Thermafil, GC = GuttaCore, WVK = warme vertikale Kompaktion)

5.4 Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2)

Die durchschnittliche Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials einschließlich der apikalen Präparation bis zum Instrument X4 (T2) unterschied sich für die drei Fülltechniken nicht signifikant voneinander ($p = 0,346$). Sie lag bei der warmen vertikalen Kompaktion bei 79 s und bei den trägerbasierten Methoden bei 88 s (GuttaCore) und 100 s (Thermafil) (Abbildung 16).

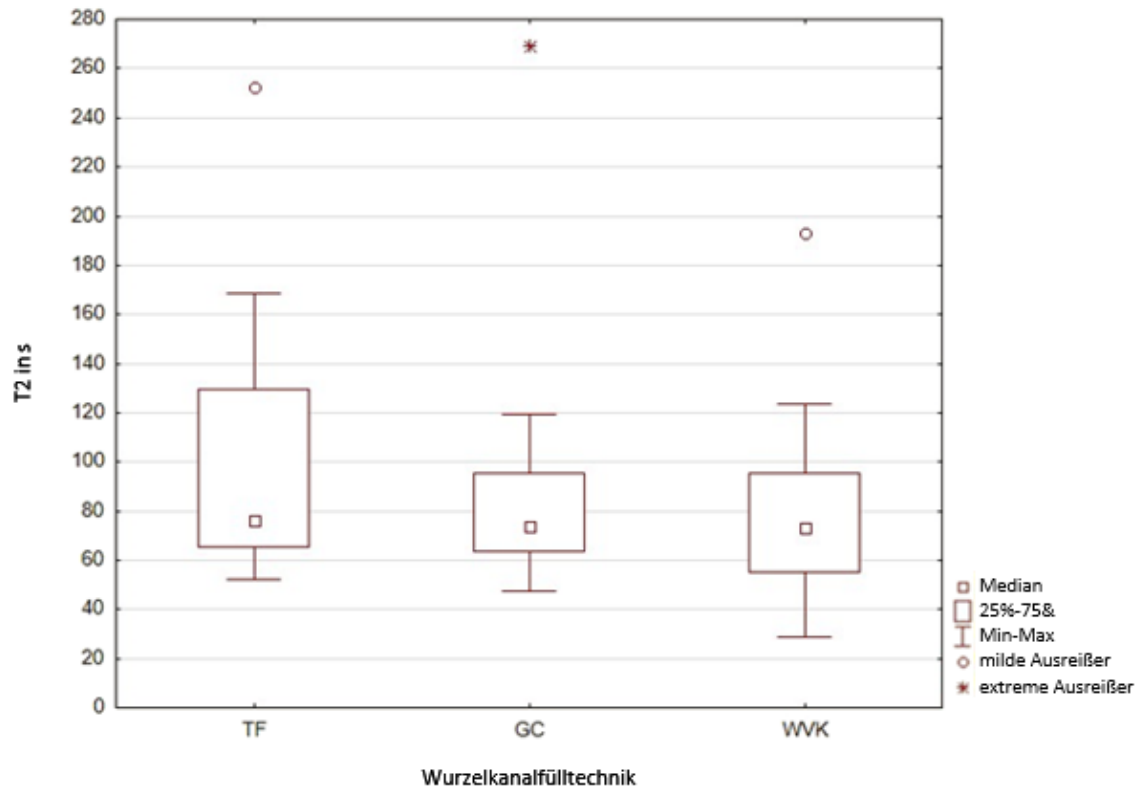


Abbildung 16: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T2 (in s) bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung und der apikalen Präparation bis zum Instrument X4 (TF = Thermafil, GC = GuttaCore, WVK = warme vertikale Kompaktion)

5.5 Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung (T_{gesamt})

Die Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung (T_{gesamt}) war bei GuttaCore mit durchschnittlich 132 s signifikant kürzer als bei Thermafil (175 s) und der warmen vertikalen Kompaktion (188 s) ($p < 0,05$). Der Vergleich von Thermafil und der warmen vertikalen Kompaktion ergab keinen signifikanten Unterschied ($p = 1$) (Abbildung 17).

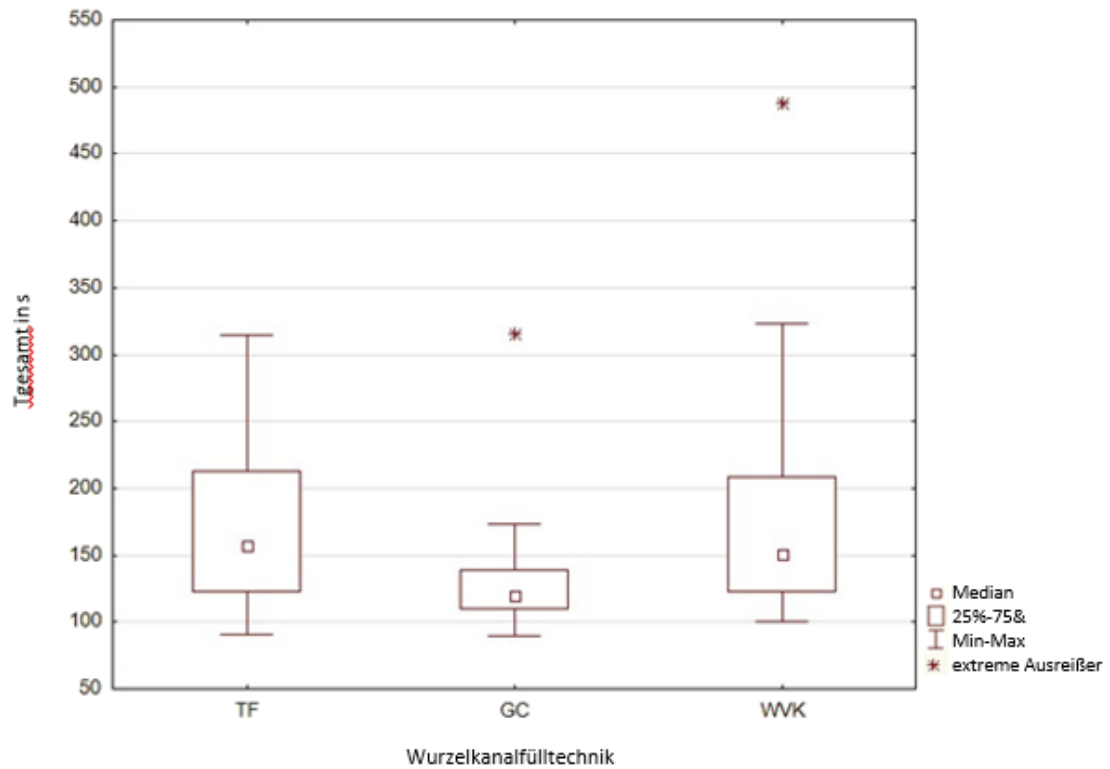


Abbildung 17: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Zeit T_{gesamt} (in s) für die gesamte Revisionsbehandlung (TF = Thermafil, GC = GuttaCore, WVK = warme vertikale Kompaktion)

5.6 Zwischenfälle

Die während der Revision aufgetretenen prozeduralen Fehler wurden notiert. Im Fall einer lateralen Perforation wurde der Zeitpunkt der Perforation als Erreichen der Arbeitslänge (T1) gewertet. Die Revision wurde entsprechend dem Revisionsprotokoll abgeschlossen und diese Zeit wurde als Zeit bis zur vollständigen Entfernung der Wurzelkanalfüllung (T2) notiert. Nach einer Perforation war das Erschließen des ursprünglichen Kanalsystems in keinem Fall möglich. In der Gruppe der warmen vertikalen Kompaktion fanden vier laterale Perforationen mit jeweils dem Instrument D3 statt, in der Thermafil-Gruppe war es eine Perforation mit dem Instrument D3 (Abbildung 18).



Abbildung 18: Lateral perforierte Wurzel

Arbeitslängenverluste wurde notiert, wenn das Eindringen des Instruments in den Kanal aufgrund einer Stufe oder ähnlichem auf vollständige Arbeitslänge nicht möglich war. Sowohl in der Thermafil- als auch der GuttaCore-Gruppe wurde jeweils ein Arbeitslängenverlust von 1 mm mit dem Instrument X2 beobachtet. Bei der warmen vertikalen Kompaktion fand in einer Probe ein Arbeitslängenverlust von 1 mm mit dem Instrument D3 statt.

Die Instrumente wurden auf Deformationen untersucht, die mit bloßem Auge sichtbar waren. In der Thermafil-Gruppe wurde eine Deformation des Instruments D1 bei der zweiten Benutzung festgestellt, während bei der warmen vertikalen Kompaktion eine Deformation bei zwei D3-Instrumenten, einmal bei der ersten und einmal bei der zweiten Benutzung, auftrat (Abbildung 19).



Abbildung 19: Deformiertes Instrument D3

Apikal extrudierter Debris wurde mit einer Ja-/Nein-Entscheidung beurteilt. Bei der Revision von Thermafil trat fünfmal apikal extrudierter Debris auf, bei der Revision von Gutta-Core sechsmal und bei der warmen vertikalen Kompaktion zweimal (Abbildung 20).



Abbildung 20: Apikal extrudierter Debris

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methode

Die vorliegende In-vitro-Studie hatte zum Ziel, drei thermoplastische Wurzelkanalfüllmaterialien in Bezug auf ihre Revidierbarkeit mit ProTaper-Universal-Retreatment-Instrumenten (PTUR) aus gekrümmten Kanälen zu vergleichen. Die untersuchten Techniken waren Thermafil, GuttaCore und die warme vertikale Kompaktion.

Das Volumen der Wurzelkanalfüllung und des Dentinabtrags wurde mittels dreidimensionaler Mikro-CT-Aufnahmen bestimmt (Barletta et al. 2008; Rödiger et al. 2012, 2014b), während der allgemeine Versuchsaufbau in Anlehnung an bereits publizierte Studien erfolgte (Gergi und Sabbagh 2007; Rödiger et al. 2012, 2014b).

6.1.1 Gruppeneinteilung

Für die vorliegende Studie wurden gekrümmte Wurzeln menschlicher Molaren verwendet. Zur Standardisierung der Versuchsbedingungen wurden diese Wurzeln anhand des Krümmungsradius und -winkels in drei statistisch homogene Gruppen eingeteilt. Da es sich bei Wurzelkanalsystemen menschlicher Zähne um komplexe dreidimensionale Strukturen handelt, wurden zunächst Röntgenbilder aus mesio-distaler und bucco-oraler Richtung angefertigt. Anhand der Röntgenbilder wurden die Krümmungswinkel der Kanäle nach der Methode von Schneider (1971) ermittelt; die Bestimmung der Krümmungsradien erfolgte nach der Methode von Schäfer et al. (2002). Diese Methoden sind theoretische geometrische Untersuchungen, die die Einteilung von Wurzelkanälen in gerade, moderat gekrümmte und stark gekrümmte Kanäle ermöglichen. Demnach wurden Wurzelkanäle mit einem Krümmungswinkel von 10-20° als moderat gekrümmt und 25-70° als stark gekrümmt klassifiziert (Schneider 1971), sodass in dieser Studie moderat und stark gekrümmte Wurzelkanäle untersucht wurden (20-45°), die einen Krümmungsradius von bis zu 12 mm hatten. Die Proben wurden entsprechend der Krümmungswinkel und -radien in drei homogene Gruppen aufgeteilt, so dass keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsgruppen vorlagen. Diese Art der Gruppeneinteilung erfolgte bereits in früheren Untersuchungen (Gergi und Sabbagh 2007; Çelik Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012, 2014b); eine vollständige Standardisierung der Wurzelkanäle ist jedoch aufgrund der anatomischen Gegebenheiten und der Komplexität insbesondere gekrümmter Wurzelkanalsysteme nicht möglich.

In vielen Studien werden gerade Wurzelkanäle (Imura et al. 2000; Hülsmann und Bluhm 2004; Masiero und Barletta 2005; Kosti et al. 2006; Kfir et al. 2012; Silva et al. 2018) oder künstliche Plastikkanäle (Hayakawa et al. 2010; Yilmaz A et al. 2017) verwendet, um die Standardisierung der Proben zu vereinfachen. Diese spiegeln jedoch die Behandlungssituation häufig nicht realistisch wider, sodass in den vergangenen Jahren vermehrt Studien an

gekrümmten Kanälen durchgeführt wurden (Gordon et al. 2005; Çelik Ünal et al. 2009; Rödig et al. 2012, 2014b; Fruchi et al. 2014; Sağlam et al. 2014; Alves et al. 2016; Teles Rodrigues et al. 2016).

6.1.2 Revision

Eines der Ziele einer idealen Revisionsbehandlung stellt die vollständige Entfernung des alten Füllmaterials aus dem Wurzelkanal dar, um anschließend eine gründliche Desinfektion des Kanalsystems durchführen zu können. Dabei sollen der Biofilm zerstört und die Anzahl der Mikroorganismen reduziert werden (Stabholz und Friedman 1988; Saunders und Saunders 1994; Nair 2006; Rossi-Fedele und Ahmed 2017), welche den Hauptgrund für das Versagen einer primären Wurzelkanalbehandlung darstellen (Nair et al. 1990; Lin et al. 1992; Siqueira et al. 1996).

Aufgrund der weiten Verbreitung von Guttapercha als Wurzelkanalfüllmaterial wurde dieses Füllmaterial auch in der vorliegenden Studie verwendet, um die Revidierbarkeit thermoplastischer Guttapercha mithilfe eines NiTi-Revisionssystems zu untersuchen. Bei thermoplastischen Materialien wird im Allgemeinen zwischen trägerbasierten und nicht-trägerbasierten Systemen unterschieden. In der vorliegenden Studie wurden Thermafil und GuttaCore als trägerbasierte Systeme und die warme vertikale Kompaktion in der *continuous wave*-Technik als nicht-trägerbasiertes System untersucht.

Thermafil besteht aus einem Kunststoffträger, der mit Guttapercha ummantelt ist. Der Träger von GuttaCore besteht aus von Guttapercha ummantelter kreuzvernetzter Guttapercha. Die verwendete warme vertikale Kompaktion ist eine Methode, bei der warme Guttapercha in den Wurzelkanal eingefüllt und zusätzlich kompaktiert wird, nachdem zuvor ein kalter Guttapercha-Stift passgenau in den apikalen Bereich des Kanals eingebracht wurde. Zur Durchführung der Revision wurde das ProTaper-Universal-Retreatment-System verwendet. Dieses System ist ein maschinelles System, das aus einer Feilen-Sequenz von NiTi-Instrumenten besteht.

Für eine gute Reinigung der Kanalwände ist eine Vergrößerung der primären apikalen Präparationsgröße um zwei Feilen-Größen notwendig (Roggendorf et al. 2010).

In der vorliegenden Studie wurde eine Vergrößerung des apikalen Kanalquerschnitts mit ProTaper-Next-Instrumenten bis 40/.06 durchgeführt, da die Kanäle bei der initialen Präparation nur bis zur Größe 30/.04 erweitert wurden. Die letzte Feile des Revisionssystems weist eine Größe von 20/.07 auf und ist somit kleiner als die letzte Feile der Primärpräparation. Eine solche apikale Erweiterung um ein bis zwei Größen nach der Anwendung von Revisionsinstrumenten fand bereits in anderen Untersuchungen statt (Rödig et al. 2012, 2014b; Silva et al. 2016).

Neben der Arbeitssicherheit der Instrumente stellt auch die für eine Revisionsbehandlung benötigte Arbeitszeit ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Effektivität eines Revisionsystems dar (Versümer et al. 2002; Beasley et al. 2013; Rödiger et al. 2014a, b; Özyürek und Oszeser-Demiryürek 2016).

In der vorliegenden Studie wurde zwischen der benötigten Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) und der nachfolgenden Entfernung der Wurzelkanalfüllung inklusive apikaler Erweiterung um zwei Größen (T2) unterschieden. Die Arbeitszeit für die gesamte Revisionsbehandlung wurde durch Addition der beiden Werte ermittelt (Tgesamt), wobei die Zeit für Instrumentenwechsel und Spülungen ausgespart wurde. Diese Methodik wurde bereits in anderen Studien angewendet (Rödiger et al. 2012, 2014b; Beasley et al. 2013).

In der vorliegenden Studie wurde die Revisionsbehandlung beendet, wenn in den Schneiden des letzten Instruments kein Wurzelkanalfüllungsmaterial mehr sichtbar und die Spülflüssigkeit klar und sauber war. Diese Ermittlung eines Endpunktes wurde bereits von anderen Studien umgesetzt (Gergi und Sabbagh 2007; Rödiger et al. 2012, 2014b; Reddy N et al. 2013). In weiteren Studien wurde die Sauberkeit der Kanalwände taktil mit Handinstrumenten überprüft (Masiero und Barletta 2005; Barletta et al. 2008; Dall'Agnol et al. 2008). Weiterhin kam auch eine röntgenologische Überprüfung des Revisionsergebnisses zum Einsatz, wobei die Revisionsbehandlung fortgesetzt wurde, wenn im Röntgenbild noch Wurzelkanalfüllungsmaterial erkennbar war (Hülsmann und Stotz 1997; Hülsmann und Bluhm 2004; Bhagavaldas et al. 2017).

Aus Strahlenschutzgründen wird das Erreichen der Arbeitslänge, ein sauberes letztes Instrument, eine saubere Spülflüssigkeit sowie die Beurteilung der Revision mittels Operationsmikroskop als Endpunkt für die Revisionsbehandlung am Patienten angesehen (Kaşıkçı Bilgi et al. 2017). In der vorliegenden Studie wurden allerdings gekrümmte Wurzelkanäle behandelt, wodurch die Beurteilung der Sauberkeit des Wurzelkanals apikal der Krümmung erschwert ist. Aus diesem Grund wurde in dieser Studie auf die Nutzung eines Operationsmikroskops verzichtet.

6.1.3 Berechnung des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials und des Dentinabtrags

Häufig wird in Studien die Effektivität eines oder mehrerer Revisionsysteme oder die Revidierbarkeit verschiedener Wurzelkanalfüllungsmaterialien ermittelt, um diese miteinander vergleichen zu können. Neben benötigter Arbeitszeit und Arbeitssicherheit wird die Effektivität daran gemessen, wie gut ein NiTi-System Wurzelkanalfüllungsmaterialien entfernt, d. h. wieviel Material nach der Revisionsbehandlung im Kanal verblieben ist (Schirrmeister et al. 2006b; Betti et al. 2009; Rödiger et al. 2012, 2014b; Özyürek und Oszeser-Demiryürek 2016, 2017). Hierfür wurden in der Literatur bereits verschiedene Verfahren beschrieben.

So wurden beispielsweise digitale Röntgenaufnahmen der Proben angefertigt, die mithilfe einer Bildbearbeitungssoftware quantitativ ausgewertet wurden (Masiero und Barletta 2005;

Gergi und Sabbagh 2007; Çelik Ünal et al. 2009). Der Nachteil dieser Methode ist die zweidimensionale Darstellung des dreidimensionalen Wurzelkanalsystems. Dieses Problem zeigt sich auch bei *clearing*-Techniken, bei denen die behandelte Wurzel mithilfe von Chemikalien transparent gemacht wurde, bevor die Menge an verbliebenem Füllmaterial mit einer Bildbearbeitungssoftware berechnet wurde (Schirrmeister et al. 2006b).

Eine andere Möglichkeit ist die Längsspaltung der Wurzeln nach der Revisionsbehandlung und die anschließende Betrachtung unter einem Mikroskop (Wilcox et al. 1987; Bertrand et al. 1997; Baratto Filho et al. 2002; Pirani et al. 2009; Kfir et al. 2012). Bei dieser Methode wird häufig zusätzlich ein Score-System verwendet, um die Menge des Füllmaterials zu quantifizieren (Hülsmann und Stotz 1997; Hülsmann und Bluhm 2004; Sae-Lim et al. 2000; Somma et al. 2008; Reddy ES et al. 2013; Grischke et al. 2014). Diese destruktive Methode birgt die Gefahr, dass bei der Längsspaltung Teile des Wurzelkanalfüllmaterials verloren gehen und damit die Genauigkeit sowie die Aussagekraft der Untersuchung vermindert wird (Barletta et al. 2008).

Eine Methode, mit der diese genannten Nachteile umgangen werden können, ist die Untersuchung des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials mittels Mikro-CT (Barletta et al. 2008; Dall'Agnol et al. 2008; Rödiger et al. 2012, 2014a, b; Martins et al. 2017), da diese Technik eine non-invasive und damit zerstörungsfreie Untersuchung der Proben ermöglicht. Dabei kann das Volumen des Wurzelkanalfüllmaterials vor und nach der Revision gemessen und die beiden Werte in ein Verhältnis zueinander gesetzt werden. Im Gegensatz dazu kann in den zuvor genannten Studien nur eine zweidimensionale Quantifizierung des Füllmaterials nach der Revision vorgenommen werden. Außerdem können die Proben nach dem Scan weiterverwendet und hinsichtlich weiterer Fragestellungen untersucht werden. Mithilfe des Mikro-CTs ist es darüber hinaus möglich, die dreidimensionale Komplexität des Wurzelkanalsystems darzustellen und verschiedene Parameter, wie z. B. das Volumen des während der Revision entfernten Dentins oder des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials zu berechnen.

Das Mikro-CT kann allerdings nur für In-vitro-Studien verwendet werden, da die Scandauer ungefähr 1 h beträgt und lediglich kleine Objekte dargestellt werden können. Einschränkungen in der Größe eines messbaren Objekts entstehen durch Limitationen der Quellgröße, der Detektorauflösung, der zur Verfügung stehenden Anzahl der Röntgenquanten und dem Probendurchmesser. Eine Erhöhung der Auflösung um den Faktor 10 führt zu einem um den Faktor 100 höheren Quantenbedarf und einem um den Faktor 10 reduzierten Probendurchmesser. Dies führt über die Berechnung der Anzahl der detektierten Bildpunkte zu einer maximalen Objektgröße von 10 mm bei einer Auflösung von 10 μm (Engelke et al. 1999).

Da in dieser Studie Wert auf eine möglichst gute Auflösung des Scans gelegt wurde, um qualitativ hochwertige Bilder und somit möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, dauerte ein Scan einer Probe 1 h und 1 min. Die Dauer des Scans verlängert sich je nach Erhöhung der Auflösung, da mehr Aufnahmen pro Probe erstellt werden. In dieser Studie betrug die

Auflösung 10,5 μm und war somit höher als in vielen anderen aktuellen Studien, in denen sie zwischen 16,7 μm und 29 μm lag (Rödig et al. 2014b; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Yilmaz F et al. 2018; Silveira et al. 2018). Eine hohe Auflösung bedingt allerdings auch sehr große Datensätze, was sowohl einen ausreichend großen Speicherplatz als auch einen Computerarbeitsplatz mit hoher Leistungsfähigkeit voraussetzt.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Erstellung von Mikro-CT-Aufnahmen ist, dass keine allgemeingültigen Werte und Einstellungen für die Auswertung der Bilder vorhanden sind. Für die Rekonstruktion der Datensätze wurden vier Software-Parameter (*beam hardening*, *smoothing*, *post-alignment* und *ring artefact reduction*) individuell so festgelegt, dass eine dreidimensionale Rekonstruktion der Daten mit den bestmöglichen Einstellungen erfolgte. Ein optimales Ergebnis war nicht in allen Fällen zu erreichen, da trotz einer Verrechnung der Daten mit einem Referenzscan Artefakte während des Scanvorgangs durch beispielsweise minimale Erschütterungen des Mikro-CTs auftraten. Diese Artefakte wurden jedoch größtenteils durch den Einsatz nicht-röntgenopaker Schaumstoffschwämmchen reduziert, die zur Stabilisation der Probe eingesetzt wurden.

Eine andere Möglichkeit für die Entstehung von Artefakten stellt der Partialvolumeneffekt dar. Dieser Effekt bedeutet, dass ein Voxel des Scans aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung verschiedene Gewebe enthalten kann. In dem Fall wird ein Durchschnittsgrauwert der im Voxel vorhandenen Gewebe für dieses Voxel errechnet. Das kann dazu führen, dass einem Gewebe ein deutlich höheres Volumen, also mehr vollständig gefüllte Voxel, zugerechnet werden, während einem anderen Gewebe nicht vollständig gefüllte Voxel abgezogen werden, wodurch diagnostische Fehlinterpretationen resultieren können (Hathcock und Stickle 1993; Wang und Fei 2012). Um den Partialvolumeneffekt möglichst gering zu halten, sollte eine kleine Schichtdicke für die Scaneinstellungen gewählt werden. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Studie eine für aktuelle Untersuchungen sehr hohe Auflösung von 10,5 μm gewählt.

Bei der Volumenberechnung von verbliebenem Wurzelkanalfüllmaterial und abgetragendem Dentin mussten Schwellenwerte festgelegt werden, die in dem durch die Rekonstruktion entstandenen Histogramm die Übergänge zwischen Luft, Dentin und Wurzelkanalfüllmaterial markierten. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass es trotz standardisierter Scaneinstellungen keinen einheitlichen Anfangsschwellenwert für die Bestimmung des Dentins gab. Ein Grund dafür könnte ein verschiedenes Alter der Zähne und somit altersbedingte Unterschiede in der Dicke des Dentins sein, welches die Röntgenstrahlen in unterschiedlichem Ausmaß absorbiert. Im Gegensatz dazu war die Festlegung der Schwellenwerte für die Bestimmung des Wurzelkanalfüllmaterials eindeutig, da ein hoher Kontrast sowohl zwischen Luft und Füllmaterial als auch zwischen Dentin und Füllmaterial vorlag.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial

Eines der wichtigsten Ziele der Revisionsbehandlung stellt die vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllungsmaterials dar, um mithilfe einer erneuten gründlichen Desinfektion im Kanalsystem persistierende Mikroorganismen zu eliminieren.

In der vorliegenden Studie konnte allerdings keine Probe vollständig von Füllmaterial gereinigt werden. Diese Beobachtung wird von anderen Studien bestätigt, welche die Revision von Thermafil (Pirani et al. 2009; Beasley et al. 2013), GuttaCore (Beasley et al. 2013; Nevares et al. 2015) oder warmer vertikaler Kompaktion (Cavenago et al. 2014; Keleş et al. 2014) untersuchten. Auch Studien, in denen andere Wurzelkanalfülltechniken oder Revisionstechniken analysiert wurden, berichteten von keiner vollständig gesäuberten Probe (Hammad et al. 2008; Marfisi et al. 2010; Yürüker et al. 2016; Martins et al. 2017; Silva et al. 2018).

Die durchschnittlichen Mengen verbliebenen Wurzelkanalfüllungsmaterials lagen in dieser Studie bei 14,2%-19,3%. Diese Werte sind 2-3mal höher als in vergleichbaren Mikro-CT-Studien mit ähnlichem Versuchsaufbau (Rödig et al. 2012, 2014b). In diesen Studien wurde die Revision von kalter lateral kompaktierter Guttapercha aus gekrümmten Kanälen mittels Hedström-Feilen und den maschinellen Systemen D-RaCe, Reciproc und ProTaper Universal Retreatment untersucht. Der Anteil an verbliebenem Wurzelkanalfüllmaterial lag hier bei 3,7%-11,3% (Rödig et al. 2012, 2014b). Eine mögliche Ursache für diese unterschiedlichen Ergebnisse sind die verschiedenen Wurzelkanalfülltechniken. Die durch Erwärmung plastifizierte Guttapercha kann besser in Seitenkanäle und Irregularitäten des Kanalsystems kompaktiert werden. Daraus resultieren ein signifikant höher gefüllter Anteil des Kanalsystems und weniger Hohlräume in der Wurzelkanalfüllung als bei lateraler Kompaktion kalter Guttapercha (Wu et al. 2001; Li et al. 2014; Schäfer et al. 2016). Dadurch kann die plastifizierte Guttapercha schlechter wieder entfernt werden. Mit bisherigen Revisionssystemen ist die Entfernung von Guttapercha besonders aus Seitenkanälen und Irregularitäten nahezu unmöglich (Ma et al. 2012; Cavenago et al. 2014). Aufgrund der komplexen Anatomie und der schlechten Zugänglichkeit des Apikalbereichs (Hsu und Kim 1997) kann Guttapercha aus diesen Bereichen schwerer entfernt werden (Sae-Lim et al. 2000; Ferreira et al. 2001; Hülsmann und Bluhm 2004). Auch in der vorliegenden Studie wurde viel verbliebenes Füllmaterial im Apikalbereich gefunden.

Die in der vorliegenden Studie ermittelten Werte für verbliebenes Füllmaterial sind mit den Daten von Pawar et al. (2016) vergleichbar, die nach der Revision thermoplastischer Guttapercha verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial in Höhe von 7%-26% beobachteten. Jedoch gibt es auch Studien, die verbliebenes Material von nur 3,98%-8,68% nach der Revision thermoplastischer Guttapercha angeben (Masiero und Barletta 2005; Nevares et al. 2015). Allerdings wurden diese Ergebnisse durch eine zweidimensionale Auswertung mit Röntgenbildern oder durch Längsspaltung der Proben erhoben und nicht mittels Mikro-CT wie in der

vorliegenden Studie.

Andere Mikro-CT-Studien zur Entfernung von Guttapercha aus gekrümmten Kanälen von Molaren gaben 4%-38% verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial an und stimmen daher mit den Resultaten der vorliegenden Untersuchung überein (Cavenago et al. 2014; Fruchi et al. 2014; Sağlam et al. 2014; Alves et al. 2016).

In der vorliegenden Studie wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen dem verbliebenen Füllmaterial nach der Revision der trägerbasierten Wurzelkanalfüllungsmaterialien und der vertikal kompaktierten Guttapercha festgestellt. Ähnliche Ergebnisse traten nach der Revision von Thermafil, GuttaCore und warmer vertikaler Kompaktion und Auswertung der mittels Längsspaltung untersuchten Proben auf (Nevares et al. 2016). Auch beim Vergleich der Revision von Thermafil und warmer vertikaler Kompaktion mittels Rasterelektronenmikroskop wurden keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial festgestellt (Pirani et al. 2009).

6.2.2 Zahnhartsubstanzverlust

Bei einer Revisionsbehandlung sollte neben der Entfernung des alten Füllmaterials auch mit Bakterien infiziertes Dentin entfernt werden (Dalton et al. 1998). Auf der anderen Seite führt die unnötige Entfernung von zu viel Zahnhartsubstanz dazu, dass die anatomische Form des Wurzelkanals verändert und der Zahn fraktur- oder perforationsanfälliger wird (Hülsmann et al. 2011).

Die Verwendung eines Mikro-CTs ermöglichte, anders als andere in der Forschung verwendete Untersuchungsmethoden, durch die Erstellung prä- und postoperativer Bilder die quantitative Darstellung des bei der Revision entfernten Dentins (Rödig et al. 2012, 2014b). In der vorliegenden Studie wurde unabhängig von der Füllmethode ein durchschnittlicher Dentinabtrag von 2,7-3,2 mm³ ermittelt. Wie zuvor beschrieben, führt eine um zwei Größen erweiterte Apikalpräparation in Bezug auf die Sauberkeit des Kanals zu einem signifikant besseren Ergebnis (Hassanloo et al. 2007; Roggendorf et al. 2010). Da in dieser Studie eine standardisierte Instrumentensequenz für eine Erweiterung der Apikalpräparation verwendet wurde, musste mit einem gewissen Dentinabtrag gerechnet werden. Eine vergleichbare Mikro-CT-Studie untersuchte die Revision von kalter, lateral kompaktierter Guttapercha mittels Hedström-Feilen, PTUR und D-RaCe und stellte einen Dentinabtrag von 6,3-13,1 mm³ fest (Rödig et al. 2012). Bei ähnlichem Versuchsaufbau und der Untersuchung von Hedström-Feilen, PTUR und Reciproc wurde ebenfalls ein höherer Dentinabtrag von 4,7-6,5 mm³ ermittelt (Rödig et al. 2014b).

Eine andere Studie untersuchte das Revisionsverhalten von ProTaper Next und Reciproc an warmer vertikal kompaktierter Guttapercha (Nevares et al. 2016). Ermittelt wurden Dentinabträge von 3,17-3,5 mm³ und somit ähnliche Werte wie in der vorliegenden Studie.

Der Dentinabtrag ist auch von dem verwendeten Instrumententyp abhängig. So wurde generell erörtert, dass rotierende Instrumente die Kanalmorphologie stärker verändern als beispielsweise reziproke Instrumente oder die *Self-Adjusting File* (Versiani et al. 2013). Eine weitere Erklärung für den unterschiedlichen Dentinabtrag könnten untersucherbezogene Unterschiede wie zum Beispiel die Intensität der bürstenden Bewegungen bei der Benutzung der Instrumente sein (Rödig et al. 2012, 2014b).

6.2.3 Arbeitszeit

Aus Rücksicht auf den Komfort des Patienten sollte eine Revisionsbehandlung möglichst zeitsparend durchgeführt werden (Beasley et al. 2013). Demzufolge spielt auch die zum Entfernen der Wurzelkanalfüllung benötigte Arbeitszeit in der Beurteilung der Effektivität einer Revisionsbehandlung eine Rolle. Hinsichtlich des durchschnittlichen Zeitaufwands bis zum Erreichen der Arbeitslänge war die Entfernung von GuttaCore signifikant am schnellsten. Die Zeiten lagen bei durchschnittlich 44-109 s. Bei der Revision von GuttaCore mit PTUR wurde die Arbeitslänge mit 36,83-114,7 s signifikant schneller als bei der Revision von warmer, vertikal kompakterer Guttapercha erreicht (Jorgensen et al. 2017). Auch eine weitere Studie berichtete über eine signifikant geringere Revisionszeit für GuttaCore als für Thermafil und die warme vertikale Kompaktion mit durchschnittlichen Werten von 24,9-38,1 s bei Verwendung des PTUR-Systems (Beasley et al. 2013). Eine mögliche Erklärung für die im Vergleich zur vorliegenden Studie geringere Arbeitszeit trotz Anwendung des gleichen Revisionsystems und der gleichen Rotationsgeschwindigkeiten könnten die Krümmungswinkel der Proben sein. Beasley et al. (2013) verwendeten in ihrer Studie Wurzeln mit einem Krümmungswinkel von durchschnittlich 23,0-24,4°, während die Krümmungswinkel in der vorliegenden Studie durchschnittlich 26,9-27,1° betragen. Auch Krümmungsradius oder untersucherabhängige Parameter wie apikalwärts gerichteter Druck während der Instrumentation könnten eine Erklärung für abweichende Werte der Arbeitszeit sein.

Die signifikant schnellere Entfernung von GuttaCore lässt sich damit erklären, dass der aus kreuzvernetzter Guttapercha bestehende Träger effektiv mit den PTUR-Instrumenten entfernt werden kann (Beasley et al. 2013).

In der vorliegenden Studie wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Thermafil und der warmen vertikalen Kompaktion in Bezug auf die benötigte Zeit zum Erreichen der Arbeitslänge festgestellt. Ein Grund hierfür könnte sein, dass bei der vertikalen Kompaktion die thermoplastische Guttapercha homogen verdichtet (Lea et al. 2005) und somit die Penetration von Instrumenten erschwert wird.

Generell wurden in dieser Studie keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der für die vollständige Entfernung des Füllmaterials benötigten Arbeitszeit beobachtet. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass nach Erreichen der Arbeitslänge bereits ein großer Teil der Wurzelfüllung entfernt wurde, in dem sich vermutlich auch der gegebenenfalls vorhandene Träger

befand, der den am schwierigsten zu entfernenden Teil der Wurzelkanalfüllung darstellt (Baratto Filho et al. 2002).

Aus den beiden bereits erläuterten Parametern ergibt sich ein ebenfalls signifikanter Unterschied in Bezug auf die für die gesamte Revisionsbehandlung benötigte Arbeitszeit. Diese war für die Revision von GuttaCore signifikant geringer und betrug durchschnittlich 132-188s für alle drei Fülltechniken.

In einer vergleichbaren Studie wurde ebenfalls ein signifikanter Unterschied von GuttaCore zu Thermafil und warmer vertikaler Kompaktion beobachtet (Beasley et al. 2013), während in einer anderen Studie (Nevares et al. 2015) festgestellt wurde, dass die gesamte Arbeitszeit mit PTUR bei GuttaCore signifikant schneller war als bei Thermafil, es jedoch keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur warmen vertikalen Kompaktion gab. Bei der Untersuchung der Entfernung von Thermafil mit Handinstrumenten ergaben sich deutlich höhere Arbeitszeiten von 6,5-7 min (Bertrand et al. 1997), sodass NiTi-Instrumente für die Entfernung von trägerbasierten Füllmaterialien empfohlen werden können.

Im Vergleich zu ähnlichen Mikro-CT-Studien zur Revision kalter, lateral kompakterer Guttapercha mit PTUR sind die benötigten Arbeitszeiten mit 272 s (Rödig et al. 2012) bzw. 122 s (Rödig et al. 2014b) vergleichbar. Für die Revision von kalter Guttapercha mit PTUR aus geraden Kanälen wurde eine Gesamtarbeitszeit von 228 s benötigt (Somma et al. 2008). Daraus kann man schlussfolgern, dass die Arbeitszeit untersucherabhängig ist und beispielsweise von dem apikalen Druck, mit dem das Instrument in den Kanal eingebracht wird sowie der Intensität der Bürstbewegung, mit der das Wurzelkanalfüllmaterial von der Kanalwand entfernt wird, beeinflusst wird. Die Arbeitszeit ist ebenfalls abhängig von den verwendeten Instrumenten, der Art der Wurzelkanalfüllung und der Länge des zu revidierenden Materials.

6.2.4 Prozedurale Fehler

Das letzte wichtige Kriterium für die Beurteilung der Effektivität einer Revisionsbehandlung ist das Auftreten prozeduraler Fehler. In der vorliegenden Studie wurden die maschinellen NiTi-Systeme mit einem drehzahl- und drehmomentkontrollierten Motor betrieben. Dazu wurde ein auf den Angaben des Herstellers basierendes Präparationsprotokoll erstellt, das die optimale Arbeitsweise der Feilen gewährleisten sollte. In Vorversuchen wurden alle Einstellungen getestet und der fachgerechte Umgang mit den Instrumenten eingeübt. Für die Studie selbst wurden ausschließlich unbenutzte Instrumente verwendet, die entsprechend den Herstellerangaben nach Deformation oder spätestens viermaliger Benutzung ausgetauscht wurden. Die limitierte Benutzung der Feilen soll einer Instrumentenfraktur vorbeugen, die in der Regel durch zyklische Ermüdung, Drehmomentbelastung oder einer Kombination aus beidem entsteht (Plotino et al. 2009). Die Fraktur durch Drehmomentbelastung erfolgt durch die Überschreitung eines legierungsspezifischen Drehmoments im Wurzelkanal, während die Fraktur durch zyklische Ermüdung durch eine Benutzung in gekrümmten Kanälen auftreten kann (Sattapan et al. 2000).

In der vorliegenden Studie wurden die NiTi-Instrumente mit dem bloßen Auge beurteilt. Dabei wurden drei Deformationen des PTUR-Systems entdeckt, Instrumentenfrakturen traten nicht auf. Diese Zahlen liegen deutlich unter denen von Sattapan et al. (2000), die in ihrer Untersuchung 24,1% Deformationen und 20,9% Frakturen bei bereits verwendeten NiTi-Instrumenten feststellten. Allerdings war die Anzahl der Benutzungen der Instrumente vor Untersuchung unbekannt und die Feilen wurden mittels eines Mikroskops beurteilt.

Zusätzlich zu den drei Instrumentendeformationen traten in der vorliegenden Untersuchung fünf Perforationen der lateralen Kanalwand mit der D3-Feile des PTUR-Systems auf. Diese Perforationen fanden in Wurzeln mit einem engen Krümmungsradius von 4-7 mm und vorwiegend bei Proben aus der Gruppe der warmen vertikalen Kompaktion statt. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Guttapercha bei der warmen vertikalen Kompaktion deutlich homogener als bei den trägerbasierten Methoden verdichtet wird. Die Perforationen fanden hauptsächlich im apikalen Drittel im Übergang vom geraden zum gekrümmten Kanalanteil statt. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass PTUR besonders im apikalen Drittel eine Tendenz zu exzentrischer Kanalpräparation zeigt (Gogulnath et al. 2015). Dies wird auf das konvexe dreieckige Design der PTUR-Feilen und die hohe Konizität der D3-Instrumente von 7% zurückgeführt. Instrumente mit einer Konizität von über 4% tragen zu prozeduralen Fehlern wie Perforationen bei, da sie deutlich starrer als Instrumente mit geringerer Konizität sind und so vor allem in gekrümmten Kanälen zu Kanalabweichungen führen können (Schäfer et al. 2003).

Der Anteil lateraler Perforationen lag in dieser Studie bei 8%. Damit ist sie im Rahmen bisheriger Studien, die prozedurale Fehler von 0% (Sağlam et al. 2014) bis 36% Instrumentenfrakturen (Çelik Ünal et al. 2009) und 15% laterale Perforationen (Çelik Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2014b) angaben.

Im Allgemeinen ist die Untersuchung der Arbeitssicherheit endodontischer Instrumente wichtig, da prozedurale Fehler die Behandlung erschweren (Martins et al. 2017) und die Prognose negativ beeinflussen können (Spili et al. 2005; Ungerechts et al. 2014). Besonders in gekrümmten Kanälen ist die Gefahr eines prozeduralen Fehlers bei der Revisionsbehandlung hoch (Schirrmeister et al. 2006b; Özyürek und Ozsezer-Demiryürek 2017).

Zur Verhinderung prozeduraler Fehler und zur Beschleunigung der Revisionsbehandlung können Lösungsmittel eingesetzt werden (Tamse et al. 1986; Wilcox 1993; Wolcott et al. 1999; Hülsmann und Bluhm 2004; Aydın et al. 2009; Ma et al. 2012; Bhagavaldas et al. 2017). Diese Lösungsmittel erweichen die Guttapercha, sodass vor allem das erste Eindringen in die kompaktierte Wurzelkanalfüllung erleichtert wird. In der vorliegenden Studie wurden keine Lösungsmittel verwendet, wodurch gegebenenfalls die Anzahl prozeduraler Fehler erhöht wurde. Durch die Benutzung der D1-Feile des PTUR-Systems mit schneidender Spitze soll laut Herstellerangaben das Eindringen in koronale Guttapercha auch ohne Lösungsmittel erleichtert werden, da Lösungsmittel in der klinischen Anwendung verschiedene Risiken

mit sich bringen können. Chloroform gilt zwar als das effektivste Lösungsmittel für Guttapercha (Tamse et al. 1986; Wilcox 1993; Wolcott et al. 1999), wird jedoch als nephro- und hepatotoxisch sowie kanzerogen eingestuft (Wennberg und Ørstavik 1989; Zakariasen et al. 1990). Weiterhin bildet sich durch die Verflüssigung der Guttapercha häufig eine dünne Schicht erweichten Füllmaterials, die in die Dentinkanälchen gepresst wird und die Wirksamkeit der desinfizierenden Spüllösungen behindert (Sae-Lim et al. 2000; Horvath et al. 2009). Eine mögliche Veränderung der Zahnhartsubstanz durch Lösungsmittel ist umstritten (Rotstein et al. 1999; Doğan et al. 2001; Erdemir et al. 2004).

Als weitere Komplikation einer Revisionsbehandlung wird auch die apikale Extrusion von Debris gewertet. Während der Primär- oder Revisionsbehandlung in die periapikalen Gewebe extrudierter Debris kann zu postoperativen Schmerzen des Patienten führen (Seltzer und Naidorf 1985). In der vorliegenden Studie wurde extrudierter Debris mit bloßem Auge und einer Ja-/Nein-Entscheidung beurteilt. Dabei wurde in der ThermoFil-Gruppe fünfmal, in der GuttaCore-Gruppe sechsmal und in der Gruppe der warmen vertikalen Kompaktion zweimal extrudierter Debris beobachtet.

Bisherige Untersuchungen zu dem Thema liefern sehr kontroverse Ergebnisse. So stellte eine Studie fest, dass bei der Nutzung von PTUR signifikant weniger Debris extrudiert wurde als bei der Nutzung von Handinstrumenten (Huang et al. 2007), während andere Autoren bei der Verwendung von PTUR signifikant mehr extrudierten Debris beobachteten (Somma et al. 2008). Eine weitere Studie stellte keine signifikanten Unterschiede in der Menge extrudierten Debris bei PTUR und Hedström-Feilen fest (Delai et al. 2018). Eine Erklärung für das geringere Auftreten von extrudiertem Debris bei den Proben mit der warmen vertikalen Kompaktion kann die Verwendung einer Guttapercha-Spitze mit apikaler Klemmpassung sein. Dieser passgenaue Stopp der Wurzelkanalfüllung könnte bei der Revision als Verschluss dienen, sodass weniger Debris aus dem Kanal gepresst wurde.

7 Schlussfolgerungen

1. Keine der mittels warmer Fülltechniken durchgeführten Wurzelfüllungen wurde durch ProTaper Universal Retreatment vollständig entfernt.
2. Zwischen den verschiedenen Techniken gab es keine signifikanten Unterschiede in der Menge des nach der Revision im Wurzelkanal verbliebenen Füllmaterials.
3. Es lagen keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Füllmethoden in der Menge des bei der Revision entfernten Dentins vor.
4. Bei der Revision von GuttaCore wurde die Arbeitslänge signifikant schneller erreicht als bei der Revision von Thermafil oder der warmen vertikalen Kompaktion.
5. Die für die gesamte Revisionsbehandlung benötigte Arbeitszeit war bei der Revision von GuttaCore signifikant schneller als bei Thermafil oder der warmen vertikalen Kompaktion. Zwischen Thermafil und der warmen vertikalen Kompaktion traten diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede auf.
6. Bei der warmen vertikalen Kompaktion traten in 20% der Fälle laterale Perforationen auf. In der Thermafil-Gruppe wurden 5% laterale Perforationen beobachtet.
7. Extrudierter Debris trat bei der Revision von allen drei Füllmethoden auf.

8 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, die Effektivität von ProTaper Universal Retreatment hinsichtlich der Revidierbarkeit von drei thermoplastischen Wurzelkanalfüllmaterialien (Thermafil, GuttaCore, warme vertikal kompaktierte Guttapercha) aus gekrümmten Kanälen mittels Mikro-CT zu untersuchen.

Hierfür wurden 60 Wurzeln extrahierter menschlicher Molaren nach röntgenologischer Ermittlung ihrer Krümmungswinkel und -radien in drei homogene Gruppen eingeteilt ($n = 20$). Die Kanäle wurden mit dem NiTi-System ProFile bis zur Größe 30/.04 präpariert und anschließend mit Sealer und den trägerbasierten Methoden Thermafil oder GuttaCore oder mit warmer, vertikal kompakterter Guttapercha gefüllt. Daraufhin erfolgte ein präoperativer Scan der Wurzeln im Mikro-CT. Die Entfernung des Füllmaterials wurde maschinell mit den ProTaper-Universal-Retreatment- (PTUR) und ProTaper-Next-Instrumenten durchgeführt. Dabei wurde die benötigte Arbeitszeit gemessen sowie prozedurale Fehler während der Revision notiert. Anschließend wurde ein postoperativer Scan der Wurzeln im Mikro-CT angefertigt. Mithilfe der dreidimensionalen Mikro-CT-Bilder wurden die Mengen des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials und des Dentinabtrags berechnet und statistisch ausgewertet.

Es wurden keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das im Kanal verbliebene Füllmaterial und den Dentinabtrag zwischen den drei Füllmethoden festgestellt ($p > 0,05$). Eine vollständige Reinigung des Kanals mittels PTUR war in keinem Fall möglich. Mit PTUR wurde die trägerbasierte Füllmethode GuttaCore mit einer signifikant geringeren Arbeitszeit aus dem Kanalsystem revidiert als Thermafil oder vertikal kompaktierte Guttapercha ($p = 0,027$). Zwischen Thermafil und der warmen vertikalen Kompaktion gab es in Bezug auf die benötigte Arbeitszeit keine signifikanten Unterschiede. Prozedurale Fehler in Form von lateralen Perforationen der Wurzel und deformierten Instrumenten traten vorwiegend in der Gruppe der warmen vertikalen Kompaktion auf, während extrudierter Debris in allen Gruppen beobachtet wurde.

9 Anhang

9.1 Materialliste

Aufgeführt sind alle in Kapitel 4 verwendeten Materialien und ihre Bezugsquellen, alphabetisch geordnet.

Verbrauchsmaterialien:

AH Plus Jet Sealer: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Cavit: 3M Espe, Neuss

Diamant-Schleifkörper: Komet, Lemgo

Endo-Rosenbohrer, Größe 006: Komet, Lemgo

Endo-Rosenbohrer, Größe 010: Komet, Lemgo

Gates-Glidden-Bohrer: Henry Schein, Melville, NY, USA

GuttaCore-Obturator, Größe 25: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Guttapercha Points, ISO- Größe 25: VDW, München

Guttapercha Points, Größe 25, Konizität 4%: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Guttapercha Points, Größe 30, Konizität 4%: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Hedström-Feilen: Henry Schein, Melville, NY, USA

iBond Universal: Heraeus Kulzer, Hanau

Isopropyl-Alkohol 70%: V/V Hetterich, Firma Hetterich, Fürth

Natriumhypochlorit-Lösung, 1%: Hedinger, Stuttgart

OHPen: Stabilo, Heroldsberg

Papierspitzen, Größe 15-40: Henry Schein, Melville, NY, USA

Peripherie-Wachs: Yeti Dental, Engen

Plugger, Größe 1 und 2: Henry Schein, Melville, NY, USA

Plugger, Größe 3 und 4: Henry Schein, Melville, NY, USA

ProFile-Instrumente: Dentsply Sirona, York, PA, USA

ProTaper-Next-Instrumente: Dentsply Sirona, York, PA, USA

ProTaper-Universal-Retreatment-Instrumente: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Reamer, ISO-Größe 10: Henry Schein, Melville, NY, USA

Reamer, ISO-Größe 15: Henry Schein, Melville, NY, USA

Scaler: Henry Schein, Melville, NY, USA

Silaplast FUTUR: Detax Dental, Ettlingen

Spritze, 5 ml: Becton Dickinson SA, Franklin Lakes, NJ, USA

Spülkanüle, Größe 30: Ultradent, München

Thermafil-Obturator, Größe 25: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Venus Diamond: Heraeus Kulzer, Hanau

Verifier, Größe 25: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Zitronensäure-Lösung 10%: Speiko - Dr. Speiher GmbH, Münster

Maschinelle Geräte:

BeeFill 2in1: VDW, München

Endo IT Control Motor: VDW, München

Mikro-CT SkyScan 1272: Bruker MicroCT, Kontich, Belgien

Röntgengerät Heliodent Plus: Sirona, Bensheim

Rotes Winkelstück: KaVo, Bieberach an der Riss

Thermaprep 2 Ofen: Dentsply Sirona, York, PA, USA

Winkelstück, Übersetzung 4:1: W&H Dentalwerk, Bürmoos, Österreich

Software-Programme:

CTAnalyser 1.16 4.1: Bruker MicroCT, Kontich, Belgium

CTvox 3.2.0: Bruker MicroCT, Kontich, Belgien

DataViewer 1.5.2.4: Bruker MicoCT, Kontich, Belgien

ImageJ 1.49v: National Institute of Health, Bethesda, MD, USA

NRecon 1.7.0.3: Bruker MicroCT, Kontich, Belgien

Statistica 12: Dell Inc. StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA

10 Literaturverzeichnis

- Akbar I (2015): Radiographic study of the problems and failures of endodontic treatment. *Int J Health Sci* 2, 111–118
- Allen RK, Newton CW, Brown CE (1989): A statistical analysis of surgical and nonsurgical endodontic retreatment cases. *J Endod* 15, 261–266
- Alves F, Marceliano-Alves M, Sousa J, Silveira S, Provenzano J, Siqueira J Jr (2016): Removal of root canal fillings in curved canals using either reciprocating single- or rotary multi-instrument systems and a supplementary step with the XP-Endo Finisher. *J Endod* 42, 1114–1119
- Aydın B, Köse T, Çalışkan MK (2009): Effectiveness of HERO 642 versus hedström files for removing gutta-percha fillings in curved root canals: an ex vivo study. *Int Endod J* 42, 1050–1056
- Baratto Filho F, Ferreira EL, Fariniuk LF (2002): Efficiency of the 0.04 taper ProFile during the retreatment of gutta-percha-filled root canals. *Int Endod J* 35, 651–654
- Barletta FB, Rahde N de M, 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
- 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
- Beasley RT, Williamson AE, Justman BC, Qian F (2013): Time required to remove GuttaCore, Thermafil Plus, and thermoplasticized gutta-percha from moderately curved root canals with ProTaper files. *J Endod* 39, 125–128
- Bender IB, Seltzer S, Turkenkopf S (1964): To culture or not to culture? *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 18, 527–540
- Bergenholtz G, Lekholm U, Milthon R, Heden G, Odesjö B, Engström B (1979): Retreatment of endodontic fillings. *Scand J Dent Res* 87, 217–224
- Bertrand MF, Pellegrino JC, Rocca JP, Klinghofer A, Bolla M (1997): Removal of Thermafil root canal filling material. *J Endod* 23, 54–57
- 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, e46-50
- Bhagavaldas MC, Diwan A, Kusumvalli S, Pasha S, Devale M, Chava DC (2017): Efficacy of two rotary retreatment systems in removing gutta-percha and sealer during endodontic retreatment with or without solvent: a comparative in vitro study. *J Conserv Dent* 20, 12–16
- Bruker Corporation (2013): SkyScan 1272 User Manual V1.1.
- Buchanan LS (1994): The continuous wave of condensation technique: a convergence of conceptual and procedural advances in obturation. *Dent Today* 13, 80, 82, 84–85

- Bunn CW (1942): Molecular structure and rubber-like elasticity. I: the crystal structures of beta gutta-percha, rubber and polychloroprene. *Proc R Soc Lond Math Phys Eng Sci* 180, 40–66
- Burry J, Stover S, Eichmiller F, Bhagavatula P (2016): Outcomes of primary endodontic therapy provided by endodontic specialists compared with other providers. *J Endod* 42, 702–705
- Byström A, Happonen RP, Sjögren U, Sundqvist G (1987): Healing of periapical lesions of pulpless teeth after endodontic treatment with controlled asepsis. *Dent Traumatol* 3, 58–63
- Camps JJ, Pertot WJ (1994a): Relationship between file size and stiffness of stainless steel instruments. *Dent Traumatol* 10, 260–263
- Camps JJ, Pertot WJ (1994b): Torsional and stiffness properties of Canal Master U stainless steel and nitinol instruments. *J Endod* 20, 395–398
- Cavenago BC, Ordinola-Zapata R, Duarte MH, del Carpio-Perochena AE, Villas-Bôas MH, Marciano MA, Bramante CM, Moraes IG (2014): Efficacy of xylene and passive ultrasonic irrigation on remaining root filling material during retreatment of anatomically complex teeth. *Int Endod J* 47, 1078–1083
- Çelik Ünal G, Üreyen Kaya B, Taç AG, Keçeci 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
- Clinton K, Van Himel T (2001): Comparison of a warm gutta-percha obturation technique and lateral condensation. *J Endod* 27, 692–695
- Cueva-Goig R, Forner-Navarro I, Llena-Puy MC (2016): Microscopic assessment of the sealing ability of three endodontic filling techniques. *J Clin Exp Dent* 8, e27-31
- Da Silva D, Endal U, Reynaud A, Portenier I, Ørstavik D, Haapasalo M (2002): A comparative study of lateral condensation, heat-softened gutta-percha, and a modified master cone heat-softened backfilling technique. *Int Endod J* 35, 1005–1011
- Dall'Agnol C, Hartmann MSM, Barletta FB (2008): Computed tomography assessment of the efficiency of different techniques for removal of root canal filling material. *Braz Dent J* 19, 306–312
- Dalton BC, Orstavik D, Phillips C, Pettiette M, Trope M (1998): Bacterial reduction with nickel-titanium rotary instrumentation. *J Endod* 24, 763–767
- Dannemann M, Kucher M, Kirsch J, Binkowski A, Modler N, Hannig C, Weber M-T (2017): An approach for a mathematical description of human root canals by means of elementary parameters. *J Endod* 43, 536–543
- De-Deus G, Reis C, Beznos D, de Abranches AMG, Coutinho-Filho T, Paciornik S (2008): Limited ability of three commonly used thermoplasticized gutta-percha techniques in filling oval-shaped canals. *J Endod* 34, 1401–1405
- Delai D, Boijink D, Hoppe CB, Grecca FS, Kopper PMP (2018): Apically extruded debris in filling removal of curved canals using 3 niti systems and hand files. *Braz Dent J* 29, 54–59
- Dentsply (1995a): Thermafil Plus Obturators. https://www.dentsply.com/content/dam/dentsply/pim/manufacture/Endodontics/Obturation/Obturators/Carrier_based/Thermafil_Plus_Obturators/Thermafil-Plus-Obturators-Liquid-Crystal-Polymer-Obturators-t1r0oi7-en-1402; Zugriff am 27.09.2016.

- Dentsply (1995b): Thermafil Plus Obturators. https://www.dentsply.com/content/dam/dentsply/pim/manufacture/Endodontics/Obturation/Obturators/Carrier_based/Thermafil_Plus_Obturators/Thermafil-Plus-Obturators-SDS-Sz-45-140-30suqot-en-1411.pdf; Zugriff am 27.09.2016.
- Dentsply (2010): ProTaper Universal. http://www.dentsplymea.com/sites/default/files/ProTaper-Universal4pp%20Brochure_0.pdf; Zugriff am 08.03.2017.
- Dentsply (2012): GuttaCore. http://www.dentsply.de/bausteine.net/f/9128/120822_GUTTA-COREBroschre_de_K70010151.pdf?fd=2; Zugriff am 27.09.2016.
- Dentsply (2013): ProTaper Next. http://www.dentsply.de/bausteine.net/f/9257/K70010158-00_PROTAPERNEXT_Broschre_de.pdf?fd=0; Zugriff am 08.03.2017.
- Doğan H, Taşman F, Çehrelî ZC (2001): Effect of gutta-percha solvents at different temperatures on the calcium, phosphorus and magnesium levels of human root dentin. *J Oral Rehabil* 28, 792–796
- DuLac KA, Nielsen CJ, Tomazic TJ, Ferrillo PJ, Hatton JF (1999): Comparison of the obturation of lateral canals by six techniques. *J Endod* 25, 376–380
- Duncan H, Chong B (2010): Non-surgical retreatment: experimental studies on the removal of root filling materials. *ENDO Lond Engl* 4, 111–126
- 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
- Engstrom B, Frostell G (1964): Experiences of bacteriological root canal control. *Acta Odontol Scand* 22, 43–69
- Erdemir A, Ünverdi Eldeniz A, Belli S (2004): Effect of gutta-percha solvents on mineral contents of human root dentin using ICP-AES technique. *J Endod* 30, 54–56
- Europäische Gesellschaft für Endodontologie (2006): Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 39, 921–930
- Farzaneh M, Abitbol S, Friedman S (2004): Treatment outcome in endodontics: the Toronto study. Phases I and II: orthograde retreatment. *J Endod* 30, 627–633
- Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW (1984): Practical cone-beam algorithm. *J Opt Soc Am A* 6, 612–619
- Ferreira JJ, Rhodes JS, Ford P, R T (2001): The efficacy of gutta-percha removal using ProFiles. *Int Endod J* 34, 267–274
- Friedman S (2002): Prognosis of initial endodontic therapy. *Endod Top* 2, 59–88
- Friedman S, Mor C (2004): The success of endodontic therapy - healing and functionality. *J Calif Dent Assoc* 32, 493–503
- Friedman S, Löst C, Zarrabian M, Trope M (1995): Evaluation of success and failure after endodontic therapy using a glass ionomer cement sealer. *J Endod* 21, 384–390
- Fruchi L, Ordinola-Zapata R, Cavenago B, Hungaro Duarte M, Bueno C, De Martin A (2014): Efficacy of reciprocating instruments for removing filling material in curved canals obturated with a single-cone technique: a micro computed tomographic analysis. *J Endod* 40, 1000–1004

- Fukushima H, Yamamoto K, Hirohata K, Sagawa H, Leung KP, Walker CB (1990): Localization and identification of root canal bacteria in clinically asymptomatic periapical pathosis. *J Endod* 16, 534–538
- 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
- Gergi R, Rjeily JA, Sader J, Naaman A (2010): Comparison of canal transportation and centering ability of twisted files, Pathfile-ProTaper system, and stainless steel hand K-files by using computed tomography. *J Endod* 36, 904–907
- Gogulnath D, Rajan RM, Arathy G, Kandaswamy D (2015): A comparative evaluation of the canal centering ability of three rotary nickel-titanium retreatment systems in the mesio-buccal canals of mandibular first molars using computed tomography. *J Conserv Dent* 18, 310-314
- Gok T, Capar ID, Akcay I, Keles A (2017): Evaluation of different techniques for filling simulated c-shaped canals of 3-dimensional printed resin teeth. *J Endod* 43, 1559–1564
- Goodman A, Schilder H, Aldrich W (1974): The thermomechanical properties of gutta-percha. II: the history and molecular chemistry of gutta-percha. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 37, 954–961
- Gordon MPJ, Love RM, Chandler NP (2005): An evaluation of .06 tapered gutta-percha cones for filling of .06 taper prepared curved root canals. *Int Endod J* 38, 87–96
- Gorni FGM, Gagliani MM (2004): The outcome of endodontic retreatment: a 2-yr follow-up. *J Endod* 30, 1–4
- Grischke J, Müller-Heine A, Hülsmann M (2014): The effect of four different irrigation systems in the removal of a root canal sealer. *Clin Oral Investig* 18, 1845–1851
- Gu LS, Ling JQ, Wei X, Huang XY (2008): Efficacy of ProTaper Universal rotary retreatment system for gutta-percha removal from root canals. *Int Endod J* 41, 288–295
- Haikel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C (1999): Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 25, 434–440
- Hall EM (1930): The mechanics of root-canal treatment. *J Am Dent Assoc* 17, 88–112
- Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2008): Three-dimensional evaluation of effectiveness of hand and rotary instrumentation for retreatment of canals filled with different materials. *J Endod* 34, 1370–1373
- Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2009): Evaluation of root canal obturation: a three-dimensional in vitro study. *J Endod* 35, 541–544
- Hassanloo A, Watson P, Finer Y, Friedman S (2007): Retreatment efficacy of the Epiphany soft resin obturation system. *Int Endod J* 40, 633–43
- Hathcock JT, Stickle RL (1993): Principles and concepts of computed tomography. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 23, 399–415
- Hayakawa T, Tomita F, Okiji T (2010): Influence of the diameter and taper of root canals on the removal efficiency of Thermafil Plus plastic carriers using ProTaper Retreatment files. *J Endod* 36, 1676–1678

- He J, White RK, White CA, Schweitzer JL, Woodmansey KF (2017): Clinical and patient-centered outcomes of nonsurgical root canal retreatment in first molars using contemporary techniques. *J Endod* 43, 231–237
- Heidemann D, Hülsmann M, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, Weiger R (2004): Stellungnahme der DGZMK und der DGZ: Revision einer Wurzelkanalbehandlung. *Dtsch Zahnärztl Z* 59, 605
- Ho ESS, Chang JWW, Cheung GSP (2016): Quality of root canal fillings using three gutta-percha obturation techniques. *Restor Dent Endod* 41, 22–28
- Hommez GMG, Coppens CRM, De Moor RJG (2002): Periapical health related to the quality of coronal restorations and root fillings. *Int Endod J* 35, 680–689
- 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
- Hoskinson SE, Ng YL, Hoskinson AE, Moles DR, Gulabivala K (2002): A retrospective comparison of outcome of root canal treatment using two different protocols. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology* 93, 705–715
- Hsu Y, Kim S (1997): The resected root surface. The issue of canal isthmuses. *Dent Clin North Am* 41, 529–40
- Huang X, Ling J, Wei X, Gu L (2007): Quantitative evaluation of debris extruded apically by using ProTaper Universal Tulsa rotary system in endodontic retreatment. *J Endod* 33, 1102–1105
- 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, Gressmann G, Schäfers F (2003): A comparative study of root canal preparation using FlexMaster and HERO 642 rotary niti instruments. *Int Endod J* 36, 358–366
- Hülsmann M, Drebenstedt S, Holscher C (2011): Shaping and filling root canals during root canal re-treatment. *Endod Top* 19, 74–124
- 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, Uemura M, Toda T, Weine F (2000): A comparison of the relative efficacies of four hand and rotary instrumentation techniques during endodontic retreatment. *Int Endod J* 33, 361–366
- International Agency for Research on Cancer (1987): Overall evaluations of carcinogenicity: an updating of IARC monographs volumes 1 to 42. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum Suppl* 7, 152-153
- International Medical College: Wurzelkanalaufbereitung, manuell: Instrumente. <http://www.med-college.hu/de/wiki/artikel.php?id=466&lan=1>; Zugriff am 06.03.2017.

- Jorgensen B, Williamson A, Chu R, Qian F (2017): The efficacy of the WaveOne reciprocating file system versus the ProTaper Retreatment system in endodontic retreatment of two different obturating techniques. *J Endod* 43, 1011–1013
- Jung M, Lommel D, Klimek J (2005): The imaging of root canal obturation using micro-ct. *Int Endod J* 38, 617–626
- Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ (1965): The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 20, 340–349
- Kandemir Demirci G, Çalışkan MK (2016): A prospective randomized comparative study of cold lateral condensation versus core/gutta-percha in teeth with periapical lesions. *J Endod* 42, 206–210
- Karataş E, Kol E, Bayrakdar İŞ, Arslan H (2016): The effect of chloroform, orange oil and eucalyptol on root canal transportation in endodontic retreatment. *Aust Endod J* 42, 37–40
- Kaşıkcı Bilgi İ, Kösele İ, Güneri P, Hülsmann M, Çalışkan MK (2017): Efficiency and apical extrusion of debris: a comparative ex vivo study of four retreatment techniques in severely curved root canals. *Int Endod J* 50, 910–918
- Kebudi Benezra M, Schembri Wismayer P, Camilleri J (2018): Interfacial characteristics and cytocompatibility of hydraulic sealer cements. *J Endod* 44, 1007–1017
- Keçeci AD, Çelik Ünal G, Şen BH (2005): Comparison of cold lateral compaction and continuous wave of obturation techniques following manual or rotary instrumentation. *Int Endod J* 38, 381–388
- Keleş A, Alcin H, Kamalak A, Versiani MA (2014): Oval-shaped canal retreatment with self-adjusting file: a micro computed tomography study. *Clin Oral Investig* 18, 1147–1153
- Kerekes K, Tronstad L (1979): Long-term results of endodontic treatment performed with a standardized technique. *J Endod* 5, 83–90
- Kfir A, Tsesis I, Yakirevich E, Matalon S, Abramovitz I (2012): The efficacy of five techniques for removing root filling material: microscopic versus radiographic evaluation. *Int Endod J* 45, 35–41
- Kierklo A, Tabor Z, Pawińska M, Jaworska M (2015): A microcomputed tomography-based comparison of root canal filling quality following different instrumentation and obturation techniques. *Med Princ Pract* 24, 84–91
- Kirkevang LL, Hörsted-Bindslev P, Ørstavik D, Wenzel A (2001): Frequency and distribution of endodontically treated teeth and apical periodontitis in an urban Danish population. *Int Endod J* 34, 198–205
- Kontakiotis E, Wu M, Wesselink P (1997): Effect of sealer thickness on long-term sealing ability: a 2-year follow-up study. *Int Endod J* 30, 307–312
- Kosti E, Lambrianidis T, Economides N, Neofitou C (2006): Ex vivo study of the efficacy of H-files and rotary niti instruments to remove gutta-percha and four types of sealer. *Int Endod J* 39, 48–54
- Krug R, Krastl G, Jahreis M (2017): Technical quality of a matching-taper single-cone filling technique following rotary instrumentation compared with lateral compaction after manual preparation: a retrospective study. *Clin Oral Investig* 21, 643–652

- Lautenschlager EP, Jacobs JJ, Marshall GW, Heuer MA (1977): Brittle and ductile torsional failures of endodontic instruments. *J Endod* 3, 175–178
- Lazarski M, Walker III W, Flores C, Schindler W, Hargreaves K (2001): Epidemiological evaluation of the outcomes of nonsurgical root canal treatment in a large cohort of insured dental patients. *J Endod* 27, 791–796
- Lea CS, Apicella MJ, Mines P, Yancich PP, Parker MH (2005): Comparison of the obturation density of cold lateral compaction versus warm vertical compaction using the continuous wave of condensation technique. *J Endod* 31, 37–39
- Leduc J, Fishelberg G (2003): Endodontic obturation: a review. *Gen Dent* 51, 232–233
- Levitan ME, Van Himel T, Luckey JB (2003): The effect of insertion rates on fill length and adaptation of a thermoplasticized gutta-percha technique. *J Endod* 29, 505–508
- Li GH, Niu LN, Selem LC, Eid AA, Bergeron BE, Chen JH, Pashley DH, Tay FR (2014): Quality of obturation achieved by an endodontic core-carrier system with crosslinked gutta-percha carrier in single-rooted canals. *J Dent* 42, 1124–1134
- Lin LM, Skribner JE, Gaengler P (1992): Factors associated with endodontic treatment failures. *J Endod* 18, 625–627
- Lin LM, Rosenberg PA, Lin J (2005): Do procedural errors cause endodontic treatment failure? *J Am Dent Assoc* 136, 187–193
- Ma J, Al-Ashaw AJ, Shen Y, Gao Y, Yang Y, Zhang C, Haapasalo M (2012): Efficacy of ProTaper Universal rotary retreatment system for gutta-percha removal from oval root canals: a micro computed tomography study. *J Endod* 38, 1516–1520
- Marfisi K, Mercade M, Plotino G, Duran-Sindreu F, Bueno R, Roig M (2010): Efficacy of three different rotary files to remove gutta-percha and Resilon from root canals. *Int Endod J* 43, 1022–1028
- Martins M, Duarte M, Cavenago B, Kato A, da Silveira Bueno C (2017): Effectiveness of the ProTaper Next and Reciproc systems in removing root canal filling material with sonic or ultrasonic irrigation: a micro computed tomographic study. *J Endod* 43, 467–471
- Márton IJ, Kiss C (2014): Overlapping protective and destructive regulatory pathways in apical periodontitis. *J Endod* 40, 155–163
- Masiero AV, Barletta FB (2005): Effectiveness of different techniques for removing gutta-percha during retreatment. *Int Endod J* 38, 2–7
- Matsumoto T, Nagai T, Ida K, Ito M, Kawai Y, Horiba N, Sato R, Nakamura H (1987): Factors affecting successful prognosis of root canal treatment. *J Endod* 13, 239–242
- McDonald MN, Vire DE (1992): Chloroform in the endodontic operator. *J Endod* 18, 301–303
- Metzger Z, Zary R, Cohen R, Teperovich E, Paqué F (2010): The quality of root canal preparation and root canal obturation in canals treated with rotary versus self-adjusting files: a three-dimensional micro computed tomographic study. *J Endod* 36, 1569–1573
- Michanowicz AE, Michanowicz JP, Michanowicz AM, Czonstkowsky M, Zullo TP (1989): Clinical evaluation of low-temperature thermoplasticized injectable gutta-percha: a preliminary report. *J Endod* 15, 602–607

- Mokhtari H, Rahimi S, Forough Reyhani M, Galledar S, Mokhtari Zonouzi HR (2015): Comparison of push-out bond strength of gutta-percha to root canal dentin in single-cone and cold lateral compaction techniques with AH Plus sealer in mandibular premolars. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 2, 221–225
- Molven O, Halse A, Fristad I, MacDonald-Jankowski D (2002): Periapical changes following root-canal treatment observed 20–27 years postoperatively. *Int Endod J* 35, 784–790
- Monguillhott Crozeta B, Damião de Sousa-Neto M, Bianchi Leoni G, Francisco Mazzi-Chaves J, Terezinha Corrêa Silva-Sousa Y, Baratto-Filho F (2016): A micro computed tomography assessment of the efficacy of rotary and reciprocating techniques for filling material removal in root canal retreatment. *Clin Oral Investig* 20, 2235–2240
- Nair PN (1997): Apical periodontitis: a dynamic encounter between root canal infection and host response. *Periodontol* 2000 13, 121–148
- Nair PN (2004): Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures. *Crit Rev Oral Biol Med* 15, 348–381
- Nair PN (2006): On the causes of persistent apical periodontitis: a review. *Int Endod J* 39, 249–281
- Nair PN, Sjögren U, Krey G, Kahnberg KE, Sundqvist G (1990): Intraradicular bacteria and fungi in root-filled, asymptomatic human teeth with therapy-resistant periapical lesions: a long-term light and electron microscopic follow-up study. *J Endod* 16, 580–588
- Neuhaus KW, Schick A, Lussi A (2016): Apical filling characteristics of carrier-based techniques vs. single cone technique in curved root canals. *Clin Oral Investig* 20, 1631–1637
- Nevarés G, de Albuquerque DS, Bueno CE, Cunha RS (2015): Is guttacore more easily removed from the root canal than thermafil? An ex vivo study. *J Can Dent Assoc* 81, f22
- Nevarés G, de Albuquerque DS, Freire LG, Romeiro K, Fogel HM, Dos Santos M, Cunha RS (2016): Efficacy of ProTaper Next compared with Reciproc in removing obturation material from severely curved root canals: a micro computed tomography study. *J Endod* 42, 803–808
- Ng YL, Mann V, Gulabivala K (2008): Outcome of secondary root canal treatment: a systematic review of the literature. *Int Endod J* 41, 1026–1046
- Ng YL, Mann V, Gulabivala K (2011a): A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *Int Endod J* 44, 583–609
- Ng YL, Mann V, Gulabivala K (2011b): A prospective study of the factors affecting outcomes of non-surgical root canal treatment: part 2: tooth survival. *Int Endod J* 44, 610–625
- Olçay K, Ataoglu H, Belli S (2018): Evaluation of related factors in the failure of endodontically treated teeth: a cross-sectional study. *J Endod* 44, 38–45
- Ordinola-Zapata R, Martins JNR, Bramante CM, Villas-Boas MH, Duarte MH, Versiani MA (2017): Morphological evaluation of maxillary second molars with fused roots: a micro-CT study. *Int Endod J* 50, 1192–1200
- Özyürek T, Oszeser-Demiryürek E (2016): Efficacy of different nickel-titanium instruments in removing gutta-percha during root canal retreatment. *J Endod* 42, 646–649

- Özyürek T, Ozsezer-Demiryürek E (2017): Efficacy of ProTaper Next and ProTaper Universal Retreatment systems in removing gutta-percha in curved root canals during root canal retreatment. *J Istanbul Univ Fac Dent* 51, 7–13
- Patel S (2009): New dimensions in endodontic imaging: part 2. Cone beam computed tomography. *Int Endod J* 42, 463–475
- Patel S, Dawood A, Whaites E, Pitt Ford T (2009): New dimensions in endodontic imaging: part 1. Conventional and alternative radiographic systems. *Int Endod J* 42, 447–462
- Pawar AM, Thakur B, Metzger Z, Kfir A, Pawar M (2016): The efficacy of the Self-Adjusting File versus WaveOne in removal of root filling residue that remains in oval canals after the use of ProTaper retreatment files: A cone-beam computed tomography study. *J Conserv Dent* 19, 72–76
- Peng L, Ye L, Tan H, Zhou X (2007): Outcome of root canal obturation by warm gutta-percha versus cold lateral condensation: a meta-analysis. *J Endod* 33, 106–109
- Peters OA, Schönenberger K, Laib A (2001): Effects of four niti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J* 34, 221–230
- Pirani C, Pelliccioni G, Marchionni S, Montebugnoli L, Piana G, Prati C (2009): Effectiveness of three different retreatment techniques in canals filled with compacted gutta-percha or Thermafil: a scanning electron microscope study. *J Endod* 35, 1433–1440
- Pirani C, Chersoni S, Montebugnoli L, Prati C (2015): Long-term outcome of non-surgical root canal treatment: a retrospective analysis. *Odontology* 103, 185–193
- Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G (2009): A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 35, 1469–1476
- Preetam CS, Chandrashekhar M, Gunaranjan T, Kumar SK, Miskeen Sahib SA, Kumar MS (2016): A comparative evaluation of two rotary niti instruments in the removal of gutta-percha during retreatment. *J Int Soc Prev Community Dent* 6, 131–136
- Reddy ES, Sainath D, Narendrreddy M, Pasari S, Vallikanthan S, Sindhureddy G (2013): Cleaning efficiency of anatomic endodontic technology, ProFile system and manual instrumentation in oval-shaped root canals: an in vitro study. *J Contemp Dent Pract* 14, 629–634
- Reddy N, Admala SR, Dinapadu S, Pasari S, Reddy MP, Rao MSR (2013): Comparative analysis of efficacy and cleaning ability of hand and rotary devices for gutta-percha removal in root canal retreatment: an in vitro study. *J Contemp Dent Pract* 14, 635–643
- Resende LM, Rached-Junior FJA, Versiani MA, Souza-Gabriel AE, Miranda CES, Silva-Sousa YTC, Neto S (2009): A comparative study of physiochemical properties of AH Plus, Epiphany, and Epiphany SE root canal sealers. *Int Endod J* 42, 785–793
- Rhodes JS, Ford TRP, Lynch JA, Liepins PJ, Curtis RV (1999): Micro computed tomography: a new tool for experimental endodontology. *Int Endod J* 32, 165–170
- Robberecht L, Colard T, Claisse-Crinquette A (2012): Qualitative evaluation of two endodontic obturation techniques: tapered single-cone method versus warm vertical condensation and injection system: an in vitro study. *J Oral Sci* 54, 99–104
- Rôças IN, Siqueira JF (2010): Identification of bacteria enduring endodontic treatment procedures by a combined reverse transcriptase–polymerase chain reaction and reverse-capture check-board approach. *J Endod* 36, 45–52

- Rödiger T, Hülsmann M, Kahlmeier C (2007): Comparison of root canal preparation with two rotary niti instruments: ProFile .04 and GT Rotary. *Int Endod J* 40, 553–562
- Rödiger T, Hausdörfer T, Konietschke F, Dullin C, Hahn W, Hülsmann M (2012): Efficacy of D-RaCe and ProTaper Universal Retreatment niti instruments and hand files in removing gutta-percha from curved root canals - a micro computed tomography study. *Int Endod J* 45, 580–589
- Rödiger T, Kupis J, Konietschke F, Dullin C, Drebenstedt S, Hülsmann M (2014a): Comparison of hand and rotary instrumentation for removing gutta-percha from previously treated curved root canals: a micro computed tomography study. *Int Endod J* 47, 173–182
- Rödiger T, Reicherts P, Konietschke F, Dullin C, Hahn W, Hülsmann M (2014b): Efficacy of reciprocating and rotary niti instruments for retreatment of curved root canals assessed by micro-ct. *Int Endod J* 47, 942–948
- 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
- Rossi-Fedele G, Ahmed HMA (2017): Assessment of root canal filling removal effectiveness using micro computed tomography: a systematic review. *J Endod* 43, 520–526
- Rotstein I, Cohenca N, Teperovich E, Moshonov J, Mor C, Roman I, Gedalia I (1999): Effect of chloroform, xylene, and halothane on enamel and dentin microhardness of human teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 87, 366–368
- Ruddle CJ, Machtou P, West J (2014): Endodontic canal preparation: innovations in glide path management and shaping canals. *Dent Today* 33, 118–23
- 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
- Sağlam BC, Koçak MM, Türker SA, Koçak S (2014): Efficacy of different solvents in removing gutta-percha from curved root canals: A micro computed tomography study. *Aust Endod J* 40, 76–80
- Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JEA, Messer HH (2000): Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J Endod* 26, 161–165
- Saunders WP, Saunders EM (1994): Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review. *Dent Traumatol* 10, 105–108
- Schäfer E, Hickel R, Geurtsen W, Heidemann D, Löst C, Petschelt A, Raab W (2000): Stellungnahme der DGZMK und der DGZ: Wurzelkanalaufbereitungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 55, 719
- 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
- Schäfer E, Dzepina A, Danesh G (2003): Bending properties of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 96, 757–763
- Schäfer E, Nelius B, Bürklein S (2011): A comparative evaluation of gutta-percha filled areas in curved root canals obturated with different techniques. *Clin Oral Investig* 16, 225–230

- Schäfer E, Schrenker C, Zupanc J, Bürklein S (2016): Percentage of gutta-percha filled areas in canals obturated with cross-linked gutta-percha core-carrier systems, single-cone and lateral compaction technique. *J Endod* 42, 294–298
- Schilder H (1967): Filling root canals in three dimensions. *Dent Clin North Am* 11, 723–744
- Schirrmester JF, Hermanns 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
- Schirrmester JF, Wrbas KT, Schneider FH, Altenburger MJ, Hellwig E (2006b): 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
- Schirrmester JF, Meyer KM, Hermanns P, Altenburger MJ, Wrbas KT (2006c): Effectiveness of hand and rotary instrumentation for removing a new synthetic polymer-based root canal obturation material (Epiphany) during retreatment. *Int Endod J* 39, 150–156
- Schneider SW (1971): A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 32, 271–275
- Schroeder A, Ford NL, Coil JM (2017): Micro computed tomography analysis of post space preparation in root canals filled with carrier-based thermoplasticized gutta-percha. *Int Endod J* 50, 293–302
- Seltzer S, Naidorf IJ (1985): Flare-ups in endodontics: I. Etiological factors. *J Endod* 11, 472–478
- Seltzer S, Bender IB, Turkenkopf S (1963): Factors affecting successful repair after root canal therapy. *J Am Dent Assoc* 67, 651–662
- Siew K, Lee AH, Cheung GS (2015): Treatment outcome of repaired root perforation: a systematic review and meta-analysis. *J Endod* 41, 1795–1804
- Silva EJNL, Ferreira VM, Silva CC, Herrera DR, De-Deus G, Gomes BP (2016): Influence of apical enlargement and complementary canal preparation with the Self-Adjusting File on endotoxin reduction in retreatment cases. *Int Endod J* 50, 646–651
- Silva EJNL, Belladonna FG, Zuolo AS, Rodrigues E, Ehrhardt IC, Souza EM, De-Deus G (2018): Effectiveness of XP-endo Finisher and XP-endo Finisher R in removing root filling remnants: a micro-ct study. *Int Endod J* 51, 86–91
- Silveira SB, Alves FRF, Marceliano-Alves MF, Sousa JCN, Vieira VTL, Siqueira JF, Lopes HP, Provenzano JC (2018): Removal of root canal fillings in curved canals using either Mani GPR or HyFlex NT followed by passive ultrasonic irrigation. *J Endod* 44, 299–303
- Siqueira JF (2001): Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail. *Int Endod J* 34, 1–10
- Siqueira JF, 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
- Sjögren U, Haggglund B, Sundqvist G, Wing K (1990): Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *J Endod* 16, 498–504
- Smith CS, Setchell DJ, Harty FJ (1993): Factors influencing the success of conventional root canal therapy - a five-year retrospective study. *Int Endod J* 26, 321–333

- Somma F, Cammarota G, Plotino G, Grande NM, Pameijer CH (2008): The effectiveness of manual and mechanical instrumentation for the retreatment of three different root canal filling materials. *J Endod* 34, 466–469
- Song M, Kim HC, Lee W, Kim E (2011): Analysis of the cause of failure in nonsurgical endodontic treatment by microscopic inspection during endodontic microsurgery. *J Endod* 37, 1516–1519
- Sonntag D, Ritter A, Burkhart A, Fischer J, Mondrzyk A, Ritter H (2015): Experimental amine-epoxide sealer: a physicochemical study in comparison with AH Plus and EasySeal. *Int Endod J* 48, 747–756
- Spili PBs, Parashos PMds, Messer HHMds (2005): The impact of instrument fracture on outcome of endodontic treatment. *J Endod* 31, 845–850
- Stabholz A, Friedman S (1988): Endodontic retreatment - case selection and technique. Part 2: treatment planning for retreatment. *J Endod* 14, 607–614
- Sundqvist G, Figdor D, Persson S, Sjögren U (1998): Microbiologic analysis of teeth with failed endodontic treatment and the outcome of conservative retreatment. *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
- Swartz DB, Skidmore AE, Griffin JA (1983): Twenty years of endodontic success and failure. *J Endod* 9, 198–202
- Tabassum S, Khan FR (2016): Failure of endodontic treatment: the usual suspects. *Eur J Dent* 10, 144–147
- Takahashi CM, Cunha RS, de Martin AS, Fontana CE, Silveira CFM, da Silveira Bueno CE (2009): In vitro evaluation of the effectiveness of ProTaper Universal rotary retreatment system for gutta-percha removal with or without a solvent. *J Endod* 35, 1580–1583
- Tamse A, Unger U, Metzger Z, Rosenberg M (1986): Gutta-percha solvents - a comparative study. *J Endod* 12, 337–339
- Teles Rodrigues C, Hungaro Duarte MA, Milanezi de Almeida M, Bombarda de Andrade F, Bernardineli N (2016): Efficacy of CM-Wire, M-Wire, and nickel-titanium instruments for removing filling material from curved root canals: a micro computed tomography study. *J Endod* 42, 1651–1655
- Tennert C, Jungbäck IL, Wrbas KT (2013): Comparison between two thermoplastic root canal obturation techniques regarding extrusion of root canal filling - a retrospective in vivo study. *Clin Oral Investig* 17, 449–454
- Tronstad L, Barnett F, Cervone F (1990): Periapical bacterial plaque in teeth refractory to endodontic treatment. *Dent Traumatol* 6, 73–77
- Tronstad L, Asbjørnsen K, Døving L, Pedersen I, Eriksen HM (2000): Influence of coronal restorations on the periapical health of endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol* 16, 218–221
- Uezu MKN, Britto MLB, Nabeshima CK, Pallotta RC (2010): Comparison of debris extruded apically and working time used by ProTaper Universal rotary and ProTaper retreatment system during gutta-percha removal. *J Appl Oral Sci* 18, 542–545

- Ungerechts C, Bårdsen A, Fristad I (2014): Instrument fracture in root canals - where, why, when and what? A study from a student clinic. *Int Endod J* 47, 183–190
- U.S. National Library of Medicine (2000): Retreatment. MeSH Descriptor Data. <https://meshb.nlm.nih.gov/#/record/ui?ui=D019233>; Zugriff am 01.03.2017.
- VDW Dental (2017a): Hedström Feilen. <http://www.vdw-dental.com/produkte/manuelle-aufbereitung/sterile-instrumente/hedstroem-feilen.html>; Zugriff am 06.03.2017.
- VDW Dental (2017b): K-Bohrer. <http://www.vdw-dental.com/produkte/manuelle-aufbereitung/sterile-instrumente/k-bohrer.html>; Zugriff am 06.03.2017.
- VDW Dental (2017c): K-Feilen. <http://www.vdw-dental.com/produkte/manuelle-aufbereitung/sterile-instrumente/k-feilen.html>; Zugriff am 06.03.2017.
- Versiani M, Bianchi Leoni G, Steier L, De-Deus G, Tassani S, Djalma Pécora J, Damião de Sousa-Neto M (2013): Micro computed tomography study of oval-shaped canals prepared with the Self-Adjusting File, Reciproc, WaveOne, and ProTaper Universal systems. *J Endod* 39, 1060–1066
- Versümer J, Hülsmann M, Schäfers F (2002): A comparative study of root canal preparation using Profile .04 and Lightspeed rotary niti instruments. *Int Endod J* 35, 37–46
- Vertucci FJ (1984): Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 58, 589–599
- Wang H, Fei B (2012): An MR image-guided, voxel-based partial volume correction method for PET images. *Med Phys* 39, 179–194
- Weber T: *Memorix Zahnmedizin*, 3., vollständig überarbeitete Auflage; Thieme Verlag, Stuttgart 2010
- Weiger R, Geurtsen W, Heidemann D, Löst C, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, Hickel R (2000): Stellungnahme der DGZMK und der DGZ: Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 56, 206
- Weine FS, Kelly RF, Lio PJ (1975): The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape. *J Endod* 1, 255–262
- Wennberg A, Ørstavik D (1989): Evaluation of alternatives to chloroform in endodontic practice. *Dent Traumatol* 5, 234–237
- Whitten RB, Levitan ME (2015): The effect of canal preparation on fill length in straight root canals obturated with GuttaCore. *J Endod* 41, 155–158
- Wilcox LR (1989): Endodontic retreatment: ultrasonics and chloroform as the final step in reinstrumentation. *J Endod* 15, 125–128
- Wilcox LR (1993): Thermafil retreatment with and without chloroform solvent. *J Endod* 19, 563–566
- Wilcox LR (1995): Endodontic retreatment with halothane versus chloroform solvent. *J Endod* 21, 305–307
- Wilcox LR, Krell KV, Madison S, Rittman B (1987): Endodontic retreatment: evaluation of gutta-percha and sealer removal and canal reinstrumentation. *J Endod* 13, 453–457

- Wolcott JF, Van Himel T, Hicks ML (1999): Thermafil retreatment using a new „System B“ technique or a solvent. *J Endod* 25, 761–764
- Wu MK, Fan B, Wesselink PR (2000): Diminished leakage along root canals filled with gutta-percha without sealer over time: a laboratory study. *Int Endod J* 33, 121–125
- Wu MK, Kašćáková A, Wesselink PR (2001): Quality of cold and warm gutta-percha fillings in oval canals in mandibular premolars. *Int Endod J* 34, 485–491
- Yilmaz A, Kucukay ES, Istekepe M, Sisli SN, Ersev H, Karagoz-Kucukay I (2017): Comparison of the shaping ability of WaveOne reciprocating files with or without glide path in simulated curved s-shaped root canals. *J Int Soc Prev Community Dent* 7, 13–17
- Yilmaz F, Koç C, Kamburođlu K, Ocak M, Geneci F, Uzuner MB, Çelik HH (2018): Evaluation of 3 different retreatment techniques in maxillary molar teeth by using micro computed tomography. *J Endod* 44, 480–484
- Yürüker S, Görduysus M, Küçükkaya S, Uzunogđlu E, Iđın C, Gülen O, Tuncel B, Görduysus MÖ (2016): Efficacy of combined use of different nickel-titanium files on removing root canal filling materials. *J Endod* 42, 487–492
- Zakariasen K, Brayton S, Collinson D (1990): Efficient and effective root canal retreatment without chloroform. *J Can Dent Assoc* 56, 509–12
- Zehnder M, Gold SI, Hasselgren G (2002): Pathologic interactions in pulpal and periodontal tissues. *J Clin Periodontol* 29, 663–671
- Zhang D, Chen J, Lan G, Li M, An J, Wen X, Liu L, Deng M (2017): The root canal morphology in mandibular first premolars: a comparative evaluation of cone-beam computed tomography and micro computed tomography. *Clin Oral Investig* 21, 1007–1012
- Zogheib C, Hanna M, Pasqualini D, Naaman A (2016): Quantitative volumetric analysis of cross-linked gutta-percha obturators. *Ann Stomatol (Roma)* 7, 46–51

Danksagung

Ich danke Frau Priv.-Doz. Dr. med. dent. Tina Rödiger, Oberärztin der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie für die Überlassung dieses Themas und die Möglichkeit, diese Promotion unter ihrer Leitung durchführen zu dürfen. Ich bedanke mich für eine wunderbare Zusammenarbeit, eine außerordentlich engagierte und freundliche Betreuung bei der Durchführung der Versuche, der Beantwortung vieler Fragen und dem Korrekturlesen. Außerdem danke ich für die Erstellung des Erstgutachtens.

Des Weiteren danke ich Frau Dr. rer. nat. Marta Rizk der Poliklinik für Präventive Zahnheilkunde, Parodontologie und Kariologie für die freundliche und geduldige Unterweisung in die vielen Funktionen des Mikro-CTs.