

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

**Entfernung endodontischer  
Thermafil-Obturatoren mit Hilfe  
unterschiedlicher Techniken:  
Eine Micro-Computertomographie-  
Studie**

INAUGURAL-DISSERTATION

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

vorgelegt von

**Max Klinger**

aus

Gera

Göttingen 2020

Dekan:	Prof. Dr. med. W. Brück
Referent/in	Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann
Ko-Referent/in:	Prof. Dr. med. dent. M. Rödiger
Drittreferent/in:	.....

Datum der mündlichen Prüfung: 16.11.2020

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

### **Betreuungsausschuss**

Betreuer/in Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Ko-Betreuer/in: Prof. Dr.med. dent. M. Rödiger

### **Prüfungskommission**

Referent/in Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Ko-Referent/in: Prof. Dr.med. dent. M. Rödiger

Promotor-Vertretung: Prof. Dr. med. dent. R. Mausberg

Datum der mündlichen Prüfung: 16.11.2020

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel "Entfernung endodontischer Thermafil-Obturatoren mit Hilfe unterschiedlicher Techniken: Eine Micro-Computertomographie-Studie" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den ..... ..

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>10</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>12</b>
1.1 Literaturübersicht.....	13
1.1.1 Indikationen und Ziele der Wurzelkanalbehandlung .....	13
1.1.2 Wurzelkanalobturation mit Thermafil-Obturatoren .....	13
1.1.3 Dichtigkeit der Thermafil-Obturation .....	15
1.1.4 Apikale Extrusionen bei Thermafil-Obturationen.....	16
1.1.5 Zeitlicher Aufwand bei Thermafil-Obturationen .....	16
1.1.6 Klinische Überlebensrate der Thermafil-Obturationen .....	17
1.1.7 Revision von Thermafil-Obturationen .....	18
1.1.8 Die Micro-Computertomographie.....	23
1.2 Ziele der Studie .....	26
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>27</b>
2.1 Versuchsaufbau .....	27
2.2 Auswahl der Zähne .....	28
2.3 Einteilung der Versuchsgruppen.....	30
2.4 Präparation der Zähne.....	30
2.5 Obturation der Zähne .....	31
2.6 Der Micro-CT Scan.....	32
2.7 Volumetrie .....	34
2.8 Vorbereitung der Zähne für die Entfernungversuche.....	35
2.9 Entfernungsmethode Reciproc .....	36
2.10 Entfernungsmethode FragRemover.....	38
2.11 Statistische Analyse .....	39
2.12 Materialliste .....	39
<b>3 Ergebnisse.....</b>	<b>41</b>
3.1 Einteilung der Versuchsgruppen.....	41
3.2 Entfernung der Thermafil-Obturatoren mit dem FragRemover .....	42
3.2.1 Entfernbarkeit der Thermafil-Obturatoren .....	42
3.2.2 Komplikationen.....	45
3.3 Entfernung der Thermafil-Obturatoren mit Reciproc-Instrumenten.....	46

---

3.3.1	Entfernbarkeit der Thermafil-Obturatoren .....	46
3.3.2	Komplikationen.....	48
3.4	Vergleich beider Entfernungsmethoden.....	50
3.5	Volumenveränderung .....	51
3.5.1	FragRemover .....	51
3.5.2	Reciproc.....	56
3.6	Vergleich der Volumenveränderungen .....	61
3.6.1	Vergleich der Volumenveränderungen im apikalen Wurzelkanalanteil.....	61
3.6.2	Vergleich der Volumenveränderungen im gesamten Wurzelkanal .....	64
3.6.3	Zusammenfassung der volumetrischen Analyse.....	68
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>71</b>
4.1	Diskussion der Methode .....	71
4.1.1	Gruppeneinteilung .....	71
4.1.2	Techniken zur Entfernung der Thermafil-Obturatoren.....	72
4.2	Volumetrische Analyse des verbleibenden Wurzelfüll-materials und des Dentinabtrages.....	77
4.3	Diskussion der Ergebnisse .....	78
4.3.1	Diskussion der Ergebnisse der Entfernungsversuche.....	78
4.3.2	Diskussion der Micro-CT-Ergebnisse .....	80
4.4	Schlussfolgerungen.....	83
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>87</b>
6.1	Datenerhebung.....	87
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>88</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs der Studie .....	27
Abbildung 2: Bukko-linguale und mesio-distale Röntgenaufnahme (Zahn Nr. 2) .....	28
Abbildung 3: Bukko-linguale Röntgenmessaufnahme mit Reamer der Größe ISO 15 (Zahn Nr. 38) .....	29
Abbildung 4: Schema zur Bestimmung von Krümmungswinkel ( $\alpha$ ) und Krümmungsradius ( $r$ ) des Wurzelkanals (Zahn Nr. 2) .....	29
Abbildung 5: Mesiale Trepanationsöffnung mit Blick auf die beiden mesialen Wurzelkanaleingänge .....	30
Abbildung 6: Verifier der Größe 35 (oben) und Thermafil-Obturator Größe 35 (unten) .....	32
Abbildung 7: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Obtulators am Zahn Nr. 122 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTvox- Software v.3.3, Bruker-microCT) .....	33
Abbildung 8: Darstellung Endo Training Model Castillo (VDW, München, Deutschland) mit inseriertem Zahn Nr. 122 .....	35
Abbildung 9: Koronale Ansicht des freigelegten Kunststoffträgers an Zahn Nr. 113 ....	36
Abbildung 10: Darstellung der Reciproc-Instrumente in den Größen R25 und R40 .....	37
Abbildung 11: Darstellung der Drahtschleife des FragRemovers .....	38
Abbildung 12: Ergebnis der Entfernungsversuche mit dem FragRemover in Abhängigkeit vom Winkel der Wurzelkanalkrümmung .....	43
Abbildung 13: Ergebnis der Entfernungsversuche mit dem FragRemover in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung .....	43
Abbildung 14: Vollständige Entfernung des Kunststoffträgers mit Hilfe des FragRemovers (Zahn Nr. 15) .....	44
Abbildung 15: Koronale Ansicht des Wurzelkanals nach Entfernung des Kunststoffträgers (Zahn Nr. 15) .....	45
Abbildung 16: Komplikationen bei der Entfernung der Kunststoffträger mit dem FragRemover .....	45
Abbildung 17: Beim Entfernungsversuch abgetrennter Kopf des Kunststoffträgers (Zahn Nr. 1) .....	46
Abbildung 18: Ergebnisse der Entfernungsversuche mit Reciproc in Abhängigkeit vom Krümmungswinkel des Wurzelkanals .....	47
Abbildung 19: Ergebnisse der Entfernungsversuche mit Reciproc in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkrümmung .....	47
Abbildung 20: Entfernter Thermafil-Obturator durch Reciproc-Anwendung (Zahn Nr. 104) .....	48
Abbildung 21: Anzahl der Komplikationen bei Reciproc-Anwendung .....	49
Abbildung 22: Zerspanter Kunststoffträger im Wurzelkanallumen (Zahn Nr. 41) .....	49
Abbildung 23: Vergleich der Entfernungsversuche mit Reciproc und FragRemover (Erfolg = In toto entfernt + zerspannt entfernt) .....	50
Abbildung 24: Vergleich der Komplikationsraten von Reciproc und FragRemover .....	51
Abbildung 25: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung des FragRemovers in Abhängigkeit vom Winkel der Wurzelkanalkrümmung .....	52

Abbildung 26: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung des FragRemovers in Abhängigkeit vom Winkel der apikalen Wurzelkanalkrümmung.....	52
Abbildung 27: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung des FragRemovers in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung.....	53
Abbildung 28: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterials nach Verwendung des FragRemover in Abhängigkeit vom Radius der apikalen Wurzelkanalkrümmung.....	54
Abbildung 29: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) am Zahn Nr. 146 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT).....	55
Abbildung 30: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) am Zahn Nr. 122 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT).....	55
Abbildung 31: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Winkel der Wurzelkanalkrümmung.....	56
Abbildung 32: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Winkel der apikalen Wurzelkanalkrümmung.....	57
Abbildung 33: Darstellung des Zusammenhangs zwischen erhöhtem Dentinabtrag und erhöhtem Krümmungswinkel des Wurzelkanals nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten im apikalen Wurzelkanalanteil.....	58
Abbildung 34: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung.....	58
Abbildung 35: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Radius der apikalen Wurzelkanalkrümmung.....	59
Abbildung 36: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) am Zahn Nr. 6 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT).....	60
Abbildung 37: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) bzw. eine programmbedingte Überlagerung beider Strukturen (weiß) am Zahn Nr. 103 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT).....	60
Abbildung 38: Vergleich des Dentinabtrags im apikalen Wurzelkanalanteil (alle Versuche).....	61
Abbildung 39: Entferntes Wurzelfüllmaterial im apikalen Wurzelkanalanteil (alle Versuche).....	62
Abbildung 40: Prozentual verbliebenes Füllmaterial im apikalen Wurzelkanalanteil (alle Versuche).....	62
Abbildung 41: Vergleich des Dentinabtrags im apikalen Wurzelkanalanteil (alle erfolgreichen Versuche).....	63
Abbildung 42: Vergleich des entfernten Wurzelfüllmaterials im apikalen Wurzelkanalanteil (alle erfolgreichen Versuche).....	64

---

Abbildung 43: Prozentualer Anteil des verbliebenen Füllmaterials im apikalen Wurzelkanalanteil (alle erfolgreichen Versuche) .....	64
Abbildung 44: Vergleich des Dentinabtrags im gesamten Wurzelkanal (alle Versuche) .....	65
Abbildung 45: Vergleich des entfernten Wurzelfüllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle Versuche) .....	65
Abbildung 46: Vergleich des prozentualen Anteils des verbliebenen Füllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle Versuche) .....	66
Abbildung 47: Vergleich des Dentinabtrags im gesamten Wurzelkanal (alle erfolgreichen Versuche) .....	67
Abbildung 48: Vergleich des entfernten Wurzelfüllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle erfolgreichen Versuche) .....	67
Abbildung 49: Vergleich des prozentual verbliebenen Füllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle erfolgreichen Versuche) .....	68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter für die Micro-CT-Scans.....	33
Tabelle 2: Parameter für die Rekonstruktion.....	34
Tabelle 3: Zusammenfassung aller Mittelwerte von Wurzellängen, Krümmungswinkeln und -radien der zwei Versuchsgruppen .....	42
Tabelle 4: Übersicht der volumetrischen Mittelwerte im apikalen Anteil des Wurzelkanals .....	69
Tabelle 5: Übersicht der volumetrischen Mittelwerte im gesamten Wurzelkanal .....	70

## Abkürzungsverzeichnis

DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
VOI	<i>Volume of Interest</i>

# 1 Einleitung

Eine irreversible Erkrankung der Pulpa stellt die Hauptindikation einer Wurzelkanalbehandlung zum Erhalt des Zahns als funktionelle Kaueinheit dar. Die irreversibel geschädigte Pulpa ist zumeist mit einer Läsion des periradikulären Gewebes in Form einer Parodontitis apicalis oder eines apikalen Abszesses assoziiert. Zur Therapie müssen in den meisten Fällen eine vollständige mechanische Entfernung des erkrankten Gewebes aus dem Wurzelkanal sowie eine chemische Desinfektion des infizierten Wurzelkanalsystems erfolgen. Um eine erneute Infektion zu verhindern, ist eine bakteriendichte Obturation des Wurzelkanals notwendig (Stellungnahme Wurzelkanalaufbereitung DGZ/DGZMK, Stand 4/2000).

Unter einer Vielzahl verschiedenster Wurzelfülltechniken stehen u. a. thermoplastische, trägerbasierte Wurzelkanalfüllungen zur Verfügung, wie sie erstmals 1883 in ihrer Ursprungsform erprobt wurden (Perry 1883). Damals noch in Form eines mit Guttapercha umwickelten Golddrahtes in den Wurzelkanal eingebracht, besitzen heutige Techniken einen flexiblen, mit Guttapercha ummantelten Kunststoffträger (Thermafil-System, Dentsply/Maillefer, Konstanz, Deutschland).

Sollte eine Wurzelkanalbehandlung letzten Endes nicht zu einer Heilung des periradikulären Gewebes führen, kann von einem endodontischen Misserfolg ausgegangen werden. Hier bietet eine Revisionsbehandlung die Möglichkeit einer Korrektur. Die Revisionsbehandlung umfasst eine erneute Wurzelkanalbehandlung mit dem Ziel einer anschließenden Rekonvaleszenz des periradikulären Gewebes (Stellungnahme Revision einer Wurzelkanalbehandlung, DGZ/DGZMK, Stand 7/2004).

Im Falle einer Thermafil-Obturation muss der Kunststoffträger mitsamt der umgebenden Guttapercha vollständig entfernt werden. Hierzu können diverse Techniken eingesetzt werden, beispielsweise die Handinstrumentierung oder maschinelle Entfernung. Die höhere Dichte und Abrasionsresistenz des zentralen Kunststoffträgers der Thermafil-Obturatoren stellen eine besondere Herausforderung dar.

Zur Beurteilung der Effektivität von Entfernungstechniken stellt aufgrund ihrer non-invasiven, dreidimensionalen und mikrometergenauen Darstellung und Berechnung des Wurzelkanalsystems inklusive enthaltener Füllmaterialien

zurzeit die Micro-Computertomographie den Goldstandard dar. Dadurch ist ein Vergleich von Techniken zur Entfernung von Wurzelkanalobturationen mit Hilfe volumetrischer Bestimmung des Füllmaterialabtrags bzw. des verbliebenen, nicht entfernten Füllmaterials möglich. Gleichzeitig lässt sich eine eventuelle Invasivität der Behandlung durch die Messung des Verlusts von Zahnhartsubstanz bestimmen.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist ein Vergleich zweier Entfernungstechniken für Thermafil-Obturatoren hinsichtlich ihrer Effektivität und Invasivität in gekrümmten Wurzelkanälen. Zur volumetrischen Bestimmung des verbliebenen Füllmaterials im Wurzelkanal und des Verlustes von Zahnhartsubstanz werden dreidimensionale micro-computertomographische Scans erstellt und ausgewertet. Zusätzlich sollen Komplikationen und prozedurale Fehler protokolliert werden.

## **1.1 Literaturübersicht**

### **1.1.1 Indikationen und Ziele der Wurzelkanalbehandlung**

Hauptindikation für eine Wurzelkanalbehandlung ist eine irreversible Schädigung der Pulpa. Dabei ist eine Mitbeteiligung des periradikulären Gewebe (Parodontitis apicalis oder apikaler Abszess) möglich. Der Erhalt bzw. die Genesung des periradikulären Gewebes ist das Hauptziel der Wurzelkanalbehandlung. Die irreversibel erkrankte Pulpa sollte in den meisten Fällen komplett aus dem Wurzelkanallumen entfernt werden, anschließend erfolgt die mechanische und chemische Entfernung von infiziertem Gewebe und Bakterien aus dem Wurzelkanalsystem. Um ein erneutes Eindringen von Bakterien zu verhindern, ist ein bakteriendichter Verschluss des Wurzelkanals, sowie des koronalen Zugangs nötig (Stellungnahme Wurzelkanalaufbereitung DGZ/DGZMK, Stand 4/2000). Zur Obturation des Wurzelkanals stehen zahlreiche unterschiedliche Materialien und Methoden zur Verfügung, u. a. das Thermafil-System.

### **1.1.2 Wurzelkanalobturation mit Thermafil-Obturatoren**

Das Thermafil-System (Dentsply/Maillefer, Konstanz, Deutschland) gehört zur Gruppe der thermoplastischen Wurzelkanalfüllmaterialien. Erstmals erwähnt wird eine vergleichbare Technik von Perry (1883), welcher mit plastischer Guttapercha umwickelte Golddrähte zur Wurzelkanalfüllung nutzte. Daraus weiterentwickelte Trägersysteme für die Guttapercha waren bis 1984 Stahl- oder Titanstifte. In der aktuellen Version wird ein Kunststoffträger verwendet. Im

GuttaCore-System (Dentsply/Maillefer, Konstanz, Deutschland) wird der Plastikträger durch einen Guttaperchakern ersetzt, der als stabiler, kreuzvernetzter Trägerstift fungiert.

Der Thermafil-Obturator besteht aus mit  $\alpha$ -Phase-Guttapercha beschichtetem, flexiblem Kunststoff. Dieser Kunststoffträger verbleibt nach dem Einbringen im Wurzelkanal. Der Kunststoffkern (im Folgenden ohne Guttapercha-Ummantelung als Kunststoffträger bezeichnet) führt zu einer höheren Volumenstabilität und einer erleichterten Applikation der Guttapercha. Aufgrund einer überdimensionierten Guttapercha-Beschichtung ist eine Anprobe des Obturators im Wurzelkanal nicht möglich. Hierfür werden sogenannte „*Verifier*“ verwendet, Handinstrumente mit einer 4%igen Konizität. Diese *Verifier* entsprechen der Passform des Thermafil-Obturators nach Erwärmen und sollten auf Arbeitslänge mit leichter Klemmpassung im Wurzelkanal sitzen. Vor der Insertion des Obturators ist die Applikation eines *Sealers* notwendig, der mit Hilfe von Papierspitzen dünn auf die Wurzelkanalwände aufgebracht wird. Empfohlen wird die Verwendung eines Epoxidharz-*Sealers*, der bei hohen Temperaturen verglichen mit anderen *Sealern* die geringsten Dimensionsveränderungen aufweist (Wu et al. 2004). Nach anschließender Erwärmung des Thermafil-Obturators in einem speziellen Ofen, wird dieser mittig auf Arbeitslänge inseriert. Aufgrund der Abkühlungskontraktion der Guttapercha muss für mehrere Sekunden ein apikalwärts gerichteter Druck auf den Obturator ausgeübt werden. Der koronale Teil des Thermafil-Obturators wird am Wurzelkanaleingang mit einem Diamantschleifer abgetrennt.

Der Thermafil-Obturator bietet den Vorteil einer vereinfachten Obturation gekrümmter und englumiger Wurzelkanäle. Aufgrund der Fließfähigkeit der  $\alpha$ -Guttapercha ist es gelegentlich möglich, auch Seitenkanäle und nicht-runde Wurzelkanäle zu füllen. Durch Vermeidung der Applikation mehrerer Guttapercha-Stifte ergeben sich eine einfache Handhabung und eine Reduktion des zeitlichen Aufwands zur Obturation.

Die Anwendung von Thermafil-Obturatoren ist bei nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum oder resorbiertem *Foramen apicale* kontraindiziert, da in diesen Fällen eine apikale Engstelle fehlt, wodurch ein Überpressen des Füllungsmaterials in das periapikale Gewebe wahrscheinlich wäre. Des Weiteren gibt es Anwendungsbeschränkungen bei Wurzelkanälen, welche nicht auf einen Konus von 4% präpariert werden können.

Eine weitere Fehlerquelle ist die Fertigungsvarianz seitens des Herstellers. Vittoria et al. untersuchten Thermafil-Obturatoren verschiedener Größen

hinsichtlich ihrer Normabweichungen und stellten starke Dimensionsschwankungen von 4-8% fest (Vittoria et al. 2018).

### 1.1.3 Dichtigkeit der Thermafil-Obturation

Eine wesentliche Eigenschaft von Wurzelkanalfüllungsmaterialien muss die hermetische Abdichtung des Wurzelkanals sein. Eine Verbindung zwischen periapikalem Gewebe und Mundhöhle muss unterbunden werden, um eine langfristig erfolgreiche endodontische Behandlung zu gewährleisten. Das sogenannte „*Leakage*“, also eine Undichtigkeit des Füllungsmaterials, stellt somit ein entscheidendes Untersuchungskriterium in Materialvergleichenden Studien dar.

Eine Vielzahl von Ex-vivo-Studien zeigte sehr gute Ergebnisse der Dichtigkeit der Thermafil-Obturationen, die vor allem mit der Wurzelkanalfüllungstechnik der kalten lateralen Kompaktion verglichen wurden. Dies ist die weitverbreitetste Obturationsmethode und wird meist als Gold-Standard bewertet (Slaus und Bottenberg 2002). In einer Studie von Gutmann et al. fielen nach bis zu fünf Monaten Lagerungs- und Einwirkzeit spezieller Farbindikatoren keine signifikanten Unterschiede im apikalen *Leakage* zwischen Thermafil und der kalt-lateralen Kompaktion auf (Gutmann et al. 2007a). Eine weitere Studie an ovalen Wurzelkanälen bestätigte für Thermafil-Obturatoren die beste Passung und *Sealer*-Penetration im Vergleich mit zwei weiteren Wurzelfüllungsmethoden (De Deus et al. 2008). Weitere Studien ergaben für Thermafil-Obturatoren sogar eine geringere apikale Undichtigkeit als für die laterale Kompaktion (Gençoğlu et al. 2002; Emmanuel et al. 2013). Bei Gegenüberstellung des Thermafil-Systems mit anderen thermoplastischen Wurzelfüllungsmethoden ergaben sich keine signifikanten Unterschiede (Marques-Ferreira et al. 2017).

Die Fähigkeit eines Füllungsmaterials, sich den Gegebenheiten des Wurzelkanalsystems anzupassen, ist essentiell für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung. Hierbei gilt es, Unregelmäßigkeiten in der Kanalwand optimal auszugleichen. Dieser Aspekt wurde in mehreren Studien zum Thermafil-System untersucht. De Deus et al. verglichen drei Wurzelkanalfüllmethoden hinsichtlich der Anlagerung des Füllmaterials an die Wurzelkanalwand und des Anteils des gefüllten Wurzelkanallumens mit Hilfe von Schliffbildern. Im Vergleich zur lateralen und warmen vertikalen Kompaktion schnitt Thermafil in geraden Wurzelkanälen signifikant besser ab (De Deus et al. 2008). Auch Neuhaus et al. wiesen an gekrümmten Wurzelkanälen auf einen Anpassungsvorteil von trägergestützten Obturationen gegenüber der *Single-Cone*-Technik hin (Neuhaus et al. 2016). Eine Ex-Vivo-Studie von Goldberg et

al. bestätigte die Überlegenheit thermoplastischer Wurzelkanalfüllungen in der Obturation lateraler Kanäle. Das Thermafil-System schloss dabei mit einem Ergebnis von 87% Obturation der künstlich angelegten Seitenkanäle ab, wesentlich höher als die laterale Kompaktion mit 60% (Goldberg et al. 2001).

#### **1.1.4 Apikale Extrusionen bei Thermafil-Obturationen**

Ein Problem insbesondere der thermoplastischen Fülltechniken stellt das Überpressen von Guttapercha oder *Sealer* durch das *Foramen apicale* dar, da es dabei zu einer Schädigung des periapikalen Gewebes kommen kann. Die Thermafil-Obturation zeigte in diversen Studien eine höhere Tendenz zu apikaler Extrusion als die laterale Kompaktion. Gutmann et al. bestätigten eine bessere Passung des Thermafil-Systems im Vergleich zur lateralen Kompaktion. Jedoch wurde bei weiten Foramina eine signifikant höhere Neigung zur Material-Überpressung festgestellt als bei kalter lateraler Kompaktion (Gutmann et al. 2007b). Eine weitere Studie bestätigte eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit der Extrusion bei Thermafil-Obturationen von geraden und gekrümmten Wurzelkanälen als bei der lateralen Kompaktion. Hierbei zeigte sich wiederum der Nutzen von Epoxidharz-*Sealern* bei Anwendung von Thermafil-Obturatoren. Ohne *Sealer* war die Wahrscheinlichkeit einer apikalen Extrusion nochmals deutlich höher (Schäfer und Olthoff 2002). Dummer et al. beschrieben ebenfalls eine signifikant höhere Häufigkeit der Überpressung von Thermafil in geraden Wurzelkanälen. In gekrümmten Kanälen war hingegen kein Unterschied zwischen der lateralen Kompaktion und der Thermafil-Obturation zu erkennen (Dummer et al. 1994). Unterschiedliche Ergebnisse könnten auf eine nicht einheitliche Insertionsgeschwindigkeit des Thermafil-Obturators zurückzuführen sein. Levitan et al. untersuchten den Einfluss der Insertionsgeschwindigkeit des Thermafil-Obturators auf die apikale Materialeextrusion. Dabei ergab eine schnelle Insertion eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der Extrusion. Zu langsames Einbringen resultierte in einer nicht ausreichenden Füllung des Wurzelkanalsystems (Levitan et al. 2003).

#### **1.1.5 Zeitlicher Aufwand bei Thermafil-Obturationen**

In der klinischen Praxis spielt neben einem geringen *Leakage*, guter Adaption an das Wurzelkanalsystem und geringer apikaler Extrusion auch das Zeitmanagement eine wichtige Rolle. Für Wurzelkanalfüllungen steigt zunehmend der Anspruch nach einfacher Applikation und geringem Zeitaufwand verbunden mit einer hohen klinischen Überlebensrate.

Die Anwendung von Thermafil-Obturationen erfüllt diese Ansprüche durch Insertion nur eines Obturators und die damit korrelierende Zeitersparnis. Dummer et al. bewiesen beim direkten Vergleich mit der kalten lateralen Kompaktion eine deutlich geringere Arbeitszeit bei der Thermafil-Obturation (Dummer et al. 1994). Eine klinische Studie von Chu et al. beurteilte ebenfalls den Zeitaufwand einer Wurzelkanalbehandlung mit Thermafil im Vergleich zur lateralen Kompaktion. Eine durchschnittliche Zeitersparnis von 20 Minuten wurde bei Wurzelkanalbehandlungen mit Thermafil-Obturation festgestellt (Chu et al. 2005).

### **1.1.6 Klinische Überlebensrate der Thermafil-Obturationen**

Die Etablierung von Wurzelfülltechniken in der klinischen Behandlung setzt eine hohe Erfolgs- und Überlebensrate voraus. Ein Vergleichswert findet sich in einem Review von Wong et al. zur klinischen Erfolgsrate verschiedener Obturationsmethoden. Dabei ergab sich eine mittlere Erfolgsrate von 83% für alle Füllungsstechniken (Wong et al. 2017).

Chu et al. verglichen die kalt-laterale Kompaktion mit der Thermafil-Obturation. Es fanden sich keine signifikanten Unterschiede im klinischen Resultat beider Füllungsstechniken. Die Überlebensraten der Wurzelkanalfüllungen nach drei Jahren waren mit ca. 80% annähernd gleich (Chu et al. 2005). Vergleichbare Ergebnisse nach ein und zwei Jahren lieferte auch eine klinische Studie von Lipski. Dabei lag die Überlebensrate beider Obturationstechniken durchschnittlich bei ca. 90% (Lipski 2000).

Über einen Beobachtungszeitraum von fünf Jahren bestätigten Pirani et al. die Überlebensrate der Wurzelkanalfülltechnik mit Thermafil in 88% der über 200 in die Studie eingeschlossenen Zähne. Davon war bei 85% der noch im Mund befindlichen Zähne eine vollständige Heilung des periapikalen Gewebes zu beobachten (Pirani et al. 2018). Die Anwendung der Thermafil-Obturation durch Spezialisten im Bereich der Endodontie zeigt in einem Studienzeitraum von zehn Jahren eine nahezu identische Überlebensrate von 87% aller 206 Zähne. Dabei wurden ebenfalls 85% als vollständig geheilt bewertet. Der Einsatz von Thermafil wurde als besonders zeitsparend bei qualitativ gleichwertigen klinischen Ergebnissen im Vergleich zu anderen Obturationstechniken bewertet (Chiara et al. 2019).

Die Verwendung von Thermafil-Obturatoren zur Wurzelkanalobturation nach einer Revisionsbehandlung zeigt eine hohe Überlebensrate. In einer retrospektiven, klinischen Studie waren 80% aller Revisionen mit Thermafil-

Obturatoren nach fünf Jahren noch funktionsfähig. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit dem für andere Obturationstechniken (Pirani et al. 2017).

### 1.1.7 Revision von Thermafil-Obturationen

#### 1.1.7.1 Indikationen und Ziele der Revision von Wurzelkanalfüllungen

Um den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung zu kontrollieren, muss eine regelmäßige klinische und röntgenologische Überprüfung erfolgen. Hierbei werden Kontrollintervalle nach sechs Monaten, einem Jahr, zwei Jahren und vier Jahren empfohlen (Stellungnahme „Good clinical practice“: Die Wurzelkanalbehandlung, DGZ/DGZMK, Stand 7/2007). Eine vollständige Heilung des periradikulären Gewebes ist erst erreicht, wenn klinische Symptomfreiheit und ein radiologisch unauffälliger Parodontalspalt vorliegen. Bei einer unvollständigen Heilung ist eine Verkleinerung der röntgenologisch sichtbaren endodontischen Läsion zu beobachten. Liegen diese Merkmale im Kontrollintervall nach einer erfolgten Wurzelkanalbehandlung nicht vor, handelt es sich um einen endodontischen Misserfolg (Stellungnahme zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen, DGZ/DGZMK, Stand 11/2000). Zu den häufigsten Ursachen eines solchen Misserfolges zählt eine persistierende Infektion des Wurzelkanals mit resultierender Entzündung des periradikulären Gewebes, meist hervorgerufen durch unbehandelte Wurzelkanäle oder Wurzelkanalabschnitte. Des Weiteren kann aufgrund einer mangelhaften koronalen Restauration eine Undichtigkeit entstehen, das sogenannte „*Micro-Leakage*“. Es handelt sich dabei um eine Wiederbesiedelung des Wurzelkanalsystems mit Bakterien und/oder Substraten (Stellungnahme Revision einer Wurzelkanalbehandlung, DGZ/DGZMK, Stand 7/2004).

Bei einem endodontischen Misserfolg stellt eine Revisionsbehandlung eine mögliche Therapieoption dar. Die Revision dient dem Erhalt des Zahnes oder der Rekonvaleszenz des periradikulären Gewebes. Eine erneute Wurzelkanalbehandlung hat einen bakteriendichten Verschluss und eine Beseitigung oder Prävention klinischer Symptome zum Ziel (Stellungnahme Revision einer Wurzelkanalbehandlung, DGZ/DGZMK, Stand 7/2004).

#### 1.1.7.2 Techniken zur Entfernung von Thermafil-Obturatoren

Die Revision einer Thermafil-Obturation beinhaltet die möglichst vollständige Entfernung des Füllungsmaterials. Hierbei müssen der Kunststoffträger, die Guttapercha und der *Sealer* vollständig aus dem Wurzelkanallumen entfernt

werden. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit eines Verbleibs von Bakterien und damit einen erneuten endodontischen Misserfolg.

In Anlehnung an die Wurzelkanalpräparation kann hierfür eine Handinstrumentierung mit endodontischen Feilen genutzt werden. Die Handpräparation erfordert wenig Instrumentarium, jedoch ein hohes Maß an Erfahrung vom behandelnden Zahnarzt. Es wird ein Handinstrument in die Thermafil-Obturation eingedreht, um den Kunststoffträger herauszuziehen. Der Einsatz von Lösungsmitteln erleichtert das Eindrehen der Feile. Frajlich et al. zeigten, dass eine Schwächung des Kunststoffträgers mit Handinstrumenten zu einem Abriss führen kann, wodurch eine Entfernung in einem Stück nicht möglich ist. Dies korreliert mit einem höheren Zeitaufwand im Vergleich zur Revision von lateral-kondensierten Obturationen. Es besteht ebenfalls eine höhere Gefahr der apikalen Extrusion von Füllungsmaterial (Frajlich et al. 1998).

Die maschinelle Entfernung von Thermafil-Obturatoren erfolgt mit Nickel-Titan-Instrumenten. Dabei wird der Kunststoffträger rotierend freigelegt. Die maschinelle Entfernung zeichnet sich gegenüber der Handinstrumentation durch eine deutlich kürzere Arbeitszeit aus. Es besteht jedoch eine erhöhte Frakturgefahr der genutzten Nickel-Titan-Instrumente, vor allem aufgrund einer Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit eines Revisions-Misserfolgs (Royzenblat und Goodell 2007). Hayakawa et al. bewiesen an simulierten Wurzelkanälen den Einfluss der Präparations- und damit der Obturatorgröße auf die Entfernbareit von Thermafil-Obturationen. Ein größeres Präparationsinstrument und eine stärkere Konizität der Wurzelkanalpräparation resultierten in einer verlängerten Zeit für die Entfernung. Die anfängliche Erweiterung des koronalen Anteils des gefüllten Wurzelkanallumens mit Gates-Glidden-Bohrern führte zu einer Verkürzung der Revisionszeit (Hayakawa et al. 2010).

Neben der rotierenden Instrumentation der Wurzelkanalfüllung besteht eine weitere Möglichkeit der maschinellen Entfernung mit Hilfe von NiTi-Instrumenten in reziproker Bewegung. Die Grundlage dieser Methode basiert auf der „*Balanced-Force-Technik*“. Auf eine Rotation im gegenläufigen Uhrzeigersinn folgt eine kürzere Rotation im Uhrzeigersinn. Dadurch wird die Feile im Wurzelkanal entlastet und es besteht eine geringere Frakturgefahr (Roane et al. 1985). Gavini et al. bestätigten für die reziproke Bewegung eine doppelt so hohe Zahl an Rotationen bis zum Instrumentenbruch verglichen mit rotierenden Instrumenten (Gavini et al. 2012). Ahn et al. bewiesen für reziprok arbeitende Instrumente ebenfalls eine erhöhte Resistenz gegenüber

Materialermüdung (Ahn et al. 2016). Hinsichtlich der Effektivität im Entfernen von Wurzelkanalfüllmaterialien liegen keine eindeutigen Ergebnisse beim Vergleich zwischen maschinell-rotierender und reziproker Präparationstechnik vor. Koçak et al. verglichen beide Methoden mit dem Ergebnis, dass die reziproke Bewegung effektiver zum Entfernen von Guttapercha im geraden Wurzelkanal ist als maschinell-rotierende Feilen oder Handinstrumente (Koçak et al. 2016). Fruchi et al. maßen den Materialabtrag von Reciproc-Instrumenten in gekrümmten Wurzelkanälen. Dabei konnten durchschnittlich 93% des zuvor eingebrachten Wurzelkanalfüllmaterials entfernt werden (Fruchi et al. 2014). Zuolo et al. bestätigten nur halb so viel verbleibendes Füllmaterial im Wurzelkanal für die reziproke Bewegung im Gegensatz zur rotierenden Instrumentierung und annähernd gleiche Werte wie für die Hand-Instrumentierung. Die reziproke Anwendung erzielte dabei deutlich kürzere Arbeitszeiten, sodass sie fast doppelt so schnell wie die rotierende Bewegung und mehr als dreimal so schnell wie die Hand-Instrumentierung war (Zuolo et al. 2013). Crozeta et al. wiesen hingegen dem Reciproc-System einen erhöhten Effektivitätsverlust im apikalen Drittel bei ovalen Wurzelkanälen nach. Je weiter apikal die sich reziprok-bewegende Feile vordrang, desto mehr Materialrückstände gab es im Vergleich zu rotierender und adaptiver Instrumentierung (Crozeta et al. 2016b). De Souza et al. verglichen die Revision gerader, mit der kalten lateralen Kompaktion gefüllter Wurzelkanäle hinsichtlich ihrer Effektivität. Dabei wurde kein signifikanter Unterschied im verbliebenen Füllungsmaterial zwischen der Reciproc-Technik und der rotierenden Technik gemessen. Die Arbeitszeit zum Erreichen der Arbeitslänge war jedoch mit ersterer Technik deutlich schneller (De Souza et al. 2015). Nevares et al. fanden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in Dentinabtrag, Arbeitszeit, Materialrückstand und unbearbeiteten Kanalwänden zwischen der Verwendung des Reciproc-Systems und herkömmlicher rotierender Systeme in gekrümmten Wurzelkanälen (Nevares et al. 2016).

Ein Review von Plotino et al. zu reziproken Feilensystemen zeigte eine höhere Lebensdauer bei nicht reduzierter Schneidleistung verglichen mit rotierenden Systemen. Dentinabtrag sowie Materialrückstände zeigen keinen signifikanten Unterschied bei Verwendung beider Techniken zur Entfernung von Wurzelfüllmaterialien, wobei die reziproke Anwendung deutlich kürzere Arbeitszeiten vorzuweisen hatte. Es bestand kein direkter Zusammenhang zwischen dem gehäuften Auftreten von Dentinrissen und der Anwendung von Reciproc-Feilen (Plotino et al. 2015).

Kongruente Ergebnisse lieferte ein Review von Rossi-Fedele und Ahmed, in dem 22 Studien hinsichtlich der Effektivität von Revisionsbehandlungen

verglichen wurden. Die alleinige Nutzung von Wurzelkanalinstrumenten führte demnach nicht zur vollständigen Entfernung von Wurzelfüllungsmaterialien. Die Revision durch herkömmliche maschinell-rotierende Instrumentierung und die reziproke Präparation unterschieden sich nicht hinsichtlich ihrer Effizienz. Iatrogene Fehler wurden lediglich bei der Entfernung des Füllmaterials mit Hilfe von Handinstrumenten vermieden. Der Einsatz von Lösungsmitteln zur leichteren Entfernung von Füllungsmaterialien ergab widersprüchliche Resultate (Rossi-Fedele und Ahmed 2017).

#### 1.1.7.3 Entfernung von Thermafil und anderen Obturationen

Die Entfernung von Wurzelkanalfüllungen stellt auch für erfahrene Zahnärzte eine Herausforderung dar und ist eine zeitintensive Behandlungsmaßnahme. Vorgehen und Entfernungsmethode werden dabei maßgeblich durch die Art der Obturationstechnik bestimmt.

Vergleichende Studien bezogen sich vor allem auf das nach der Revision verbliebene Füllmaterial im Wurzelkanal sowie auf den praxisrelevanten Zeitaufwand. Pirani et al. verglichen die kalt-laterale Kompaktion im Revisionsverhalten mit der Thermafil-Technik. Nach initialer Bearbeitung mit Gates-Glidden-Bohrern erfolgte ein Vergleich zwischen Handinstrumentierung, maschineller Instrumentierung und Ultraschall-Feilen. Weder zwischen den Revisionsmethoden, noch den zu vergleichenden Füllungsmethoden resultierte ein signifikanter Unterschied. Eine vollständige Entfernung des Füllmaterials wurde in keinem Fall erreicht (Pirani et al. 2009).

Beim Vergleich mit anderen thermoplastischen Füllungsmaterialien zeigen sich ähnliche Resultate. Nevares et al. verglichen die Entfernung von Thermafil- und GuttaCore-Obturationen. Die Menge des an der Wurzelkanalwand zurückgebliebenen Füllmaterials unterschied sich nicht. Für die Entfernung des Thermafil-Obturator wurde jedoch ein deutlich höherer Zeitaufwand gemessen (Nevares et al. 2015). Ähnliche Ergebnisse zeigten Rödiger et al. für eine maschinelle Instrumentierung (ProTaper Universal) in gekrümmten Wurzelkanälen. Hierbei erwies sich die Entfernung des Thermafil-Obturator ebenfalls als zeitlich aufwändiger als die Entfernung von GuttaCore bei annähernd gleichem Dentinverlust und Material-Rückständen (Rödiger et al. 2018a). Beasley et al. wiesen für die maschinelle Entfernung des Thermafil-Obturator auch einen höheren Zeitaufwand nach. Außerdem stellte sich ein erhöhtes Frakturrisiko der Nickel-Titan-Feilen in der Thermafil-Gruppe heraus (Beasley et al. 2013).

#### 1.1.7.4 Entfernung von frakturierten Wurzelkanalinstrumenten und Stiftsystemen

Ähnlich wie die Kunststoffträger der Thermafil-Obturation stellen frakturierte Wurzelkanalinstrumente ein Hindernis bei der Revisionsbehandlung dar. Diese gilt es dabei nach Möglichkeit vollständig zu entfernen. Dazu werden teilweise andere, aber auch gleiche oder ähnliche Techniken angewandt wie die oben beschriebenen Revisionsmethoden für Thermafil-Obturatoren.

Ein Behandlungserfolg umfasst die Entfernung aller Fragmente oder eine Umgehung dieser, falls eine Entfernung nicht möglich ist. Dadurch ist die Möglichkeit für eine adäquate Neudesinfektion und Neuobturation des Wurzelkanals gegeben. Hülsmann und Schinkel wiesen *in vitro* eine erhöhte Erfolgchance zur Bergung von Fragmenten koronal der Wurzelkanalkrümmung nach. Befand sich das frakturierte Instrument jedoch in oder apikal der Krümmung, ergab sich eine Misserfolgsrate von mehr als 50%. Der Erfolg hängt hierbei ebenfalls von weiteren Faktoren wie der Instrumentenart und Größe sowie dem Krümmungswinkel des Wurzelkanals ab (Hülsmann und Schinkel 1999). Eine klinische Auswertung aus einer Spezialisten-Praxis ergab eine Erfolgsrate von 95% bei Entfernung von insgesamt 170 Fragmenten. Dafür waren die Lokalisation des Fragmentes und der Krümmungsgrad des Wurzelkanals entscheidend (Cujé et al. 2009).

Eine weitverbreitete und vorrangig angewandte Methode der Fragment-Entfernung ist die Ultraschall-Technik. Dabei wird der koronale Anteil des frakturierten Instruments unter größtmöglicher Substanzschonung mit Ultraschall-Feilen freigelegt. Anschließend erfolgt eine weitere zirkuläre Freilegung und Lockerung des Bruchstücks mit Hilfe von kleineren Ultraschall-Feilen. Diese Technik resultiert in hohen Erfolgsraten, sofern sich das Fragment koronal oder in der Krümmung befindet (Ward et al. 2003). Shahabinejad et al. erreichten bei der Ultraschall-unterstützten Entfernung frakturierter Nickel-Titan-Instrumente eine Erfolgsrate von 80%. Die Misserfolgsrate stieg, je weiter apikal sich das Bruchstück in der Wurzelkanalkrümmung befand (Shahabinejad et al. 2013). Eine klinische Studie von Fu et al. zur Entfernung frakturierter Wurzelkanalinstrumente in 102 Wurzelkanälen, durchgeführt mit Hilfe der Ultraschall-Technik, ergab eine Überlebensrate der Zähne von 81,8%. Es bestand kein signifikanter Unterschied zwischen einer vollständigen Entfernung und einer Umgehung des Fragments (Fu et al. 2011). Die Ultraschall-Technik ist zur Entfernung von Thermafil-Obturatoren aber nicht geeignet, da die Kunststoffträger die Ultraschallschwingungen nicht adäquat weiterleiten.

Eine weitere Technik zur Entfernung der Bruchstücke stellt die sogenannte Tube-Technik dar. Das Instrument wird koronal freigelegt und mit Hilfe einer Röhre gefasst. Beide Elemente werden mit Kunststoff aneinander befestigt und anschließend wird der gesamte Verbund aus dem Wurzelkanal gezogen. Damit ist eine Bergung vor allem koronal gelegener Fragmente möglich. Die Art des Fragmentes ist dabei entscheidend für die benötigte Kraftausübung. Hedström-Feilen erfordern eine höhere Kraftentwicklung als Feilen vom Reamer-Typ. Der zum Verbund wichtige Kunststoff sollte dementsprechend hohe Zugkräfte aushalten. Lichthärtende Komposite sind hierbei zu bevorzugen (Wefelmeier et al. 2015). Diese Technik kann auch zur Entfernung von Thermafil-Obturatoren angewendet werden.

Eine neue Möglichkeit zur Bergung von frakturiertem Wurzelkanalinstrumentarium bietet der sogenannte FragRemover, welcher ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Studie ist. Dabei wird eine Drahtschleife mit Hilfe einer Kanüle so in den Wurzelkanal eingebracht, dass eine Umschlingung des Fragments vorgenommen werden kann. Mit Hilfe einer Stellschraube zur Fixierung des Drahtes wird eine Sicherung des Verbundes zwischen Drahtschleife und frakturiertem Instrument vorgenommen. Mehrere Fallberichte belegen den Nutzen des FragRemovers zur Luxation von tief im Wurzelkanallumen frakturierten endodontischen Instrumenten bei komplexer Wurzelkanalanatomie. Dabei wird der minimalinvasive Einsatz des FragRemovers hervorgehoben (Arnold 2016).

Auch Wurzelkanalfüllungen mit heutzutage nicht mehr verwendeten Silberstiften bedürfen häufig einer Revisionsbehandlung und müssen vollständig aus dem Wurzelkanal entfernt werden. Eine initiale Entfernung der Silberstifte mit Hilfe von Handinstrumenten ließ sich in 57% der Fälle durchführen. Der Einsatz von Ultraschall-Feilen wird ebenfalls empfohlen, jedoch ist hierbei eine Schwächung und somit eine mögliche Fraktur des Silberstiftes möglich (Hülsmann 1990). Auch die Tube-Technik kann zur Entfernung der Silberstifte angewendet werden. Der adhäsive Verbund ist umso stärker, je weiter das Röhrchen den Stift umfasst. Demnach erzielten Umfassungstiefen von 3 mm die größtmögliche Kraftentwicklung zur Luxation des Silberstiftes. Dabei ist eine exakte Passung beider Teile ineinander wichtig (Spriggs et al. 1990).

### **1.1.8 Die Micro-Computertomographie**

Bei der Micro-Computertomographie (Micro-CT) handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren auf Grundlage von Röntgenstrahlung, mit deren Hilfe eine radiographische und non-destruktive Darstellung von Objekten möglich ist. Es wird ein Computer genutzt, um aus den Absorptionswerten der das Objekt

durchdringenden Röntgenstrahlung ein Bild in drei Dimensionen zu erzeugen. Dabei werden Auflösungswerte im Mikrometerbereich erzielt.

Auf Grundlage der klinisch eingesetzten Computertomographie wurde das Micro-CT in den späten 1980er Jahren entwickelt (Feldkamp et al. 1989). Es bietet eine wesentlich höhere Auflösung von 5 bis 50  $\mu\text{m}$  (Feldkamp et al. 1989) als die konventionelle Computertomographie mit maximal 1 mm Auflösungsvermögen (Engelke et al. 1999).

#### 1.1.8.1 Aufbau und Funktionsweise der Micro-Computertomographie

Die Micro-Computertomographie setzt sich aus der Untersuchungseinheit, der Recheneinheit und der Bedieneinheit zusammen. In der Untersuchungseinheit befinden sich die Strahlungsquelle und der gegenüberliegende Detektor. Dazwischen liegt ein Objektträger zur Aufnahme des gewünschten Untersuchungskörpers. Um die Röntgenröhre herum befindet sich meist eine Bleiummantelung, die mit Hilfe einer Öffnung die Röntgenstrahlen zu einem kegelförmigen Strahl bündelt, welcher nun das gewünschte Objekt durchdringen kann. Die gebündelte Strahlung wird mit diversen Blenden modifiziert, um die Belichtungszeit des Objektes zu kontrollieren. Dies hat Einfluss auf Schärfe und Kontrast des Objekt-Abbildes. Eingebaute Filter im Strahlengang ändern das Energiespektrum auf Grundlage der Absorption ungewünschter Wellenlängen der Röntgenstrahlung. Der Kegelstrahl trifft nun auf das zu analysierende Objekt, welches auf einem rotierenden Träger platziert ist. Den Abschluss des Strahlenganges nach Durchdringen des Objektes bildet der Detektor, bestehend aus einem Szintillationskristall, welcher durch Röntgenstrahlung sichtbares Licht freisetzt. Mit Hilfe eines CCD-Sensors wird diese Lumineszenz in digitale Signale umgewandelt. Anschließend ist eine Verarbeitung mit der Recheneinheit möglich, wobei zweidimensionale Schichtaufnahmen zu einem dreidimensionalen Datensatz zusammengefügt werden. Grundlage dafür bildet die Rotation des Objektträgers und die dadurch veränderte Lage zum Strahlengang. Somit ist es möglich, Röntgenaufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln zu erstellen. Den wesentlichen Unterschied zur konventionellen Computertomographie bildet dabei die Drehung der zu untersuchenden Probe, während der Strahlengang unverändert bleibt.

Der ablaufende Prozess und die entsprechenden Parameter für die Analyse des Objekts werden über die Bedieneinheit gesteuert, die mit einer Untersuchungs- und Recheneinheit verknüpft ist.

### 1.1.8.2 Bedeutung der Micro-Computertomographie in der Endodontologie

Die Entwicklung der Micro-Computertomographie schuf eine neue, non-invasive Methode für viele Ex-vivo-Untersuchungen vor allem im Bereich der Medizin.

Die Verwertbarkeit von Micro-CT-Daten musste jedoch erst einmal evaluiert werden, um eine Nutzung in Forschung und Wissenschaft zu bestätigen. Kuhn et al. verglichen histologische Knochenuntersuchungen mit der Micro-CT-Datenerhebung. Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Verfahren festgestellt. Dies bestätigt die Micro-Computertomographie als exakte und reproduzierbare Untersuchungsmethode, ohne destruktive Einflüsse auf die Probe, im Gegensatz zur histologischen Analyse (Kuhn et al. 1990). Ein vergleichbares Ergebnis lieferten Jung et al. für die Forschung in der Endodontologie. Das Micro-CT stellte sich als geeignetes Verfahren zur Beurteilung von Wurzelkanalfüllmaterialien heraus (Jung et al. 2005).

Die Grundlage der Endodontologie bildet die Kenntnis über die Wurzelkanalanatomie. Die Nutzung des Micro-CT zur Untersuchung der Anatomie und Morphologie von Wurzelkanälen stellt eine schnellere und zuverlässigere Technik der Bestimmung von Lage und Volumen des Kanalsystems dar als bis dahin angewandte Methoden (Bjørndal et al. 1999; Peters et al. 2000). Aufgrund dessen kann ein neues Klassifikationssystem für Wurzelkanäle notwendig werden, da ältere Unterteilungen nicht auf dreidimensionaler Bildgebung beruhen (Ahmed et al. 2017).

Die volumetrischen Messungen mit Hilfe der Micro-Computertomographie lassen nicht nur Berechnungen des Wurzelkanallumens zu, sondern erlauben auch, eine Veränderung dieses Volumens zu beurteilen. Damit kann eine Entfernung von Dentin durch Wurzelkanalpräparationen gemessen werden. Dies erlaubt vergleichende Studien hinsichtlich der Effektivität von Präparationsinstrumenten (Peters und Paqué 2011; Guimarães et al. 2017; Venino et al. 2017).

Die Präparation des Wurzelkanalsystems kann in mikroskopischen Veränderungen der Zahnhartsubstanz resultieren. Die Micro-Computertomographie erlaubt es, Strukturmodifikationen im Mikrometer-Bereich zu erkennen. Somit können vor allem mögliche Auswirkungen auf das den Wurzelkanal umgebende Dentin nachgewiesen werden. Es handelt sich dabei meist um Mikro-Risse (Bayram et al. 2017; Oliveira et al. 2017; Rödiger et al. 2018b).

Das Micro-CT ist ebenfalls in der Lage, röntgenopake Materialien unterschiedlicher Art darzustellen. Somit ist eine Wiedergabe obturierter Wurzelkanäle möglich. Dadurch können Wurzelkanalfüllmaterialien, beispielsweise

Guttapercha oder *Sealer* aufgrund einer anderen Strahlungsdurchlässigkeit unabhängig vom Dentin vermessen werden. Dies kommt insbesondere der Beurteilung von Entfernungsmethoden an obturierten Wurzelkanälen zugute. Demnach kann die Effektivität von Revisionsinstrumenten oder einer Revisionstechnik anhand der verbliebenen Füllmaterialreste bestimmt werden (Rödig et al. 2012; Crozeta et al. 2016a; Rossi-Fedele und Ahmed 2017). Darüber hinaus hat sich die Micro-Computertomographie ebenfalls in der Materialuntersuchung von diversen Wurzelkanalfüllmaterialien bewährt. Die Verteilung von Kleinstbestandteilen dieser Werkstoffe kann durch das Micro-CT dargestellt werden (Zhang et al. 2017).

## 1.2 Ziele der Studie

Ziel der vorliegenden Ex-Vivo-Studie war es, unter simulierten klinischen Bedingungen zwei Methoden zur Entfernung von Thermafil-Obturatoren aus gekrümmten Wurzelkanälen zu untersuchen: die Entfernung mit Hilfe einer Schlingentechnik (FragRemover) und die Entfernung mit einer reziprok rotierenden Nickel-Titan-Feile (Reciproc).

Die Techniken wurden mit Hilfe der Micro-Computertomographie hinsichtlich ihrer Effektivität verglichen. Es wurden folgende Parameter überprüft und verglichen: Die Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers, das Restvolumen von Wurzelkanalfüllmaterial nach dem Entfernungsversuch, der entstandene Dentinabtrag durch den Entfernungsversuch und die Zwischenfälle während des Entfernungsversuches.

Es wurden die folgenden Nullhypothesen zugrunde gelegt:

FragRemover und Reciproc haben gleiche Ergebnisse im Entfernen des Thermafil-Kunststoffträgers.

FragRemover und Reciproc entfernen gleich große Anteile der Wurzelkanalfüllung bzw. hinterlassen gleich große Reste an Füllmaterial im Wurzelkanal.

FragRemover und Reciproc entfernen während der Entfernung der Obturatoren gleiche Mengen an Dentin.

Es kommt bei beiden Techniken gleich häufig zu Zwischenfällen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Versuchsaufbau

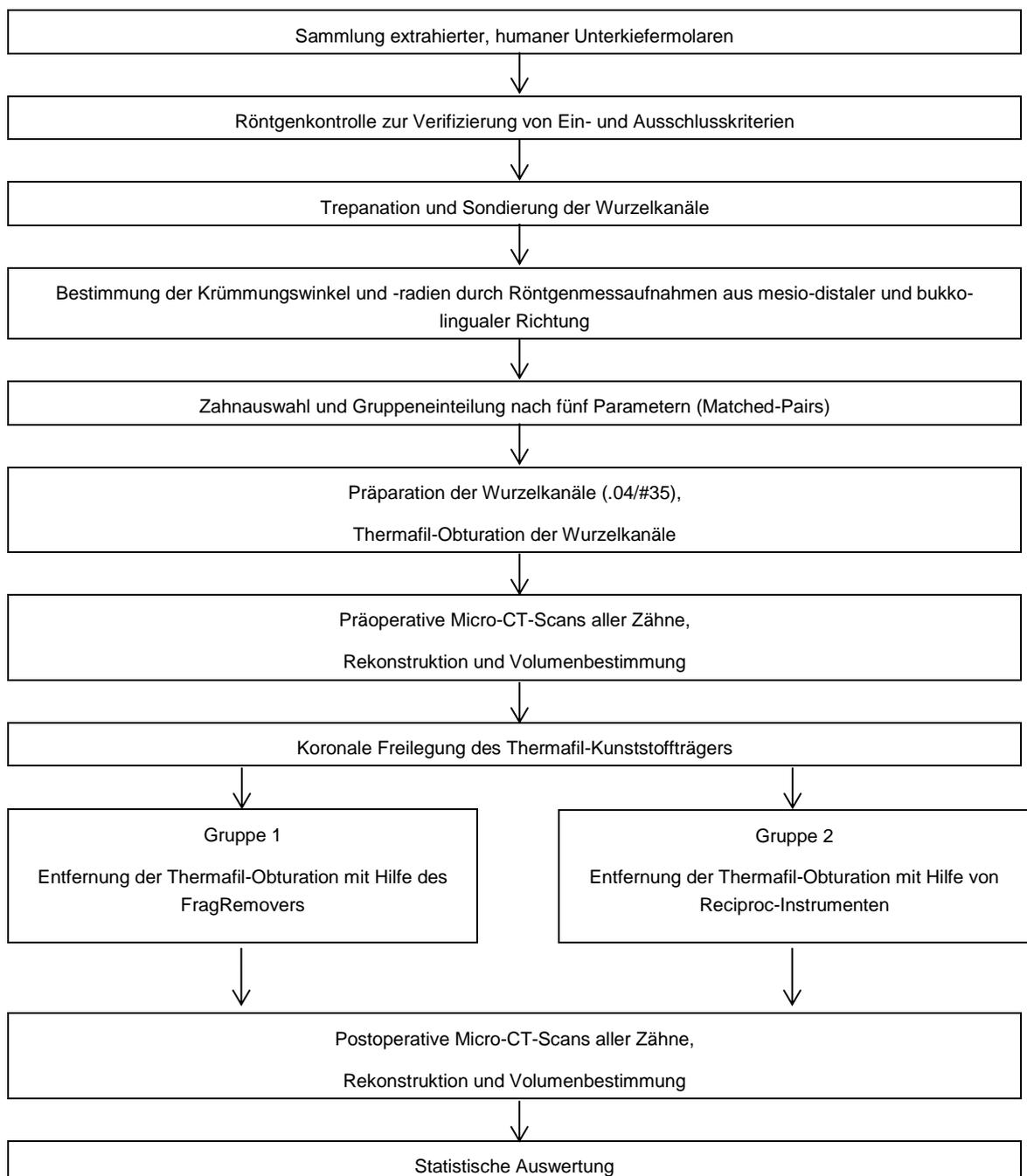


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs der Studie

## 2.2 Auswahl der Zähne

Für die Studie wurden 149 extrahierte humane Unterkiefermolaren verwendet. Die Zähne mussten ein abgeschlossenes Wurzelwachstum aufweisen sowie eine intakte Wurzelspitze. Des Weiteren durfte der verwendete mesio-bukkale oder mesio-linguale Wurzelkanal keine doppelte Krümmung besitzen. Wurzelkanalgefüllte oder durch Wurzelkaries befallene Zähne wurden ausgeschlossen. Hierzu wurden für jeden Zahn vor der Trepanation zwei Röntgenbilder in bukko-lingualer und mesio-distaler Richtung angefertigt (siehe Abb. 2). Der digitale Röntgentubus Heliodent Plus (Dentsply Sirona, York, USA) war mit 0,06 s Belichtungszeit auf 60 kV Spannung eingestellt. Es wurden nur Unterkiefermolaren mit einer koronal-apikalen Ausdehnung von 19-21 mm verwendet. Bei Größenüberschreitung wurde die Krone beschliffen, um eine maximale Zahngröße von 21 mm zu erreichen. Weitere Ausschlusskriterien wurden erst nach der Trepanation sichtbar. Hierzu gehörten sichtbare oder tastbare Isthmen zwischen den beiden mesialen Kanaleingängen. Anschließend wurde die Gängigkeit des Wurzelkanals bis zum *Foramen apicale* verifiziert. Zähne mit kalzifizierten Wurzelkanälen wurden ausgeschlossen. Anhand von Röntgen-Messaufnahmen mit inseriertem Reamer der ISO-Größe 15, wiederum aus zwei Richtungen, wurden Krümmungswinkel und -radius bestimmt (siehe Abb. 3).

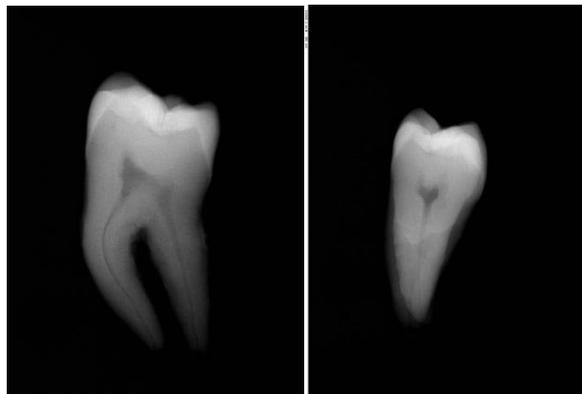


Abbildung 2: Bukko-linguale und mesio-distale Röntgenaufnahme (Zahn Nr. 2)

Die ausgewählten Molaren wurden mit Hilfe des Programmes SIDEXIS XG (Version 2.61, Dentsply Sirona, York, USA) vermessen und der Krümmungswinkel nach Schneider (Schneider 1971) sowie der Krümmungsradius nach Schäfer (Schäfer et al. 2002) in mesio-distaler und bukko-lingualer Richtung erfasst (siehe Abb. 4). Zusätzlich wurde die Wurzellänge vom Kanaleingang bis zum *Foramen apicale* gemessen. Hieraus

ergaben sich pro Wurzelkanal fünf Parameter. Als Einschlusskriterien für die Studie wurden ein Krümmungswinkel von 15-45° und Krümmungsradius von 3-15 mm festgelegt.



Abbildung 3: Bukko-linguale Röntgenmessaufnahme mit Reamer der Größe ISO 15 (Zahn Nr. 38)

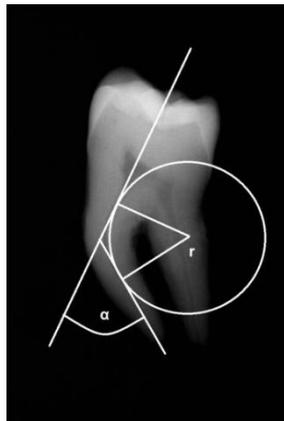


Abbildung 4: Schema zur Bestimmung von Krümmungswinkel ( $\alpha$ ) und Krümmungsradius ( $r$ ) des Wurzelkanals (Zahn Nr. 2)

Unter Berücksichtigung aller Ein- und Ausschlusskriterien verblieben 60 mesiale Wurzelkanäle von 60 Unterkiefermolaren. Die Zähne wurden während der gesamten Auswahl und Studiendauer in 0,1%iger Thymol-Lösung gelagert.

### 2.3 Einteilung der Versuchsgruppen

Alle für diese Studie ausgewählten Wurzelkanäle wurden in zwei gleich große Versuchsgruppen aufgeteilt (n=30). Hierzu diente die sogenannte *Matched-Pair*-Zuordnung. Dabei wurden jeweils zwei Wurzelkanäle mit nahezu identischen Parametern ausgewählt und einer der beiden nahezu identischen Zähne per Los einer der beiden Versuchsgruppen zugeordnet. Eine zusätzlich festgelegte Maximalabweichung von 7 mm bei dem Wurzelradius und 10° bei der Wurzelkrümmung sicherte die gleichwertige Verteilung der Zähne. Die Zusammensetzung der Gruppen wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test verifiziert: es fanden sich keine signifikanten Unterschiede ( $p > 0,05$ ).

### 2.4 Präparation der Zähne

Alle folgenden Arbeitsschritte wurden mit Hilfe einer optischen Vergrößerungshilfe (Lupenbrille Modell SV2 mit 2,7-facher Vergrößerung, starMed, Grafing, Deutschland) von einer einzigen Person durchgeführt. Alle Zähne wurden mit Hilfe eines rotierenden Diamantschleifers unter Wasserkühlung trepaniert. Dabei wurde lediglich der mesiale Anteil des Pulpakavums eröffnet und ein geradliniger Zugang zu den mesialen Wurzelkanäleingängen geschaffen (siehe Abb. 5).



Abbildung 5: Mesiale Trepanationsöffnung mit Blick auf die beiden mesialen Wurzelkanäleingänge

Im Anschluss an die Trepanation erfolgte die Bestimmung der Arbeitslänge. Der jeweilig ausgewählte mesiale Wurzelkanal wurde mit Reamern der ISO-Größe 08 oder 10 auf Gängigkeit getestet. Anschließend wurde ein Reamer der Größe ISO 15 eingebracht und bis zur Sichtbarkeit am *Foramen apicale* vorgeschoben. Diese Wurzelkanallänge bildete nach Subtraktion von 1 mm die

Arbeitslänge, welche bei allen weiteren Schritten eingehalten wurde. Daraufhin erfolgten die Röntgen-Messaufnahmen wie bereits beschrieben.

Die Präparation der mesialen Wurzelkanäle erfolgte mit dem Nickel-Titan-Präparationssystem BioRaCe (FKG Dentaire, La-Chaux-de-Fonds, Schweiz). Die Nickel-Titan-Instrumente wurden mit dem Endo IT professional Motor (VDW, München, Deutschland) bei  $600 \text{ Umin}^{-1}$  und einem Drehmoment von 1 Ncm, gemäß den empfohlenen Richtwerten des BioRaCe-Systems verwendet. Bei jedem Instrumentenwechsel erfolgte eine Zwischenspülung mit 3%igem Natriumhypochlorit (Hedinger, Stuttgart, Deutschland). Nach abgeschlossener Präparation wurde eine Abschlusspülung mit 5 ml 10%iger Zitronensäure-Lösung (Apotheke der Universitätsmedizin Göttingen), sowie 5 ml 3%igem Natriumhypochlorit durchgeführt. Die Spüllösungen wurden mit einer Spülkanüle bis maximal auf Arbeitslänge minus 3 mm in den Wurzelkanal eingebracht. Das Spülprotokoll wurde in dieser Kombination von Zitronensäure und Natriumhypochlorit angewendet, da es eine signifikant bessere Haftung der Guttapercha an der Wurzelkanalwand ermöglicht als die alleinige Anwendung von Natriumhypochlorit (Migliau et al. 2014). Die Präparation erfolgte nach der Crown-Down-Technik bis zur Instrumentengröße .04/35 in der empfohlenen Reihenfolge des BioRaCe-Systems. Diese beinhaltet eine Gleitpfadpräparation mit Handinstrumenten der ISO-Größe 15. Anschließend wurden die Nickel-Titan-Instrumente der Größen .05/15, .04/25, .06/25 und .04/35 in dieser Reihenfolge verwendet. Die Anwendung erfolgt in vier sanften Auf-und-Ab-Bewegungen der Feile bis zur Arbeitslänge. Falls diese nicht erreicht wurde, wurde das Instrument gereinigt und der Wurzelkanal nochmals gespült.

## 2.5 Obturation der Zähne

Die Füllung der für die Studie ausgewählten Wurzelkanäle erfolgte mit Thermafil-Obturatoren (Dentsply/Maillefer, Konstanz, Deutschland). Hierbei wurde zur Auswahl der Größe des Thermafil-Obturators ein „*Verifier*“ verwendet, welcher in den zuvor getrockneten Kanal eingebracht wurde (siehe Abb. 6). Dieser musste ohne Druck auf Arbeitslänge eine leichte Klemmpassung aufweisen. Aufgrund der gleichen Präparationsgröße aller Kanäle auf .04/35 wurde jeweils ein Thermafil-Obturator derselben Größe zur Obturation verwendet. Vor dem Einbringen wurde die Kanalwand mit Papierspitzen der ISO-Größe 30 (Orbis Dental, Münster, Deutschland) mit AH Plus Sealer (Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland) dünn beschichtet. Dabei wurde darauf geachtet, dass nicht zu viel *Sealer* in das apikale Wurzelkanaldrittel gelangte, um eine mögliche Überpressung des Materials zu

vermeiden. Die Guttapercha am ausgewählten Thermafil-Obturator wurde durch einen speziellen Ofen (Thermaprep Plus Oven, Dentsply/Maillefer, Ballaigues, Schweiz) auf die benötigte Temperatur von bis zu 180°C erhitzt, der Obturator mittig im Wurzelkanal platziert und mit kontinuierlichem Druck bis auf Arbeitslänge eingebracht. Dabei war die Aufrechterhaltung eines apikalwärts gerichteten Drucks für einige Sekunden nötig, um der beim Abkühlen auftretenden Schrumpfung der Guttapercha entgegenzuwirken. Der Kunststoffträger wurde am Kanaleingang mit einem diamantierten Schleifer abgetrennt und die Guttapercha mit einem heißen Plugger verdichtet. Dabei wurde eine einheitliche Länge von 9 mm Thermafil-Obturation im Wurzelkanal erreicht. Anschließend wurde die okklusale Trepanationsöffnung mit der provisorischen Verschlussmasse Cavit (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) abgedichtet. Die Zähne wurden bei 37°C und 100% Luftfeuchtigkeit 30 Tage gelagert.



Abbildung 6: Verifier der Größe 35 (oben) und Thermafil-Obturator Größe 35 (unten)

## 2.6 Der Micro-CT Scan

Die Zähne wurden sowohl nach der Obturation mit Thermafil als auch nach Durchführung der Entfernung micro-computertomographisch gescannt. Dies erlaubte eine genaue Messung des entfernten Wurzelfüllungsmaterials und des eventuellen Zahnhartsubstanzverlustes. Für die Scans wurde das Micro-CT SKYSCAN 1272 der Fa. Bruker (Billerica, USA) verwendet. Die Zähne wurden mit Peripherywachs (Surgident Periphery Wax, Heraeus, Hanau, Deutschland) am Objektträger befestigt. Die Scan-Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Parameter für die Micro-CT-Scans

Röhrenspannung	90 kV
Filter	Aluminium 0,5 mm + Kupfer 0,038 mm
Anzahl der Ansichten	470
Scan-Technik	180°
Belichtungszeit	2925 ms
Rotationsschritte	0,4°
Effektive Pixelgröße	10,5 µm
Auflösung	2452 x 1640

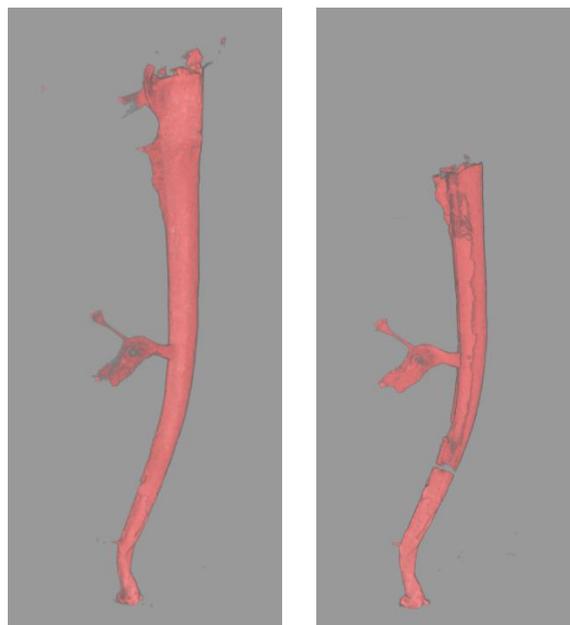


Abbildung 7: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Obturators am Zahn Nr. 122 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTvox-Software v.3.3, Bruker-microCT)

Die Rekonstruktion der dreidimensionalen Datensätze erfolgte mit Hilfe der NRecon-Software (v.1.7.0.3, Bruker-microCT). Die Datensätze wurden auf den Bereich der Zahnwurzel beschränkt. Eine mögliche Artefaktbildung, zurückzuführen auf eine Verlagerung der Probe während des Scanvorgangs, wurde, falls nötig, mit Hilfe der sogenannten „*Drift-correction*“-Funktion korrigiert. Folgende Parameter zur Rekonstruktion der Tomogrammdaten

wurden an jeder Probe angewandt, um eine Reproduzierbarkeit zu gewährleisten (Tabelle 2):

Tabelle 2: Parameter für die Rekonstruktion

Post alignment	2
Beam hardening correction	10%
Ring reduction	8
Smoothing	2
Histogram	-0,05 bis 0,22

## 2.7 Volumetrie

Zur Volumenbestimmung des Wurzelfüllmaterials und der Zahnhartsubstanz wurde zunächst eine Überlagerung der Tomogrammdaten der Zähne vor und nach dem Entfernungsversuch durchgeführt. Dies erfolgte mit Hilfe der DataViewer-Software (v.1.5.6.2, Bruker-microCT). Die Datensätze wurden semimanuell in allen drei Richtungsachsen passgenau überlagert. Anschließend erfolgte die Einstellung des VOI (*Volume of Interest*), welches die mesiale, gefüllte Zahnwurzel umfasste.

Anhand der überlagerten Datensätze wurden die gefragten Volumina berechnet. Dazu diente die CTAn-Software (v.1.12, Bruker-microCT). Zunächst wurden die Grenzen des ROI (*Region of Interest*) anhand der Schnittbilder der Zahnwurzel vor dem Entfernungsversuch festgelegt. Die untere Begrenzung bildete dabei das apikalste Schnittbild, welches Wurzelfüllmaterial enthielt. Die obere Begrenzung bildete das koronalste Schnittbild des vollständig intakten Therafil-Kunststoffträgers. Unter Zuhilfenahme eines Analyse-Algorithmus, welcher mit der Task-List-Funktion festgelegt wurde, wurden in jeder Probe die entsprechenden Volumina standardisiert berechnet. Es wurden die Histogramm-Einstellung zur Unterscheidung von Dentin (Bereich 60-95) und Wurzelfüllmaterial (Bereich 95-255) sowie die *Despeckle*-Funktion zur Reduzierung von Artefakten genutzt. Anschließend erfolgten die Volumenberechnung des Wurzelfüllmaterials vor und nach dem Entfernungsversuch und die Errechnung des Dentinabtrags, jeweils in Kubikmillimeter. Die Berechnung des prozentualen Anteils des entfernten Wurzelfüllmaterials wurde wie folgt durchgeführt:

$(\text{Entferntes Wurzelfüllmaterial} / \text{Wurzelfüllmaterial vor Entfernungsversuch}) * 100$

Anschließend wurde die Volumetrie ebenfalls identisch durchgeführt, jedoch mit Festlegung der koronalen Grenze der Schnittbilder auf exakt 5 mm von der unteren, apikalen Grenze entfernt. Dies erlaubt einen Vergleich beider Entfernungsmethoden zwischen dem gesamten Wurzelkanal und den apikalen 5 mm des Wurzelkanals.

## 2.8 Vorbereitung der Zähne für die Entfernungsversuche

Um eine möglichst detailgerechte klinische Situation zu simulieren, wurden alle Zähne in künstliche Unterkiefermodelle eingebracht und diese für die Entfernungsversuche in Phantomköpfe montiert. Hierzu wurde das Endo Training Model Castillo (VDW, München, Deutschland) verwendet (siehe Abb. 8). An physiologischer Molarenposition befand sich in einer simulierten, artifiziellen Zahnreihe eine Aussparung, in der die zu untersuchenden Unterkiefermolaren mit Hilfe einer Schraubzwinge befestigt wurden. Die künstlichen Unterkiefer wurden in einem für Simulationszwecke genutzten Phantomkopf befestigt. Daraufhin erfolgte die sorgfältige Entfernung des provisorischen Verschlussmaterials. Jeder Zahn wurde der klinischen Vorgehensweise entsprechend für die Entfernungsversuche mit Kofferdam isoliert.



Abbildung 8: Darstellung Endo Training Model Castillo (VDW, München, Deutschland) mit inseriertem Zahn Nr. 122

Der koronale Anteil des Kunststoffträgers wurde zirkulär 2 mm freigelegt (siehe Abb. 9). Die dafür zu entfernende Guttapercha und das den Wurzelkanal begrenzende Dentin wurden mit Hilfe eines Ultraschallsystems (VDW.ULTRA, VDW, München, Deutschland) und diamantierten Ansätzen (CAVI-2D-Ansatz,

REDO-2-Ansatz, VDW, München, Deutschland) entfernt. Dabei wurde auf maximale Schonung des freizulegenden Thermanfil-Kunststoffträgers geachtet.

Jeder Versuch wurde unter Zuhilfenahme eines dentalen Mikroskopes durchgeführt und durch einen langjährig endodontisch erfahrenen Zahnarzt durchgeführt.

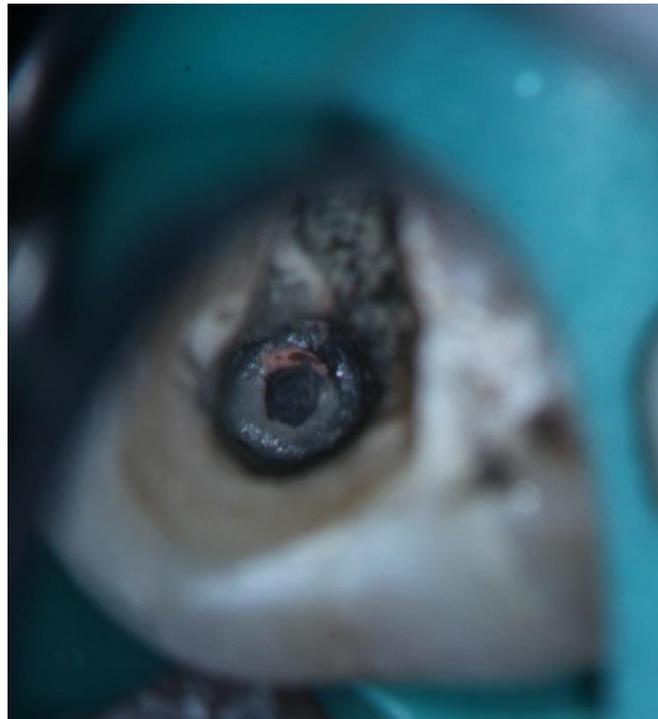


Abbildung 9: Koronale Ansicht des freigelegten Kunststoffträgers an Zahn Nr. 113

## 2.9 Entfernungsmethode Reciproc

Zur Durchführung dieser Entfernungstechnik wurde ein endodontisches Nickel-Titan-System mit reziprokem Bewegungsmuster gewählt (Reciproc, VDW, München, Deutschland). Es wurden nur Instrumente der Größe .08/25 (R25) und .06/40 (R40) (siehe Abb. 10) mit dem dazugehörigen Motor (VDW.SILVER RECIPROC, VDW, München, Deutschland) benutzt.



Abbildung 10: Darstellung der Reciproc-Instrumente in den Größen R25 und R40

Unter dem Dental-Mikroskop wurde mit variablen Vergrößerungen die Lage des Kunststoffträgers im Wurzelkanal und der darum zirkulär eingebrachten Guttapercha eruiert. Das Instrument R25 wurde schneidend in die größte zu sehende Guttapercha-Fläche neben dem Kunststoffträger eingebracht. Unter größtmöglicher Schonung der Zahnhartsubstanz und des Kunststoffträgers wurde mit Hilfe der reziproken Bewegung bis zur berechneten Arbeitslänge vorgedrungen. Anschließend erfolgte ein Wechsel auf das Instrument R40. Dieses wurde in das bereits freigelegte Lumen eingeführt. Mit ziehenden Bewegungen von apikal nach koronal wurde versucht, den Thermanfil-Obturator zu lockern und herauszuziehen. Eine größtmögliche Schonung der Zahnhartsubstanz und des Kunststoffträgers wurde auch hierbei angestrebt.

Die Vollständigkeit der Obturator-Entfernung des Kunststoffträgers und der Guttapercha wurde durch den Operateur kontrolliert, mögliche Nicht-Entfernbarkeit und Instrumentfrakturen dokumentiert. Nach abgeschlossenem Entfernungsversuch erfolgte eine Spülung des Wurzelkanallumens mit 2 ml destillierten Wassers, um lose Wurzelfüllungsrückstände zu entfernen. Anschließend wurde der Zahn aus seiner künstlichen Alveole gelöst und unter Einsatz des digitalen Röntgens, sowie der Micro-Computertomographie untersucht.

## 2.10 Entfernungsmethode FragRemover

Die Entfernung eines Obturatorsystems mit Hilfe einer Drahtschleife ähnelt der Technik der Entfernung frakturierter Wurzelkanalinstrumente. Der FragRemover (HanChaDent, Groitzsch, Deutschland) bietet die Möglichkeit, eine dünne durch eine endodontische Spülkanüle geführte Drahtschleife in den Wurzelkanal zu applizieren (siehe Abb. 11). Dabei wurde die Schleife um einen freien Abschnitt des zu entfernenden Objektes gelegt und anschließend durch Drehung einer Stellschraube am FragRemover zugeschnürt. Damit bildeten Objekt und Drahtschlinge einen festen Verbund, welcher Luxationsbewegungen zur Entfernung des Thermafil-Obturators erlaubte.



Abbildung 11: Darstellung der Drahtschleife des FragRemovers

Es wurde eine endodontische Spülkanüle mit dem Innendurchmesser von 0,5 mm und einer Länge von 42 mm verwendet (Endo Spülkanüle 25G, Transcodent, Kiel, Deutschland). Alle Versuche wurden mit einem Draht der Stärke 0,15 mm durchgeführt (FragRemover Draht, HanChaDent, Groitzsch, Deutschland). Dieser wurde doppelt in die Spülkanüle eingebracht und auf den FragRemover gespannt. Die so entstandene Drahtschlinge wurde unter Zuhilfenahme des Dental-Mikroskops über den zuvor koronal freigelegten Thermafil-Kunststoffträger geführt. Es wurde versucht, den Draht im am weitesten apikal freigelegten Bereich des Kunststoffträgers anzusetzen. Es folgte ein Zusammenziehen der Drahtschleife mit darauffolgender koronalwärts

gerichteter Zugsbewegung. Die Schwierigkeit in der Handhabung lag in der Festlegung der optimalen Verschlussstärke des Drahtes um den Kunststoffträger. Eine zu forcierte Schnürung des Drahtes konnte in einem Abriss des koronal freigelegten Kunststoffträgeranteils resultieren. Eine zu geringe Verschlusskraft hatte ein mögliches Abgleiten der Schlaufe vom Kunststoffträger zur Folge. Im Falle eines Scheiterns des ersten Entfernungsversuchs wurde dieser wiederholt. Geling auch im zweiten Versuch keine Entfernung wurde der Kunststoffträger 1 mm zusätzlichen koronal freigelegt. Daraufhin folgten weitere zwei Anwendungen der Apparatur.

Protokolliert wurden auch in dieser Gruppe die Vollständigkeit der Obturator-Entfernung, sowie ein mögliches Reißen oder Abgleiten der Drahtschlinge. Des Weiteren galt der Versuch als gescheitert, falls eine Entfernung nach dem vierten Versuch nicht gelang oder durch Abriss kein freiliegender Anteil des Kunststoffträgers zur Fixierung der Drahtschlinge zur Verfügung stand. Nach abgeschlossenem Entfernungsversuch erfolgte eine Spülung des Wurzelkanallumens mit 2 ml destillierten Wassers, um lose Wurzelfüllungsrückstände zu entfernen. Anschließend wurde der Zahn aus seiner künstlichen Alveole gelöst und unter Einsatz des digitalen Röntgens, sowie der Micro-Computertomographie untersucht.

## 2.11 Statistische Analyse

Die Analyse der Ergebnisse wurde mit Hilfe der ANOVA-Varianzanalyse und dem zweiseitigen Wilcoxon-Mann-Whitney-Test durchgeführt. Zur Auswertung und Datenanalyse diente das Software-System STATISTICA (v.13.3.704.0, StatSoft, Tulsa, Oklahoma, USA).

## 2.12 Materialliste

Digitaler Röntgenapparat	Dentsply Sirona, York, USA
Micro-CT	SKYSCAN 1272, Bruker, Billerica, USA
Winkelstück	Sirona, Bensheim, Deutschland
Schleifkörper, diamantiert	Komet, Lemgo, Deutschland
Thermafil-System	Dentsply/Maillefer, Konstanz, Deutschland

Thermaprep Plus Oven	Dentsply/Maillefer, Ballaigues, Schweiz
AH Plus Sealer	Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland
Reamer ISO 8-15	Dentsply Sirona, York, USA
Lupenbrille Modell SV2	StarMed, Grafing, Deutschland
Batt-Bohrer	Brasseler, Lemgo, Deutschland
BioRaCe-Feilen	FKG Dentaire, La-Chaux-de-Fonds, Schweiz
Endo IT professional Motor	VDW, München, Deutschland
Natriumhypochlorit (3%)	Hedinger, Stuttgart, Deutschland
Zitronensäure-Lösung (10%)	Apotheke der Universitätsmedizin Göttingen
Papierspitzen ISO 30	Orbis Dental, Münster, Deutschland
Cavit	3M ESPE, Seefeld, Deutschland
Peripherywachs	Heraeus GmbH, Hanau, Deutschland
Endo Training Model Castillo	VDW, München, Deutschland
Ultraschallsystem VDW.ULTRA	VDW, München, Deutschland
Ultraschallansatz CAVI-2D	VDW, München, Deutschland
Ultraschallansatz REDO-2	VDW, München, Deutschland
Reciproc-Endomotor VDW.SILVER	VDW, München, Deutschland
FragRemover	HanChaDent, Groitzsch, Deutschland
Endo-Spülkanüle 25G	Transcodent, Kiel, Deutschland
FragRemover Draht (0,15 mm)	HanChaDent, Groitzsch, Deutschland
Phantomkopf (PK-1 TSE)	Frasaco GmbH, Tettngang, Deutschland
Kofferdam	Henry Schein, Melville, USA

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Einteilung der Versuchsgruppen

Die verwendeten Unterkiefermolaren wurden anhand der Kriterien Krümmungswinkel und Krümmungsradius des Wurzelkanals in zwei Versuchsgruppen aufgeteilt. Dabei wurden Krümmungswinkel und -radien der mesialen Zahnwurzel in mesio-distaler und bucco-lingualer Richtung bestimmt sowie die Wurzellänge festgelegt. Unter Berücksichtigung dieser fünf Parameter wurden die Zähne in einer *Matched-Pair*-Zuordnung in zwei gleichartige Gruppen (n=30) eingeteilt. Die Zuweisung der beiden Zähne eines Paares zu jeweils einer der Versuchsgruppen erfolgte per Los. Die Mittelwerte dieser Parameter wurden mit dem Kruskal-Wallis-Test ( $p < 0,05$ ) verifiziert. Hierzu diente das Software-System STATISTICA (v.13.3.704.0, StatSoft, Tulsa, Oklahoma, USA). Ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen lag nicht vor ( $p > 0,05$ ).

Die durchschnittliche Wurzelkanalkrümmung lag bei  $21,6^\circ$  in bucco-lingualer und bei  $15,3^\circ$  in mesio-distaler Richtung. Die durchschnittlichen Krümmungsradien der Versuchszähne betragen 11,5 mm in bucco-lingualer Richtung und 20,2 mm in mesio-distaler Richtung. Die mittlere Wurzellänge, gemessen zwischen Wurzelkanaleingang und *Foramen apicale*, betrug 12,3 mm. Jede mesiale Wurzel der verwendeten Zähne erfüllte die Einschlusskriterien mit einem Krümmungswinkel von  $15-45^\circ$  und einem Krümmungsradius von 3-15 mm in mindestens einer röntgenologischen Messrichtung. In Tabelle 3 sind Mittelwerte und Standardabweichungen dargestellt.

Tabelle 3: Zusammenfassung aller Mittelwerte von Wurzellängen, Krümmungswinkeln und -radien der zwei Versuchsgruppen

Gruppe	Winkel BL in °	Radius BL in mm	Winkel MD in °	Radius MD in mm	Wurzellän- ge in mm
Reciproc	21,8 ± 5,5	11,4 ± 2,8	15,0 ± 8,0	20,5 ± 17,2	12,1 ± 1,2
FragRemover	21,4 ± 5,5	11,6 ± 3,3	15,6 ± 6,9	19,9 ± 13,5	12,5 ± 1,4
p-Wert	p=0,63	p=0,94	p=0,62	p=0,55	p=0,36

Angabe der Mittelwerte ± Standardabweichung, sowie Signifikanzen (p-Werte) (BL = bukkolinguale Richtung, MD = mesio-distale Richtung)

Die verwendeten 60 mesialen Wurzelkanäle wurden in Abhängigkeit vom Wurzelkrümmungswinkel in zwei Versuchsgruppen eingeteilt, wobei nur der größte Krümmungswinkel des Wurzelkanals berücksichtigt wurde (entweder aus bukkolingualer oder mesio-distaler Röntgenrichtung). Aus diesem Parameter wurde der Durchschnittskrümmungswinkel ermittelt. Dieser lag bei 23,75°. Dementsprechend wurden zwei Vergleichsgruppen gebildet. Alle größten Krümmungswinkel wurden anhand des Durchschnittswertes einer Gruppe zugeordnet. Somit entstanden eine Vergleichsgruppe mit moderatem Krümmungswinkel (n=30) unter 23,75° und eine Vergleichsgruppe mit starkem Krümmungswinkel über 23,75° (n=30).

Unabhängig von der Gruppierung anhand des Krümmungswinkels wurden die verwendeten Wurzelkanäle in Abhängigkeit vom Wurzelradius eingeteilt. Hierbei wurde der kleinste Radius einer Wurzel (entweder aus bukkolingualer oder mesio-distaler Röntgenrichtung) verwendet. Es wurde der Durchschnittsradius von 10,5 mm ermittelt. Daraus wurden wiederum zwei gleich große Vergleichsgruppen gebildet. Es entstand eine Gruppe mit geringem Krümmungsradius unter 10,5 mm (n=30) und eine Gruppe mit erhöhtem Krümmungsradius über 10,5 mm (n=30).

## 3.2 Entfernung der Thermafil-Obturatoren mit dem FragRemover

### 3.2.1 Entfernbarkeit der Thermafil-Obturatoren

In Abbildung 12 ist das Ergebnis der Entfernungsversuche durch den FragRemover in Abhängigkeit vom Krümmungswinkel des Wurzelkanals dargestellt. In Abbildung 13 ist das Ergebnis der Entfernungsversuche mit Hilfe

des FragRemovers in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung dargestellt.

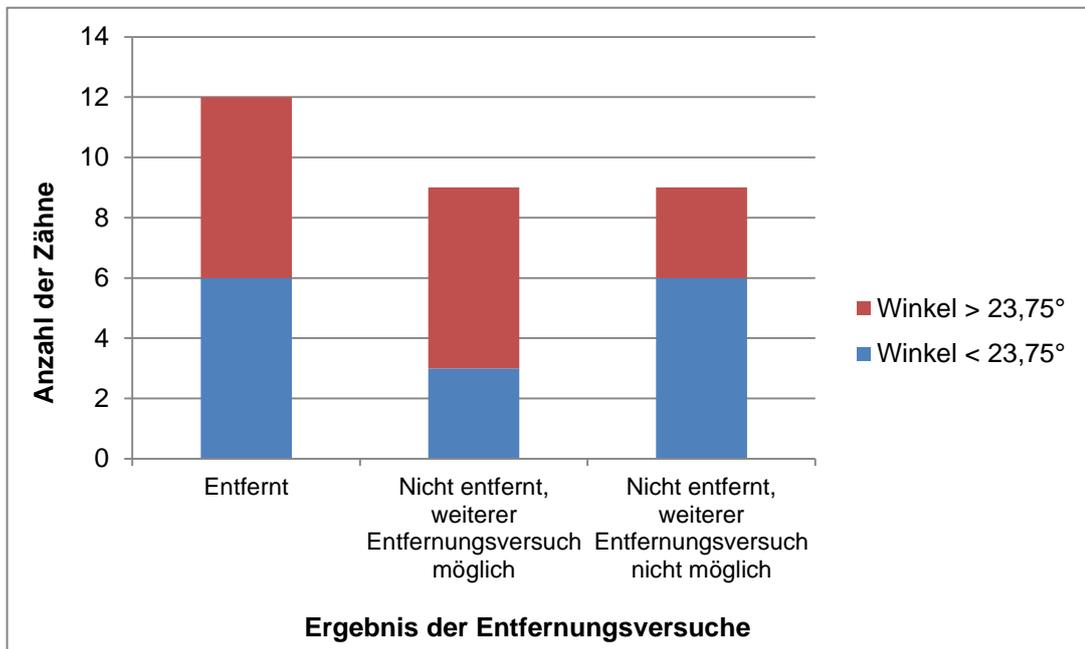


Abbildung 12: Ergebnis der Entfernungsversuche mit dem FragRemover in Abhängigkeit vom Winkel der Wurzelkanalkrümmung

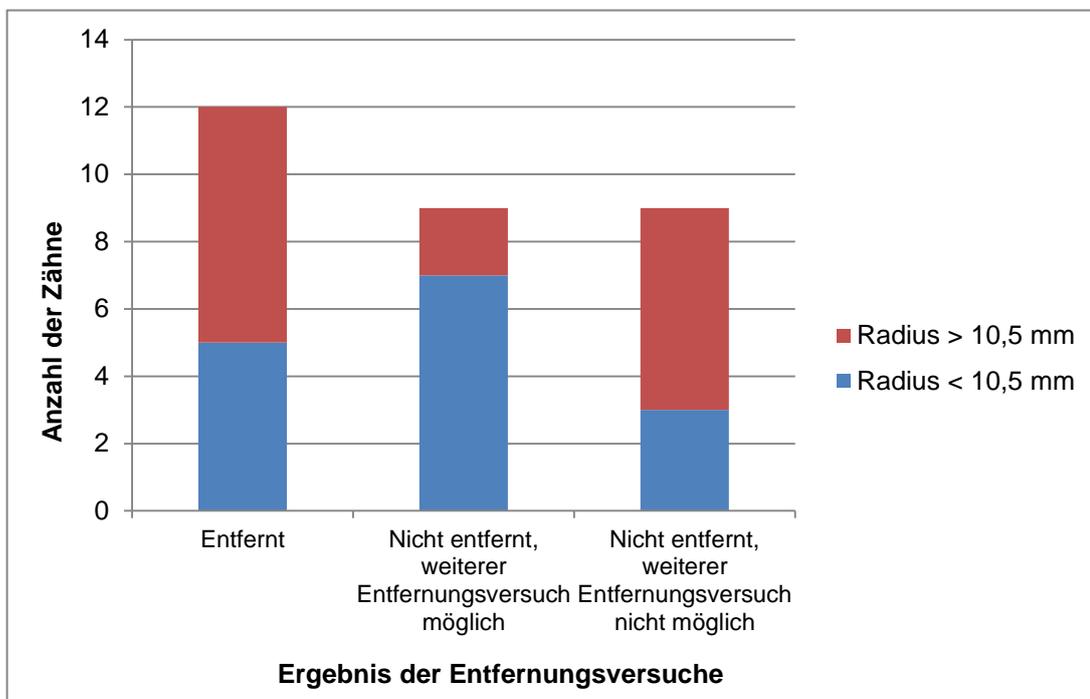


Abbildung 13: Ergebnis der Entfernungsversuche mit dem FragRemover in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung

Eine vollständige Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers gelang in zwölf von 30 Zähnen (40%), in sieben Fällen bereits im ersten Versuch, in drei Fällen im zweiten Versuch und in zwei Fällen im dritten Versuch. Als Erfolg wurde nur gewertet, wenn der Kunststoffträger der Thermafil-Obturatoren im Gesamten aus dem Wurzelkanallumen luxiert wurde (siehe Abb. 14). Die Kontrolle des entfernten Kunststoffträgers erfolgte durch Inspektion unter Verwendung optischer Vergrößerungshilfen (Lupenbrille und OP-Mikroskop) und anschließender röntgenologischer Kontrolle des Wurzelkanallumens (siehe Abb. 15). In 18 von 30 Fällen (60%) war eine Entfernung auch im zweiten Versuch nicht möglich. In neun Fällen war ein weiterer Entfernungsversuch mit Hilfe des FragRemovers aufgrund eines zu tiefen Abrisses des Kunststoffträgers nicht mehr möglich, da eine Freilegung des koronalen Kunststoffträgerendes und eine Applikation der Schlinge nicht mehr bewerkstelligt werden konnten. Dadurch war ein weiterer Entfernungsversuch nicht möglich. In den anderen neun Fällen der nicht erfolgreichen Entfernungsversuche wären eine weitere Freilegung und eine Luxation mit Hilfe des FragRemovers denkbar, dies war jedoch nicht mehr im Versuchsprotokoll vorgesehen. Dieses sah nur maximal vier Versuche vor. Somit wären weitere Entfernungsversuche möglich.

Wie den Abbildungen 12 und 13 zu entnehmen ist, bestand keine signifikante Korrelation zwischen dem Krümmungswinkel ( $p=0,80$ ) und -radius ( $p=0,84$ ) des Wurzelkanals im Hinblick auf die Entfernbarkeit des Kunststoffträgers mit Hilfe des FragRemovers.



Abbildung 14: Vollständige Entfernung des Kunststoffträgers mit Hilfe des FragRemovers (Zahn Nr. 15)



Abbildung 15: Koronale Ansicht des Wurzelkanals nach Entfernung des Kunststoffträgers (Zahn Nr. 15)

### 3.2.2 Komplikationen

In Abbildung 16 ist die Anzahl der beim Einsatz des FragRemovers aufgetretenen Komplikationen dargestellt.

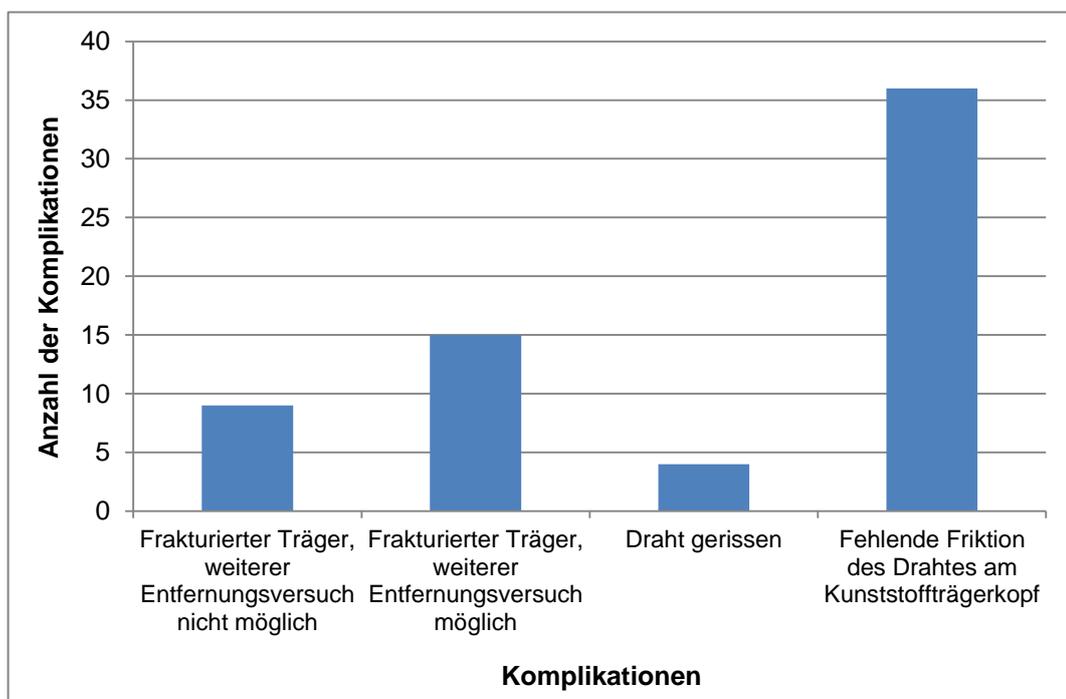


Abbildung 16: Komplikationen bei der Entfernung der Kunststoffträger mit dem FragRemover

Während der Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers unter Verwendung des FragRemovers traten Komplikationen auf. Insgesamt 64 fehlgeschlagene Luxationsversuche wurden registriert. Die größte Anzahl der vorgefallenen Komplikationen bildete dabei in 36 Fällen (56,3%) ein Abgleiten der Drahtschleife vom Kunststoffträger aufgrund fehlender Friktion. Fünfzehn Komplikationen (23,4%) traten durch eine Abtrennung des koronalen Anteils des Kunststoffträgers nach zu festem Zuziehen der Drahtschlinge auf (siehe Abb. 17), wobei eine Fortsetzung des Entfernungsversuches möglich war. In neun Luxationsversuchen (14,1%) war ebenfalls ein Abtrennen des apikalen Teils des Kunststoffträgers zu verzeichnen, jedoch war eine Fortsetzung des Entfernungsversuches nicht möglich. Bei vier Luxationsversuchen (6,3%) riss die Drahtschleife.



Abbildung 17: Beim Entfernungsversuch abgetrennter Kopf des Kunststoffträgers (Zahn Nr. 1)

### **3.3 Entfernung der Thermafil-Obturatoren mit Reciproc-Instrumenten**

#### **3.3.1 Entfernenbarkeit der Thermafil-Obturatoren**

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Entfernungsversuche mit Hilfe von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Krümmungswinkel des Wurzelkanals dargestellt.

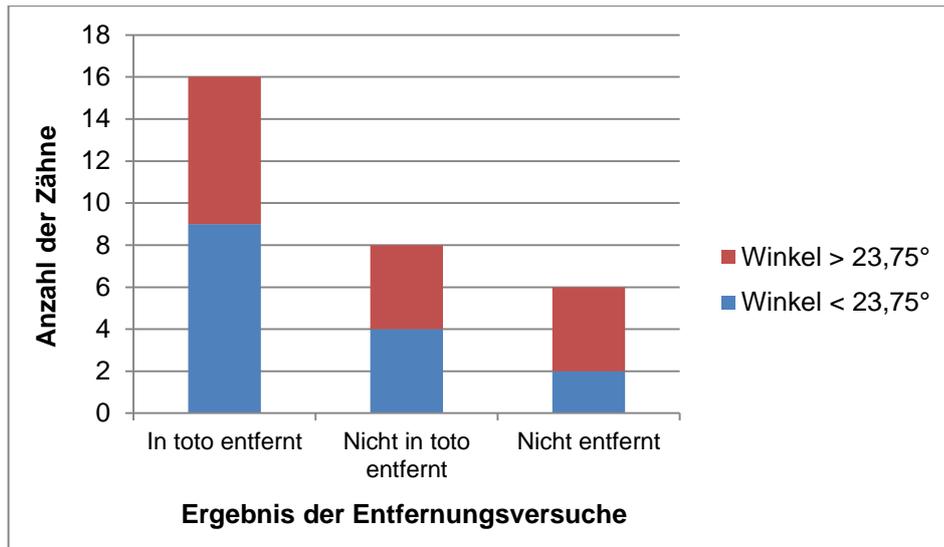


Abbildung 18: Ergebnisse der Entfernungversuche mit Reciproc in Abhängigkeit vom Krümmungswinkel des Wurzelkanals

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse der Entfernungversuche mit Hilfe von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung dargestellt.

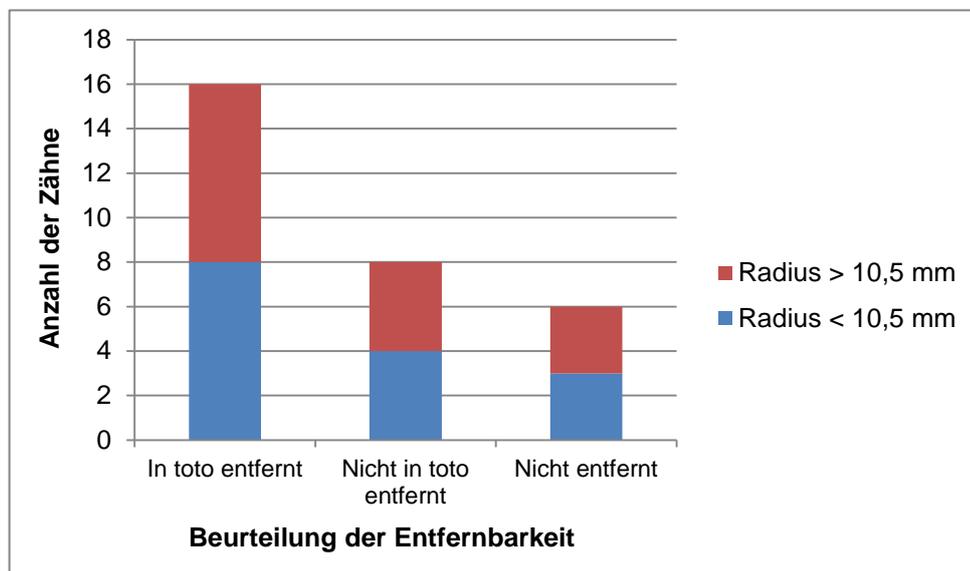


Abbildung 19: Ergebnisse der Entfernungversuche mit Reciproc in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkrümmung

Eine Entfernung des Therafil-Kunststoffträgers (bestehend aus in toto Entfernungen und nicht in toto Entfernungen) gelang in 24 von 30 Fällen (80%).

In 16 dieser 24 Fälle konnte der Kunststoffträger in toto geborgen werden (siehe Abb. 20). In acht von 24 erfolgreichen Entfernungen konnte der Kunststoffträger nur zerspannt und damit nicht in toto entfernt werden. Die Kontrolle des entfernten Kunststoffträgers erfolgte unter Verwendung optischer Vergrößerungshilfen (Lupenbrille und OP-Mikroskop) und durch anschließende röntgenologische Kontrolle des Wurzelkanals. Somit war mit Hilfe des Reciproc-Systems eine vollständige Entfernung in toto des Kunststoffträgers in 53,3% aller Fälle möglich. In sechs Zähnen (20%) gelang der Entfernungsversuch nicht.

Wie den Abbildungen 18 und 19 zu entnehmen ist, besteht keine signifikante Korrelation zwischen Krümmungswinkel ( $p=0.92$ ) und -radius ( $p=0.97$ ) der Wurzelkanäle im Hinblick auf die Entfernbarkeit des Kunststoffträgers mit Hilfe des Reciproc-Systems.



Abbildung 20: Entfernter Thermafil-Obturator durch Reciproc-Anwendung (Zahn Nr. 104)

### 3.3.2 Komplikationen

In Abbildung 21 ist die Anzahl der bei Reciproc-Anwendung aufgetretenen Komplikationen dargestellt.

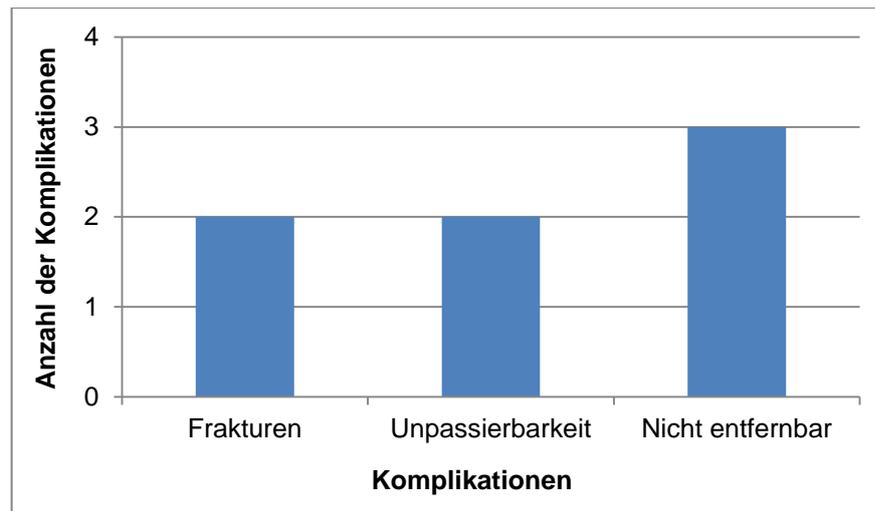


Abbildung 21: Anzahl der Komplikationen bei Reciproc-Anwendung

Bei Anwendung des Reciproc-Systems zur Entfernung der Therafil-Kunststoffträger traten sieben Komplikationen auf (23,3%). In der Mehrzahl der Fälle mit Komplikationen (42,8%) wurde die Arbeitslänge mit Hilfe der Reciproc-Feilen erreicht, jedoch war eine Entfernung des Therafil-Kunststoffträgers nicht möglich. In zwei Fällen (28,6%) war ein Erreichen der Arbeitslänge als Folge der Nicht-Entfernbarkeit des Kunststoffträgers nicht möglich. In zwei weiteren Zähnen (28,6%) frakturierte die verwendete Feile des Reciproc-Systems und der Entfernungsversuch wurde abgebrochen.



Abbildung 22: Zerspanter Kunststoffträger im Wurzelkanallumen (Zahn Nr. 41)

### 3.4 Vergleich beider Entfernungsmethoden

In Abbildung 23 ist der Vergleich der Ergebnisse der Entfernungsversuche unter Einsatz von Reciproc und des FragRemovers dargestellt.

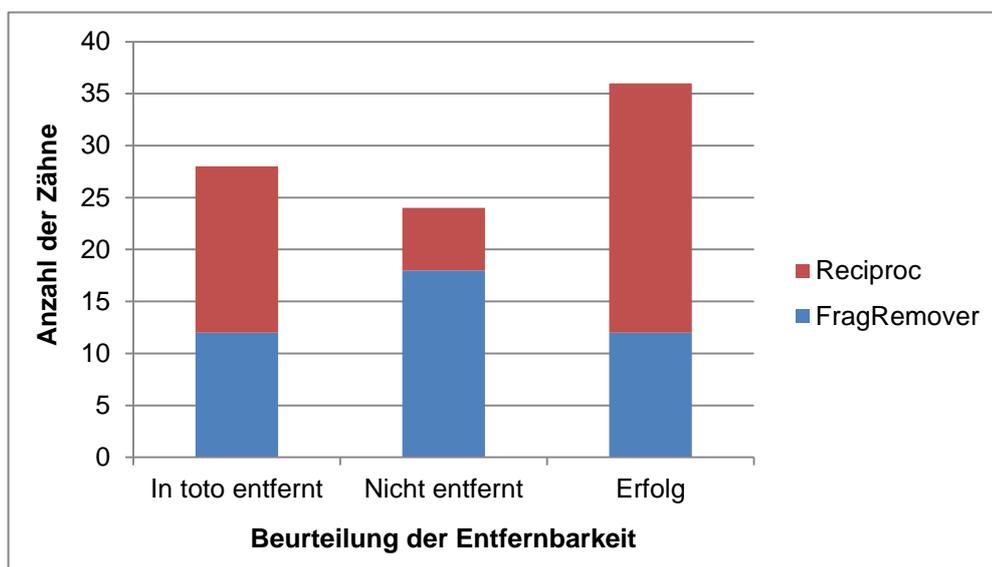


Abbildung 23: Vergleich der Entfernungsversuche mit Reciproc und FragRemover (Erfolg = In toto entfernt + zerspannt entfernt)

Im Vergleich beider Entfernungsmethoden weist das Reciproc-System eine höhere Anzahl (57,1%) vollständig entfernter Kunststoffträger auf als der FragRemover (42,9%). Die Anzahl der nicht entfernten Kunststoffträger ist bei der Arbeit mit dem FragRemover dreimal so hoch wie beim Reciproc-Einsatz.

Die Anwendung von Reciproc zeigt eine signifikant höhere Erfolgsquote in der vollständigen Entfernung des Thermanfil-Kunststoffträgers (66,7%) wie die Entfernung mit dem FragRemover (33,3%) ( $p=0.003$ ).

In Abbildung 24 sind die Komplikationsraten bei Einsatz von Reciproc und FragRemover dargestellt.

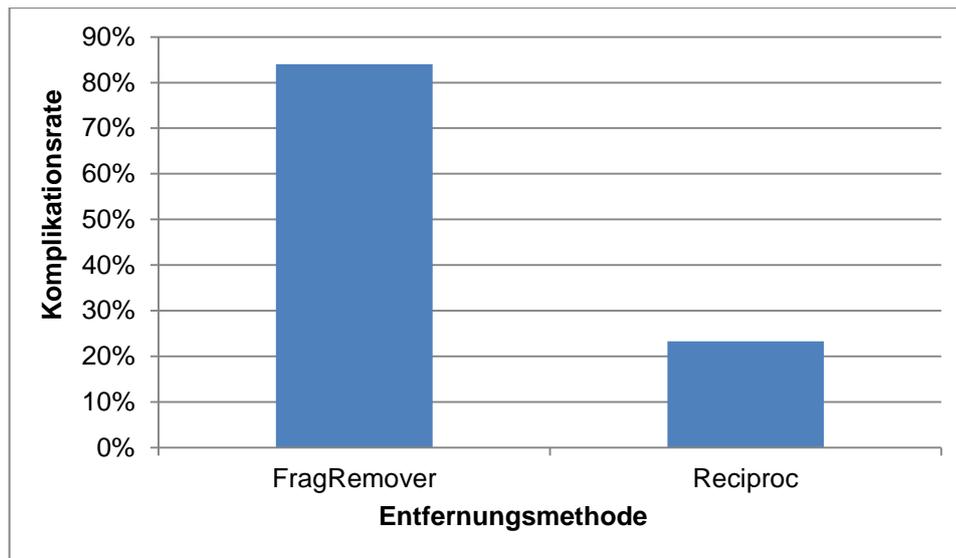


Abbildung 24: Vergleich der Komplikationsraten von Reciproc und FragRemover

Die Durchführung der Entfernungsversuche mit dem Reciproc-System weist eine deutlich niedrigere Komplikationsrate im Vergleich zum FragRemover auf. Nur in 23,3% aller Anwendungen von Reciproc traten Komplikationen auf. Hingegen lag die Komplikationsrate bei Anwendung des FragRemovers bei 84%. Somit kam es bei mehr als vier von fünf Anwendungen des FragRemovers zu Komplikationen, welche einen erfolgreichen Entfernungsversuch behinderten oder nicht zuließen.

## 3.5 Volumenveränderung

### 3.5.1 FragRemover

In Abbildung 25 und 26 sind der durchschnittliche Dentinabtrag und das durchschnittlich entfernte Wurzelfüllmaterial im gesamten Wurzelkanal und im apikalen Wurzelkanalanteil nach Einsatz des FragRemovers in Abhängigkeit vom Krümmungswinkel des Wurzelkanals dargestellt.

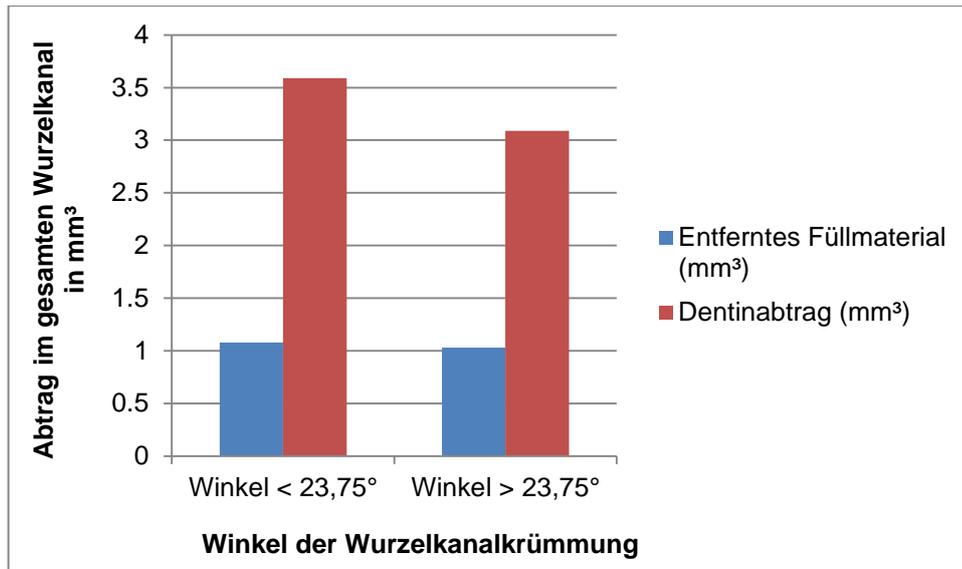


Abbildung 25: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung des FragRemovers in Abhängigkeit vom Winkel der Wurzelkanalkrümmung

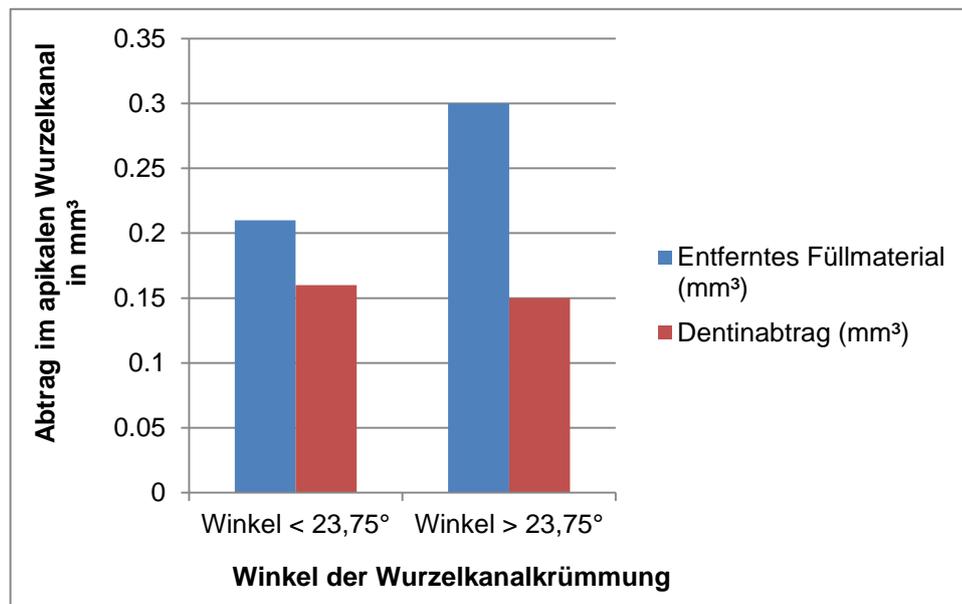


Abbildung 26: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung des FragRemovers in Abhängigkeit vom Winkel der apikalen Wurzelkanalkrümmung

Es besteht kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlich entfernten Wurzelfüllmaterial und dem Krümmungswinkel weder im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,77$ ), noch im apikalen Anteil des Wurzelkanals ( $p=0,62$ ). Ebenfalls besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Dentinabtrag und dem Krümmungswinkel, weder im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,33$ ), noch im apikalen Anteil des Wurzelkanals ( $p=0,93$ ).

In Abbildung 27 und 28 sind der durchschnittliche Dentinabtrag und das durchschnittlich entfernte Wurzelfüllmaterial nach Einsatz des FragRemovers in Abhängigkeit vom Krümmungsradius des Wurzelkanals dargestellt.

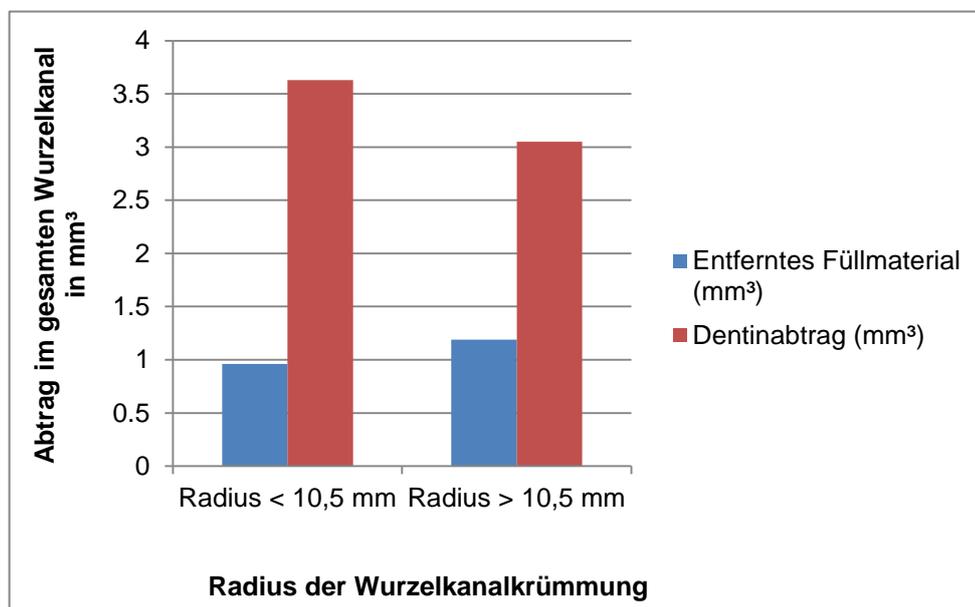


Abbildung 27: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung des FragRemovers in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung

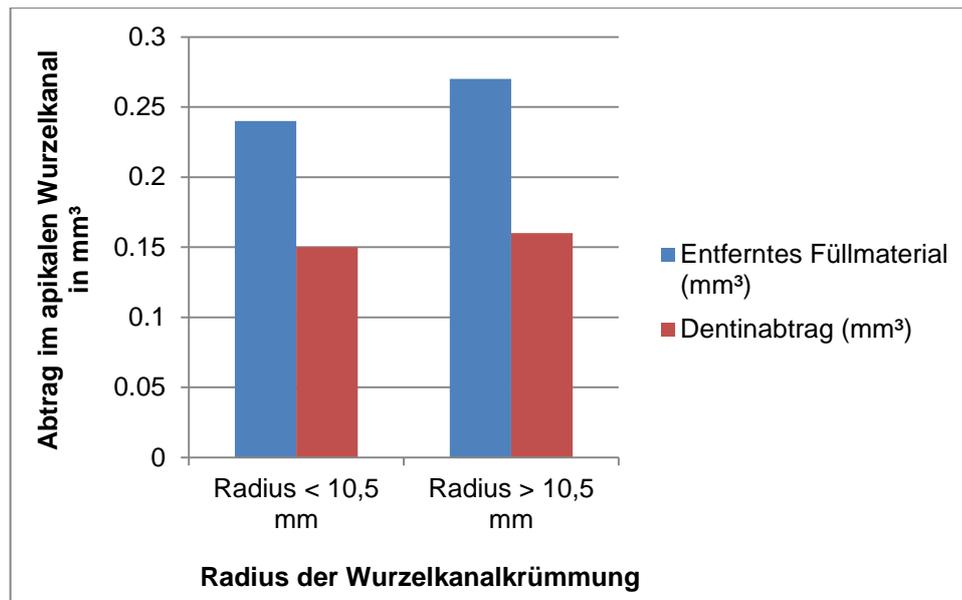


Abbildung 28: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung des FragRemover in Abhängigkeit vom Radius der apikalen Wurzelkanalkrümmung

Es besteht kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlich entfernten Wurzelfüllmaterial und dem Krümmungsradius, weder im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,78$ ), noch im apikalen Anteil des Wurzelkanals ( $p=0,62$ ). Ebenfalls besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Dentinabtrag und dem Krümmungsradius, weder im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,31$ ), noch im apikalen Anteil des Wurzelkanals ( $p=0,77$ ).

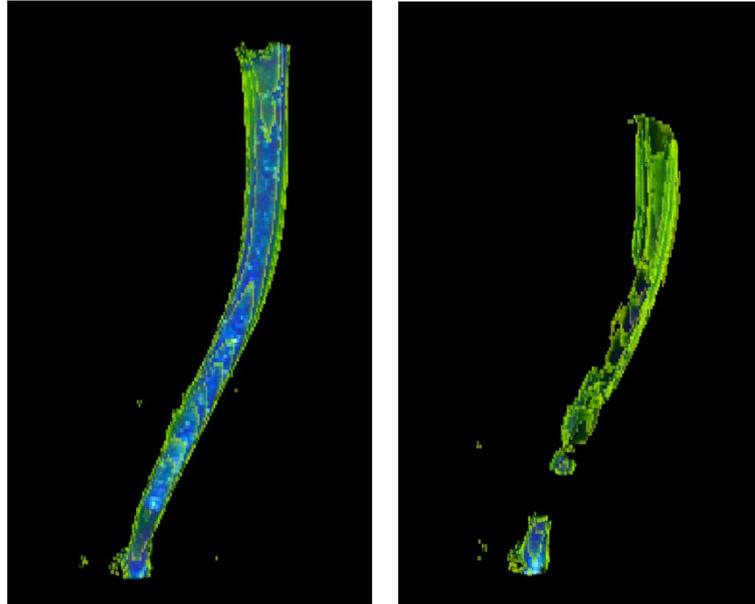


Abbildung 29: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) am Zahn Nr. 146 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT)

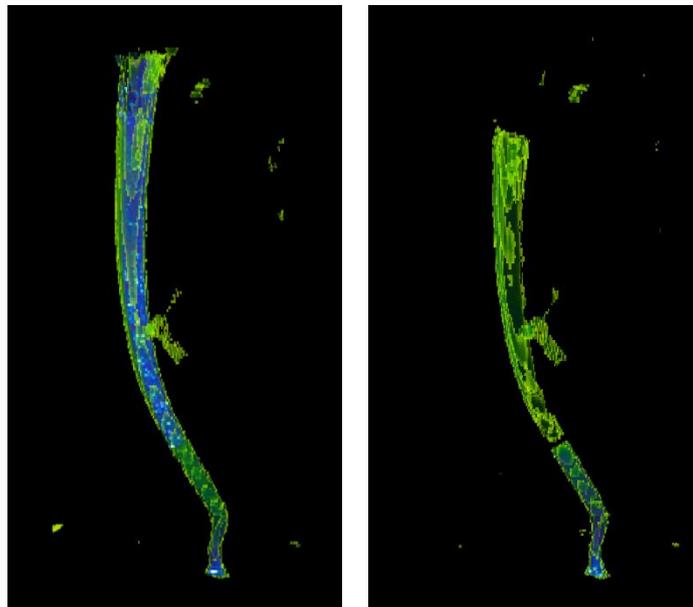


Abbildung 30: Dreidimensionale Darstellung des Thermafil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) am Zahn Nr. 122 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT)

### 3.5.2 Reciproc

In Abbildung 31 und 32 sind der durchschnittliche Dentinabtrag und das durchschnittlich entfernte Wurzelfüllmaterial nach Entfernung der Thermafil-Obturation im gesamten Wurzelkanal und im apikalen Wurzelkanalanteil unter Einsatz von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Krümmungswinkel des Wurzelkanals dargestellt.

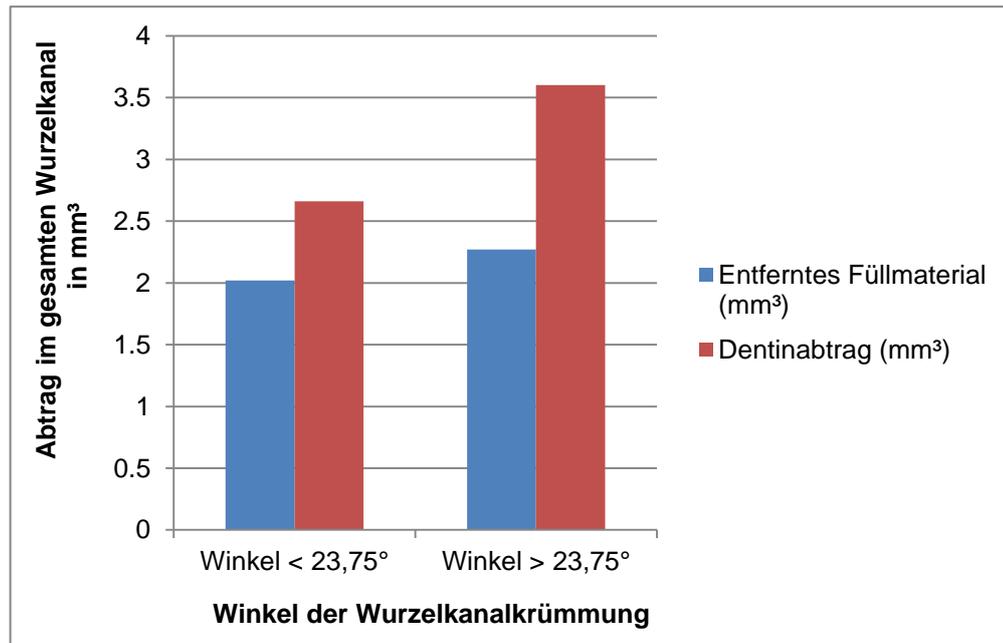


Abbildung 31: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Winkel der Wurzelkanalkrümmung

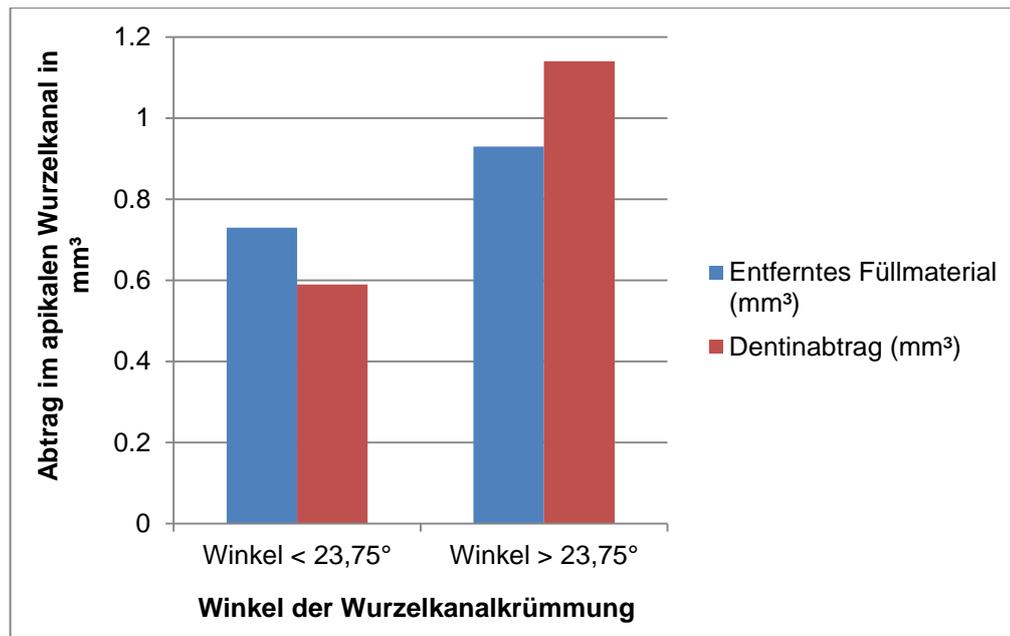


Abbildung 32: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Winkel der apikalen Wurzelkanalkrümmung

Es besteht kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlich entfernten Wurzelfüllmaterial und dem durchschnittlichen Dentinabtrag im Hinblick auf den Krümmungswinkel im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,56$  bzw.  $0,08$ ). Zwischen dem durchschnittlichen Dentinabtrag und dem Krümmungswinkel des apikalen Anteils des Wurzelkanals liegt ein statistisch signifikanter Zusammenhang vor ( $p=0,02$ ). Demnach korreliert ein erhöhter apikaler Winkel der Wurzelkanalkrümmung mit einem erhöhten Dentinabtrag (siehe Abb. 33). Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Krümmungswinkel und dem durchschnittlichen Volumen des entfernten Füllmaterials besteht im apikalen Wurzelkanalanteil nicht ( $p=0,28$ ).

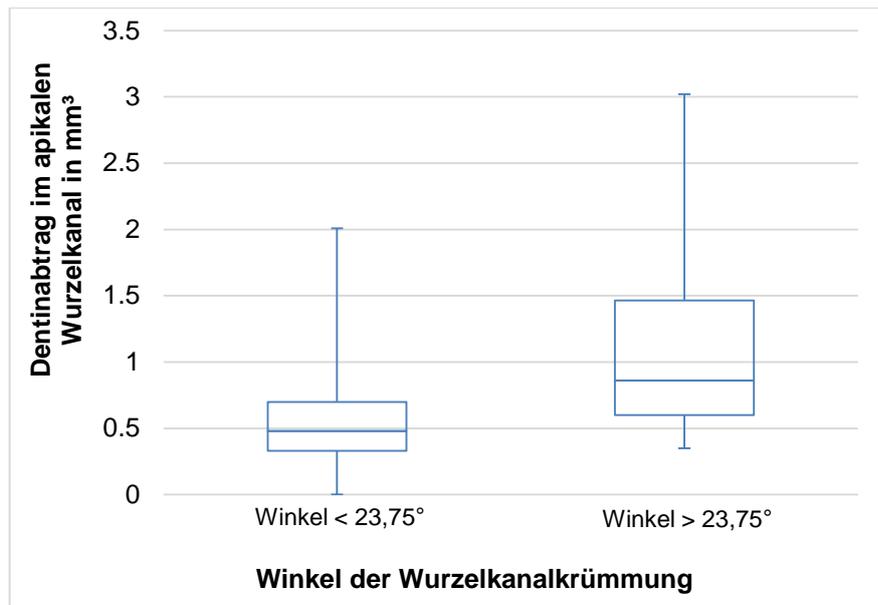


Abbildung 33: Darstellung des Zusammenhangs zwischen erhöhtem Dentinabtrag und erhöhtem Krümmungswinkel des Wurzelkanals nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten im apikalen Wurzelkanalanteil.

In Abbildung 34 und 35 sind der durchschnittliche Dentinabtrag und das durchschnittlich entfernte Wurzelfüllmaterial im gesamten Wurzelkanal und apikalen Wurzelkanalanteil nach Einsatz von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Krümmungsradius des Wurzelkanals dargestellt.

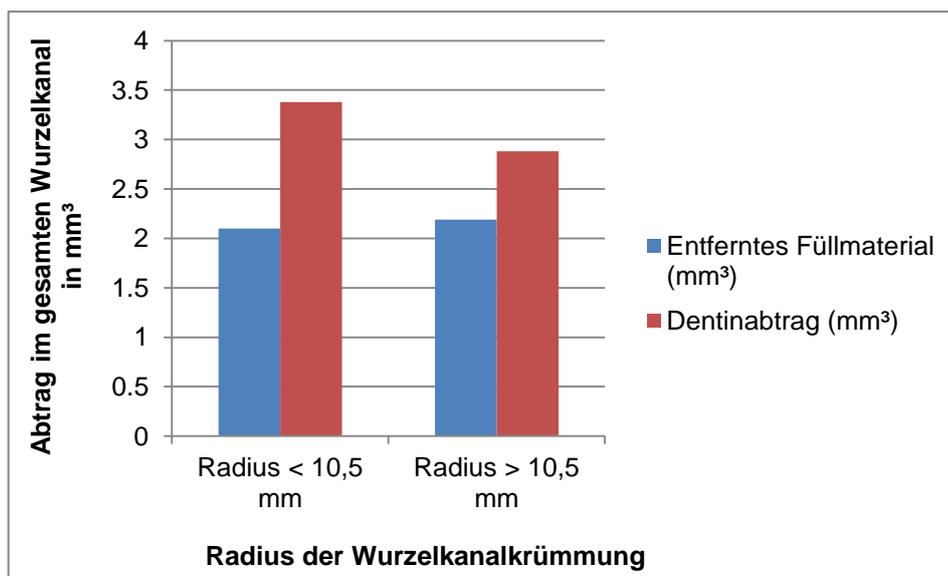


Abbildung 34: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Radius der Wurzelkanalkrümmung

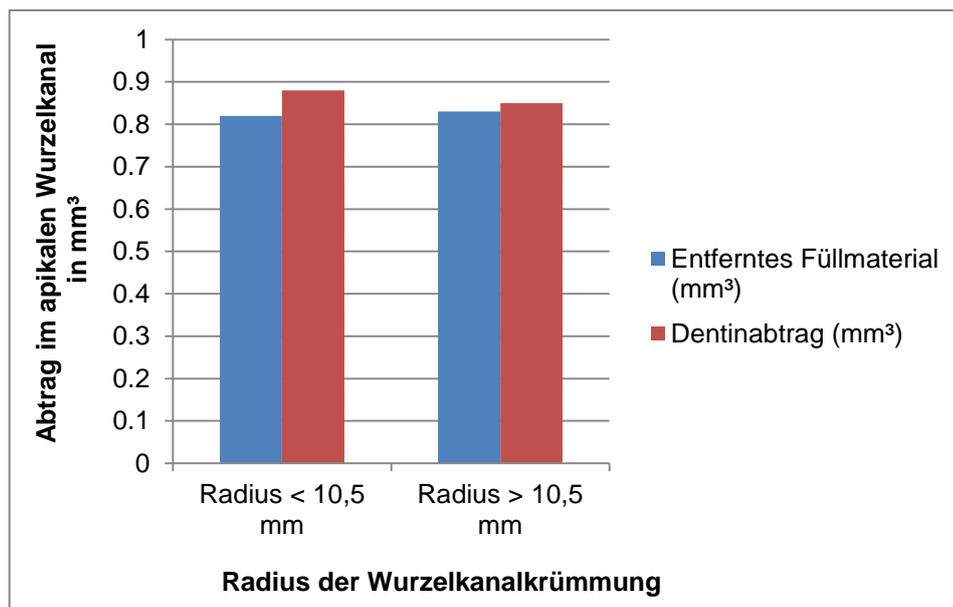


Abbildung 35: Durchschnittlicher Dentinabtrag und durchschnittlich entferntes Wurzelfüllmaterial nach Verwendung von Reciproc-Instrumenten in Abhängigkeit vom Radius der apikalen Wurzelkanalkrümmung.

Es besteht kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlich entfernten Wurzelfüllmaterial im Hinblick auf den Krümmungsradius, weder im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,62$ ), noch im apikalen Anteil des Wurzelkanals ( $p=0,93$ ). Des Weiteren besteht kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Dentinabtrag und dem Krümmungsradius, weder im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,56$ ), noch im apikalen Anteil des Wurzelkanals ( $p=0,38$ ).

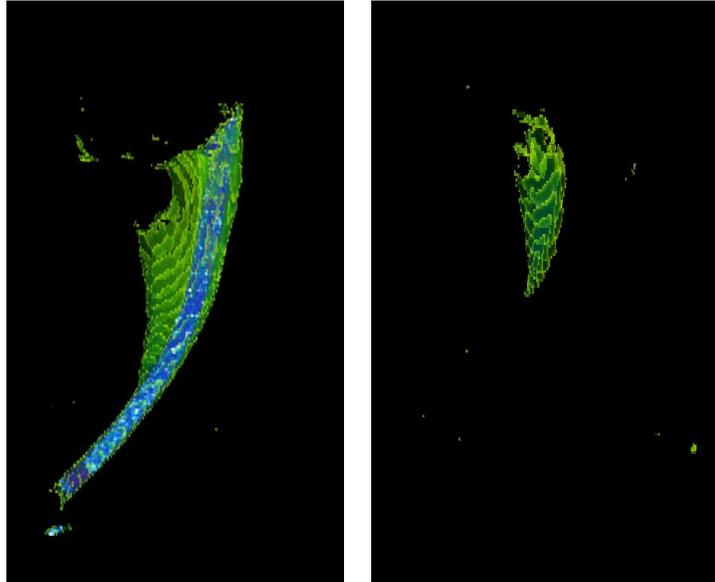


Abbildung 36: Dreidimensionale Darstellung des Thermanfil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) am Zahn Nr. 6 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT)

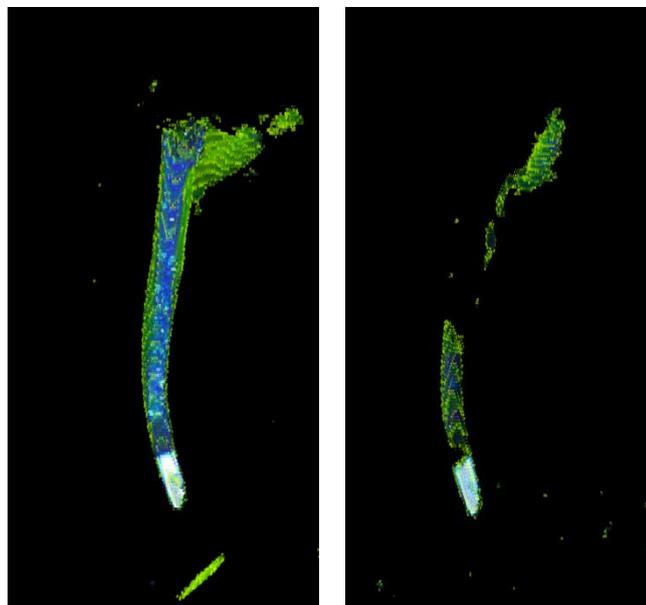


Abbildung 37: Dreidimensionale Darstellung des Thermanfil-Kunststoffträgers (blau) und der ummantelnden Guttapercha (grün) bzw. eine programmbedingte Überlagerung beider Strukturen (weiß) am Zahn Nr. 103 vor (links) und nach dem Entfernungsversuch (rechts) (CTAn-Software v.1.12, Bruker-microCT)

## 3.6 Vergleich der Volumenveränderungen

### 3.6.1 Vergleich der Volumenveränderungen im apikalen Wurzelkanalanteil

Der Vergleich der Ergebnisse für die beiden Entfernungstechniken zeigt signifikante volumetrische Unterschiede in den apikalen 5 mm des Wurzelkanals.

#### 3.6.1.1 Auswertung aller Versuche

Der Vergleich aller sowohl erfolgreichen als auch nicht erfolgreichen Versuche der beiden Entfernungstechniken zeigt für die Anwendung der Reciproc-Instrumente einen signifikant höheren Dentinabtrag im apikalen Wurzelkanal ( $p < 0,01$ ) (siehe Abb. 38). Des Weiteren konnte mit Reciproc-Instrumenten signifikant mehr Füllmaterial entfernt werden ( $p < 0,01$ ) (siehe Abb. 39). Der prozentuale Anteil des durchschnittlich verbliebenen Füllmaterials ist bei Anwendung des FragRemovers signifikant höher als bei Anwendung der Reciproc-Instrumente ( $p < 0,01$ ) (siehe Abb. 40).

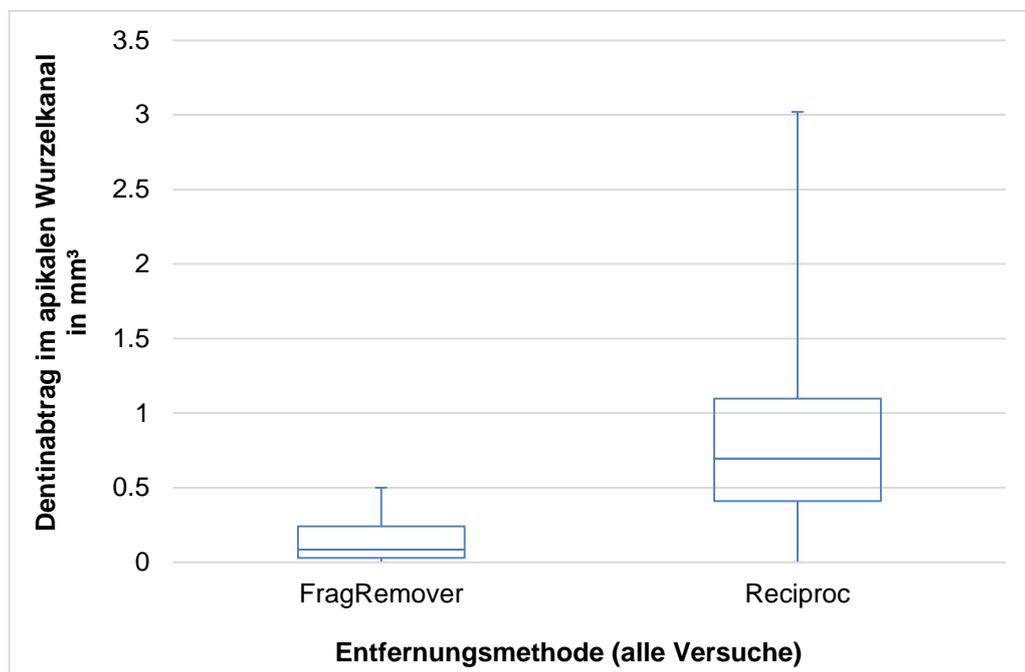


Abbildung 38: Vergleich des Dentinabtrags im apikalen Wurzelkanalanteil (alle Versuche)

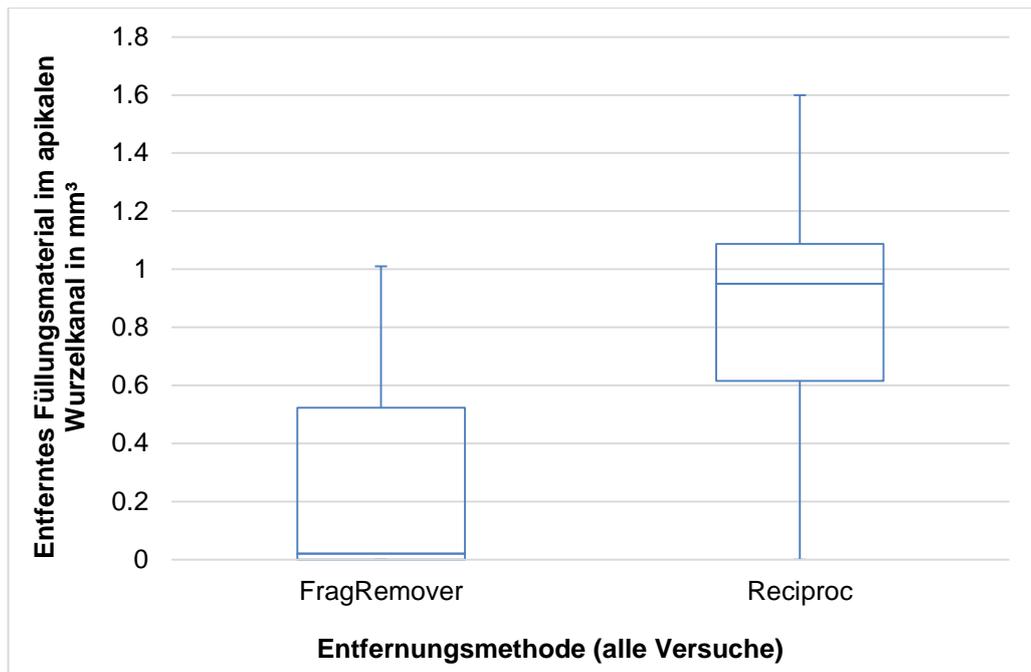


Abbildung 39: Entferntes Wurzelfüllmaterial im apikalen Wurzelkanalanteil (alle Versuche)

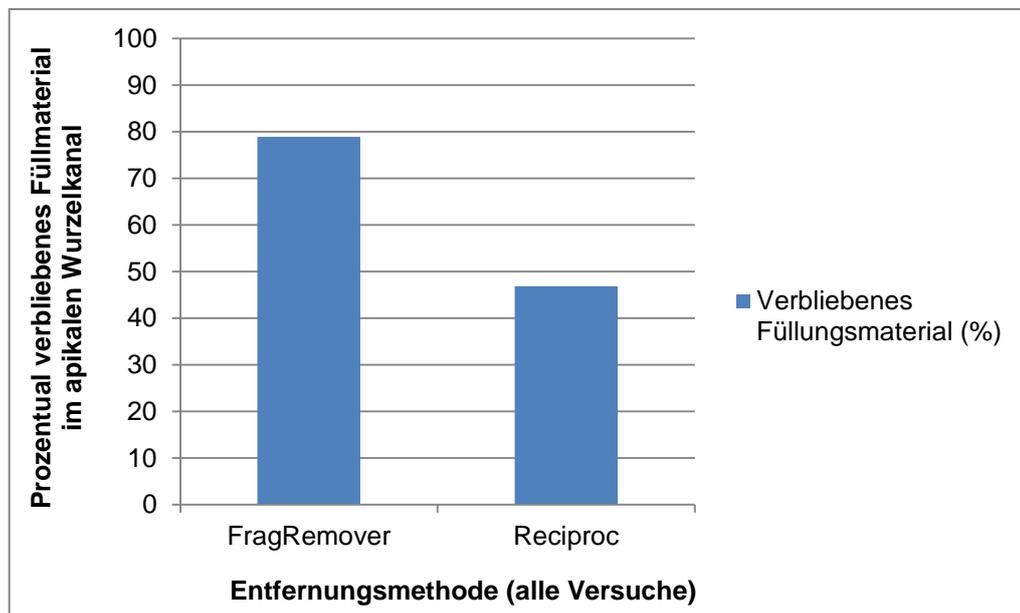


Abbildung 40: Prozentual verbliebenes Füllmaterial im apikalen Wurzelkanalanteil (alle Versuche)

### 3.6.1.2 Auswertung der erfolgreichen Versuche

Der Vergleich aller erfolgreichen Versuche der beiden Entfernungstechniken zeigt für die Anwendung der Reciproc-Instrumente einen signifikant höheren Dentinabtrag im apikalen Wurzelkanalanteil ( $p < 0,01$ ) (siehe Abb. 41). Des Weiteren kann durch die Reciproc-Instrumente signifikant mehr Füllmaterial entfernt werden ( $p < 0,01$ ) (siehe Abb. 42). Der prozentuale Anteil des durchschnittlich verbliebenen Füllmaterials ist nach Anwendung des FragRemovers signifikant höher als nach Anwendung der Reciproc-Instrumente ( $p < 0,01$ ) (siehe Abb. 43).

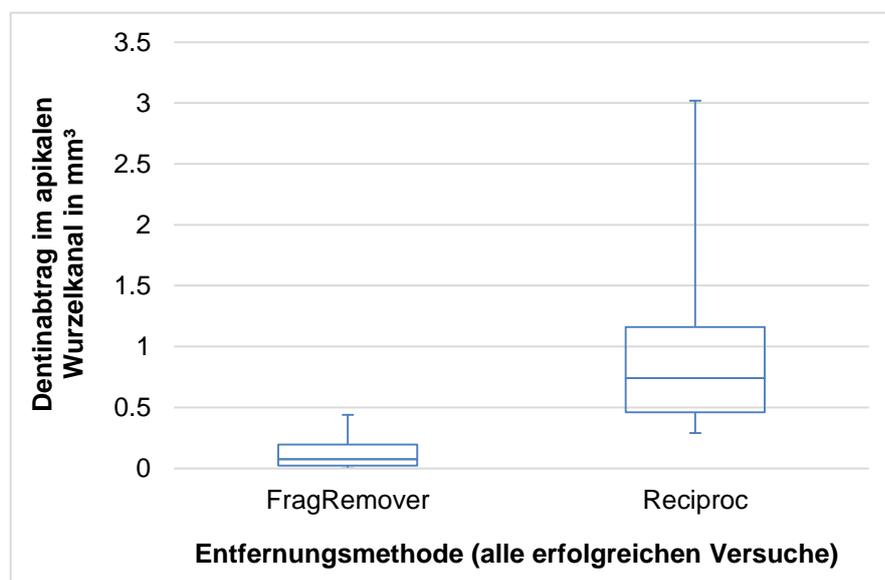


Abbildung 41: Vergleich des Dentinabtrags im apikalen Wurzelkanalanteil (alle erfolgreichen Versuche)

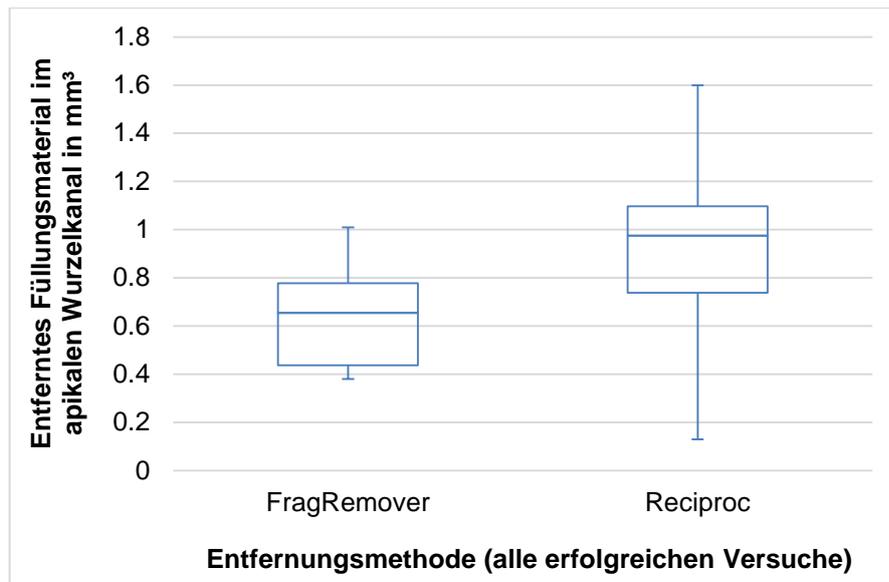


Abbildung 42: Vergleich des entfernten Wurzelfüllmaterials im apikalen Wurzelkanalanteil (alle erfolgreichen Versuche)

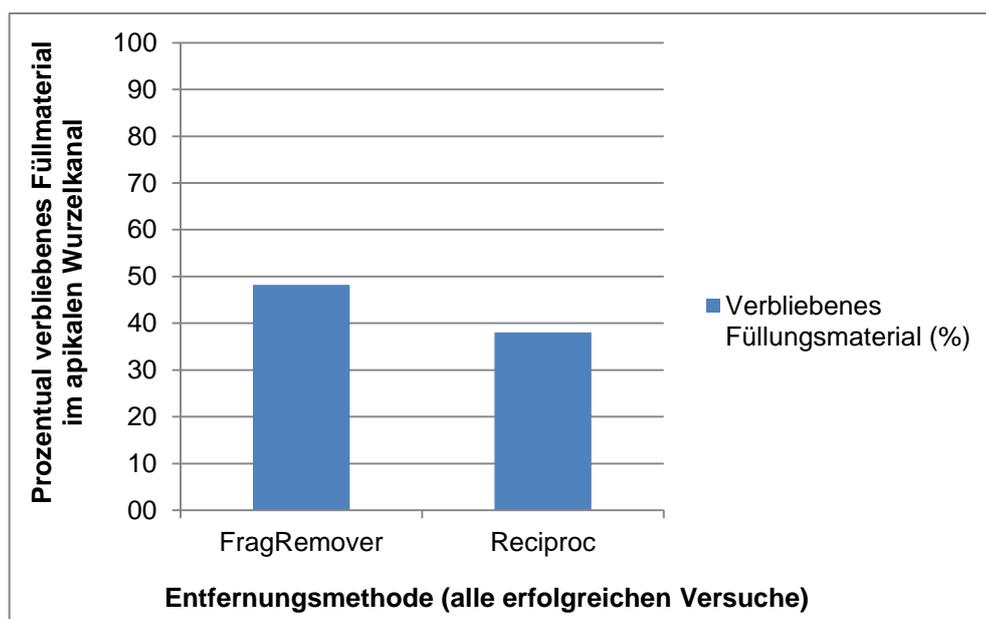


Abbildung 43: Prozentualer Anteil des verbliebenen Füllmaterials im apikalen Wurzelkanalanteil (alle erfolgreichen Versuche)

### 3.6.2 Vergleich der Volumenveränderungen im gesamten Wurzelkanal

#### 3.6.2.1 Auswertung aller Versuche

Der Vergleich aller erfolgreichen als auch nicht erfolgreichen Versuche zeigt keinen signifikanten Unterschied im Dentinabtrag im gesamten Wurzelkanal

( $p=0,38$ ) (siehe Abb. 44). Durch die Reciproc-Instrumente wurde signifikant mehr Füllmaterial entfernt, als mit Hilfe des FragRemovers ( $p<0,01$ ) (siehe Abb. 45). Der prozentuale Anteil des durchschnittlich verbliebenen Füllmaterials ist bei Anwendung des FragRemovers signifikant höher als bei Anwendung der Reciproc-Instrumente ( $p<0,01$ ) (siehe Abb. 46).

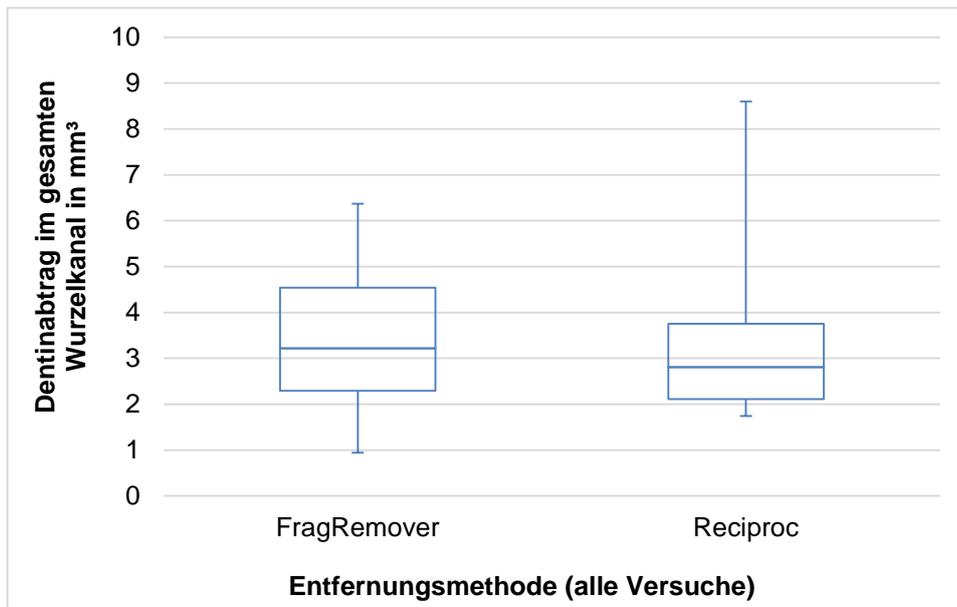


Abbildung 44: Vergleich des Dentinabtrags im gesamten Wurzelkanal (alle Versuche)

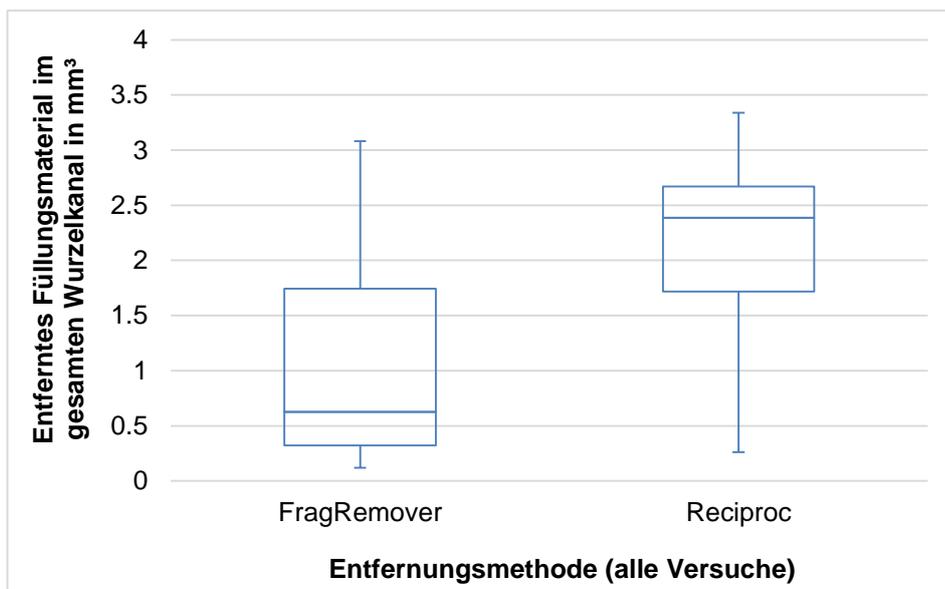


Abbildung 45: Vergleich des entfernten Wurzelfüllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle Versuche)

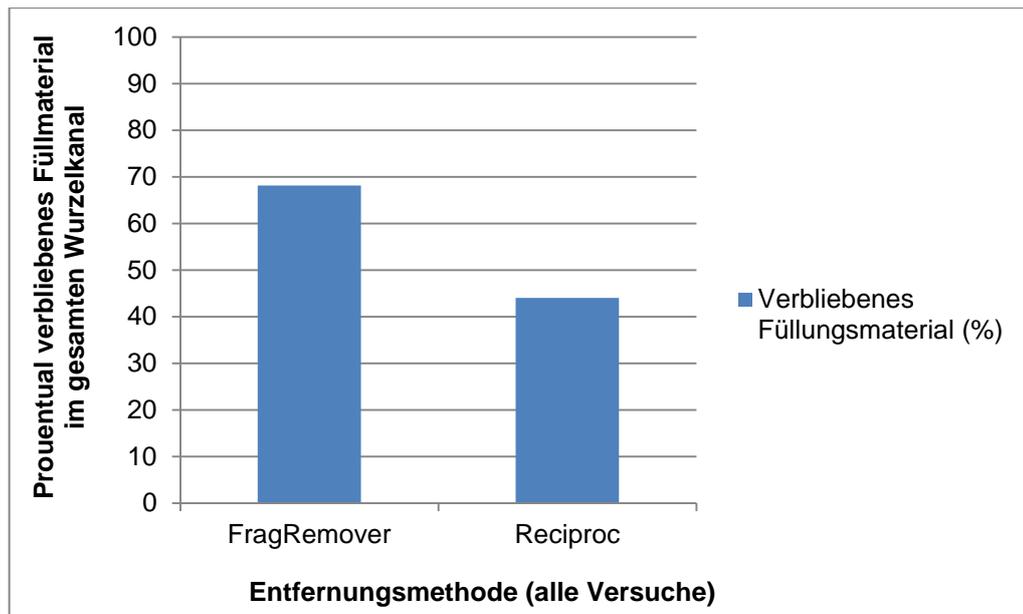


Abbildung 46: Vergleich des prozentualen Anteils des verbliebenen Füllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle Versuche)

### 3.6.2.2 Auswertung der erfolgreichen Versuche

Der Vergleich der erfolgreichen Versuche zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen im Dentinabtrag im gesamten Wurzelkanal ( $p=0,60$ ) (siehe Abb. 47). Des Weiteren liegt kein signifikanter Unterschied in der Menge des entfernten Wurzelfüllmaterials vor ( $p=0,09$ ) (siehe Abb. 48). Der prozentuale Anteil des durchschnittlich verbliebenen Füllmaterials ist bei Anwendung des FragRemovers und der Reciproc-Instrumente ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich ( $p=0,47$ ) (siehe Abb. 49).

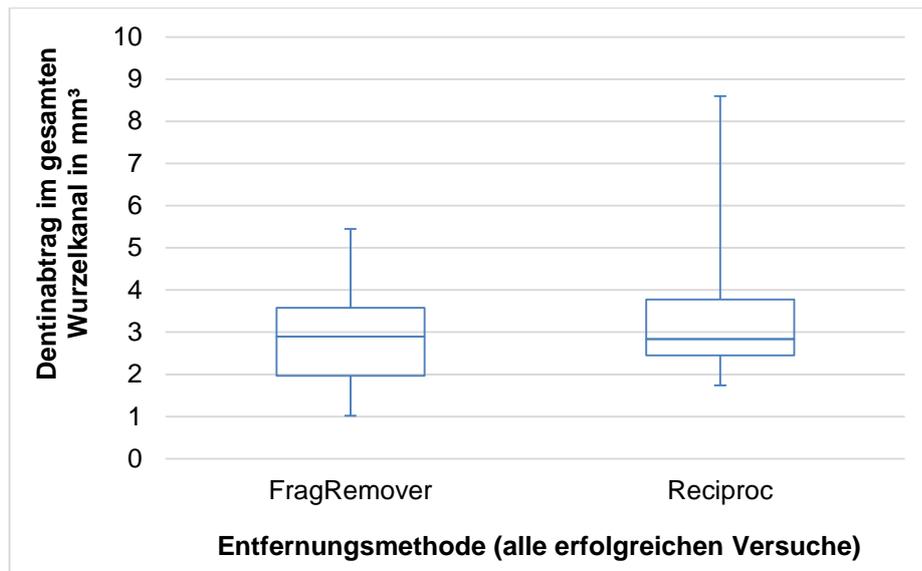


Abbildung 47: Vergleich des Dentinabtrags im gesamten Wurzelkanal (alle erfolgreichen Versuche)

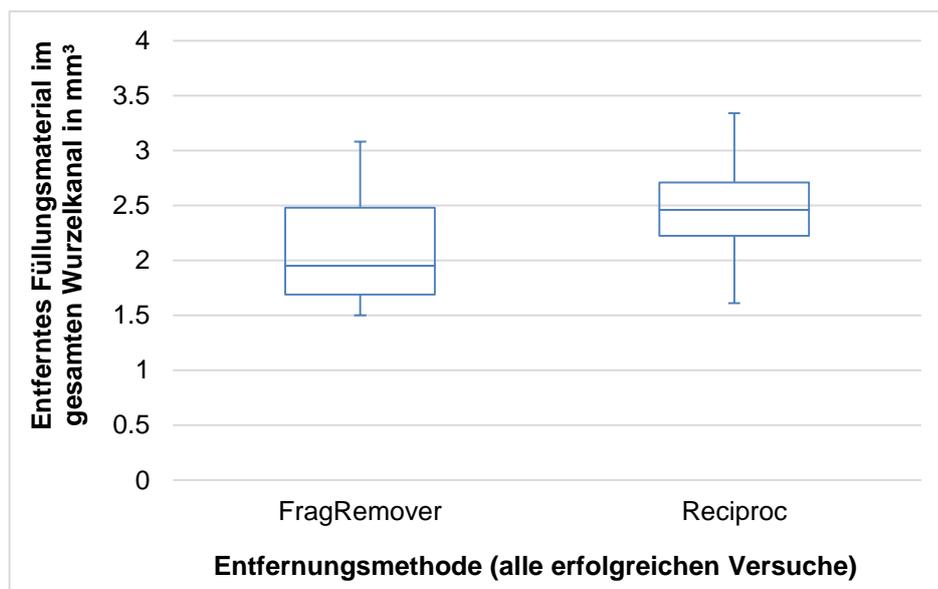


Abbildung 48: Vergleich des entfernten Wurzelfüllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle erfolgreichen Versuche)

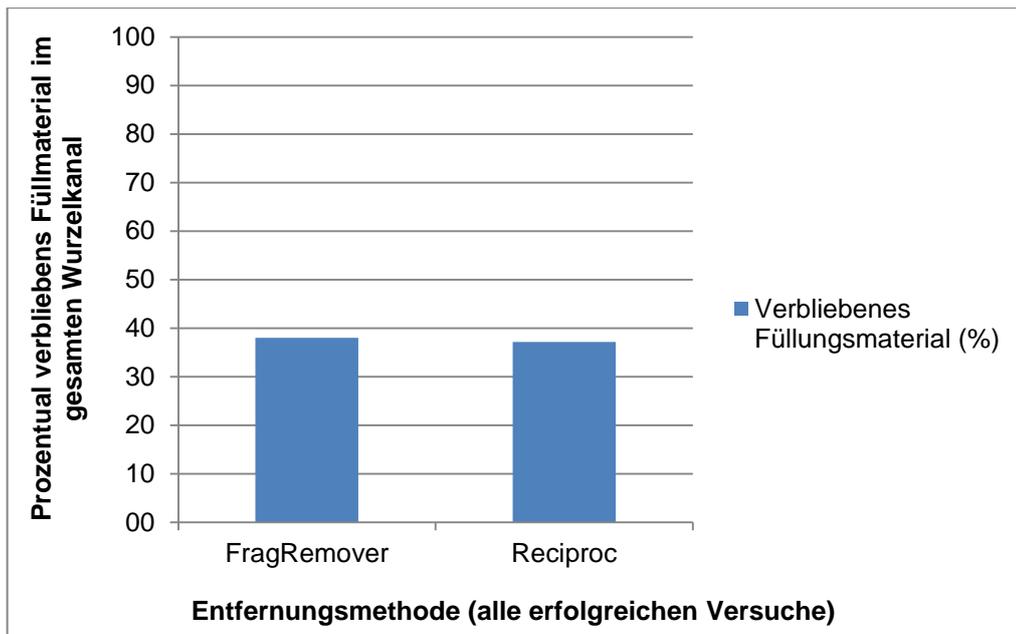


Abbildung 49: Vergleich des prozentual verbliebenen Füllmaterials im gesamten Wurzelkanal (alle erfolgreichen Versuche)

### 3.6.3 Zusammenfassung der volumetrischen Analyse

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Volumenanalyse für beide Entfernungsmethoden im apikalen Anteil des Wurzelkanals dargestellt.

Der Dentinabtrag nach Anwendung des FragRemovers (0,12-0,15 mm<sup>3</sup>) ist im Mittel um mehr als das Siebenfache geringer als die Reciproc-Instrumentierung (0,87-0,95 mm<sup>3</sup>), unabhängig vom Erfolg des Entfernungsversuches ( $p < 0,01$ ). Damit ist die Anwendung des FragRemovers deutlich minimal-invasiver als die Anwendung von Reciproc. Dennoch ist bezüglich der Entfernung des Wurzelfüllmaterials die Instrumentierung mit Reciproc-Feilen (0,83-0,93 mm<sup>3</sup>) dem Entfernungsversuch mit dem FragRemover (0,26-0,63 mm<sup>3</sup>) signifikant überlegen ( $p < 0,01$ ). Der prozentuale Anteil verbliebenen Füllmaterials bestätigt dieses Ergebnis ( $p < 0,01$ ). Dies belegt eine wesentlich höhere Entfernungseffizienz des Reciproc-Systems im apikalen Wurzelkanalanteil.

Tabelle 4: Übersicht der volumetrischen Mittelwerte im apikalen Anteil des Wurzelkanals

	Erfolgreiche Entfernungsversuche			Alle Entfernungsversuche		
	Frag-Remover	Reciproc	p-Wert	Frag-Remover	Reciproc	p-Wert
Dentinabtrag (mm <sup>3</sup> )	0,12 ± 0,13	0,95 ± 0,7	<b>&lt;0,01</b>	0,15 ± 0,16	0,87 ± 0,68	<b>&lt;0,01</b>
Entferntes Füllmaterial (mm <sup>3</sup> )	0,63 ± 0,2	0,93 ± 0,35	<b>&lt;0,01</b>	0,26 ± 0,33	0,83 ± 0,42	<b>&lt;0,01</b>
Prozentual verbliebenes Füllmaterial (%)	48,2 ± 9,8	38,0 ± 19,2	<b>&lt;0,01</b>	78,9 ± 26,2	46,8 ± 25,8	<b>&lt;0,01</b>

Angabe der Mittelwerte ± Standardabweichung, Signifikanzen sind fett gedruckt

Die Tabelle 5 stellt die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Volumenanalyse für beide Entfernungsmethoden dar, jedoch gemessen im gesamten Wurzelkanal. Hierbei sind weniger signifikante Unterschiede zwischen beiden Techniken zur Entfernung des Thermafil-Obturators zu erkennen.

Der mittlere Dentinabtrag, unabhängig vom Erfolg des Entfernungsversuches, unterscheidet sich nicht signifikant zwischen der Reciproc-Instrumentierung (3,13-3,26 mm<sup>3</sup>) und der Verwendung des FragRemovers (2,92-3,34 mm<sup>3</sup>) (p=0,60 bzw. p=0,38). Daher ist von einer gleichen Invasivität beider Methoden auszugehen. Bei erfolgreichen Entfernungsversuchen besteht kein signifikanter Unterschied für beide Entfernungsmethoden hinsichtlich des entfernten Füllmaterials (p=0,09) und des prozentualen Anteils an verbliebenem Füllmaterial (p=0,47). Somit ist auf eine annähernd gleiche Effektivität beim erfolgreichen Entfernen von Thermafil-Obturatoren zu schließen. Jedoch ist im Vergleich aller erfolgreichen und nicht erfolgreichen Entfernungsversuche das mittlere Volumen des entfernten Wurzelfüllmaterials bei Reciproc-Anwendung (2,14 mm<sup>3</sup>) fast doppelt so hoch wie bei Anwendung des FragRemovers (1,08 mm<sup>3</sup>) (p<0,01). Der prozentuale Anteil des verbliebenen Füllmaterials ist bei Anwendung des FragRemovers um ein Drittel höher als bei Reciproc-Anwendung (p<0,01).

Tabelle 5: Übersicht der volumetrischen Mittelwerte im gesamten Wurzelkanal

	Erfolgreiche Entfernungsversuche			Alle Entfernungsversuche		
	Frag-Remover	Reciproc	p-Wert	Frag-Remover	Reciproc	p-Wert
Dentinabtrag (mm <sup>3</sup> )	2,92 ± 1,36	3,26 ± 1,46	0,60	3,34 ± 1,46	3,13 ± 1,39	0,38
Entferntes Füllmaterial (mm <sup>3</sup> )	2,11 ± 0,54	2,42 ± 0,42	0,09	1,08 ± 0,93	2,14 ± 0,72	<b>&lt;0,01</b>
Prozentual verbliebenes Füllmaterial (%)	38,0 ± 9,3	37,1 ± 10,8	0,47	68,1 ± 26,1	44,0 ± 18,2	<b>&lt;0,01</b>

Angabe der Mittelwerte ± Standardabweichung, Signifikanzen sind fett gedruckt

Anhand der Ergebnisse der Studie lassen sich die eingangs genannten Nullhypothesen wie folgt widerlegen:

FragRemover und Reciproc weisen keine gleichen Ergebnisse im Entfernen des Thermafil-Kunststoffträgers auf.

FragRemover und Reciproc entfernen nicht gleich große Anteile der Wurzelkanalfüllung bzw. hinterlassen nicht gleich große Reste an Füllmaterial im Wurzelkanal.

FragRemover und Reciproc entfernen während der Entfernung der Obturatoren unterschiedliche Mengen an Dentin.

Beide Techniken weisen eine unterschiedliche Häufung an Zwischenfällen auf.

## **4 Diskussion**

### **4.1 Diskussion der Methode**

Das Ziel dieser Studie war der Vergleich von zwei Methoden zur Entfernung von Thermafil-Obturatoren aus gekrümmten Wurzelkanälen. Dabei wurden die Schlingen-Technik mit Hilfe des FragRemovers und die Instrumentierung mit Nickel-Titan-Feilen mit reziprokem Bewegungsmuster (Reciproc) verglichen. Die Effektivität einer Entfernungsmethode wurde an der Menge des entfernten Wurzelfüllmaterials und dem daraus resultierenden im Wurzelkanal verbleibenden Wurzelfüllmaterial bemessen. Um eine Aussage zur Invasivität einer Entfernungsmethode zu treffen, wurde der Abtrag von Zahnhartsubstanz im Wurzelkanal volumetrisch gemessen.

Die Messung des verbliebenen Volumens an Wurzelkanalfüllmaterial und des Dentinabtrags wurde mit Hilfe dreidimensionaler Micro-CT-Aufnahmen durchgeführt.

#### **4.1.1 Gruppeneinteilung**

Die Mehrheit der bisher vorliegenden Studien zur Untersuchung der Effektivität und Effizienz von Thermafil-Entfernungsmethoden wurde an geraden Wurzelkanälen durchgeführt (Imura et al. 1993; Wilcox und Juhlin 1994; Bertrand et al. 1997; Frajlich et al. 1998; Pirani et al. 2009; Nevares et al. 2015). Gerade Wurzelkanäle sind besser zu standardisieren, da die Unterteilung nach Krümmungswinkel und -radius nicht notwendig ist. Thermoplastische Füllungsmaterialien wie das Thermafil-System eignen sich jedoch auch für die Obturation gekrümmter Wurzelkanäle und werden in der klinischen Endodontologie dafür eingesetzt. Der erhöhte technische Anspruch an den Zahnarzt bei der Revisionsbehandlung an gekrümmten Wurzelkanälen zeigt sich auch in der Häufung intraoperativer Zwischenfälle wie z. B. Instrumentenfrakturen oder Perforationen. Die Steigerung des Krümmungswinkels des Wurzelkanals erschwert die Entfernung von Stiftsystemen (vergleichbar mit der Entfernung von frakturierten Instrumenten) (Cujé et al. 2009). Daher besteht die Notwendigkeit, Ex-vivo-Studien zur Entfernung von Thermafil-Obturationen an geraden sowie an gekrümmten Wurzelkanälen durchzuführen. Aufgrund der anatomisch erschwerten Bedingungen weist die Literatur nur wenige Revisionsuntersuchungen an

Thermafil-obturierten, gekrümmten Wurzelkanälen auf (Royzenblat und Goodell 2007; Beasley et al. 2013; Gogulnath et al. 2015; Rödiger et al. 2018a).

Durch künstlich hergestellte Wurzelkanäle in Plastikblöcken ließe sich die genaueste Standardisierung der Wurzelkanalanatomie erzielen. Diese simulierten Kanäle entsprechen in ihren Eigenschaften jedoch nicht denen des menschlichen Zahnes (Hayakawa et al. 2010). Ein verändertes Adhäsions- und Abrasionsverhalten ist aufgrund der Strukturunterschiede von Zahnhartsubstanz und dem Plastik-Werkstoff anzunehmen. Die Härte der verwendeten Kunststoffe und des Dentins menschlicher Zähne sind ebenfalls nicht vergleichbar (Nassri et al. 2008). Die Reproduktion der individuellen anatomischen Gegebenheiten des Wurzelkanalsystems, z. B. Isthmen und Seitenkanäle, ist in Kunststoff-Zähnen nicht möglich.

Die Studie wurde als Ex-vivo-Versuch mit 60 extrahierten menschlichen Unterkiefermolaren durchgeführt. Die Standardisierung der Zähne ist im Gegensatz zu künstlichen Wurzelkanalsystemen erschwert, jedoch ist eine höhere klinische Relevanz gegeben. Um eine Vergleichbarkeit der Gruppen zu gewährleisten und weitestgehend einheitliche Versuchsbedingungen zu schaffen, wurde die Zahnauswahl nach definierten Ein- und Ausschlusskriterien durchgeführt und *Matched-Pairs* gebildet. Vorher festgelegte, exakt reproduzierbare Arbeitsschritte für Trepanation, Instrumentierung, Präparation, Obturation und Entfernung der Wurzelfüllmaterialien wurden eingehalten und durch denselben Untersucher getätigt. Die Länge des gefüllten Wurzelkanalanteils wurde ebenfalls standardisiert und röntgenologisch überprüft. Die verwendeten Zähne wurden in zwei Versuchsgruppen zu je 30 Zähnen aufgeteilt. Die *Matched-Pair*-Zuordnung diente dazu, jeweils zwei Wurzelkanäle ohne signifikante Unterschiede in den vorhandenen Parametern einer der beiden Versuchsgruppen zuzuordnen. Eine ebenfalls festgelegte Maximalabweichung sicherte diese Vergleichbarkeit der Gruppen. Somit war ein direkter Vergleich der Entfernungsmethoden an nach klinischen Maßstäben nahezu identischen Wurzelkanälen möglich.

#### **4.1.2 Techniken zur Entfernung der Thermanfil-Obturatoren**

Primäres Ziel einer Revisionsbehandlung sollte eine möglichst vollständige Entfernung des Wurzelfüllmaterials sein, um sodann eine effektive Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanalsystems zu ermöglichen. Dadurch werden die Chance einer vollständigen Heilung des periapikalen Gewebes und die Überlebenschance des Zahnes nach erfolgter Revisionsbehandlung verbessert (Stabholz und Friedman 1988).

Die Reinigung eines Wurzelkanalsystems erfolgt durch Einsatz von Spüllösungen, die die Instrumentierung durch antibakterielle und gewebeauflösende Wirkung unterstützen. Durch Anwendung von Spüllösungen nach bestimmten Protokollen ist es möglich, die durch den Einsatz von endodontischen Instrumenten an den Kanalwänden entstandene Schmierschicht aus organischen und anorganischen Bestandteilen zu entfernen. Dies ist wiederum nötig, um eine ausreichende Desinfektion der Dentintubuli und eine adäquate Haftung des Wurzelfüllmaterials zu gewährleisten (Violich und Chandler 2010). Die Anwendung von Zitronensäure und Natriumhypochlorit fördert ebenfalls die Auflösung bestimmter Wurzelfüllmaterialien, wie zum Beispiel *Sealer* (Keles und Koöseoglu 2009).

In der vorliegenden Studie wurde ein standardisiertes Präparations- und Spülprotokoll vor der Obturation mit der Thermafil-Technik angewendet. Damit sollte eine optimierte Passung der Wurzelkanalfüllung garantiert werden. Während der Entfernung der Thermafil-Obturatoren wurden keine Spüllösungen oder Lösungsmittel eingesetzt, um zusätzliche Einflussfaktoren auszuschalten, welche möglicherweise das Entfernenverhalten begünstigen konnten. Vor der Untersuchung des Zahnes mit bildgebenden Verfahren folgte eine Spülung mit destilliertem Wasser, um lose Rückstände im Wurzelkanallumen zu entfernen. Das destillierte Wasser hat keine chemischen Auswirkungen auf das Dentin oder das verbliebene Wurzelfüllmaterial. Jedoch würde in einer klinisch durchgeführten Entfernung von Wurzelfüllmaterial mit chemischen Substanzen gearbeitet werden.

Zur Entfernung musste zuerst eine Freilegung des koronalen Teils des Thermafil-Kunststoffträgers erfolgen. Der hierdurch verursachte Dentinabtrag bewirkt eine strukturelle Schwächung der Zahnwurzel sowie eine erhöhte Inzidenz von Mikrorissen, ausgehend vom Wurzelkanallumen (Ossareh et al. 2018). Dadurch ist von einer erhöhten Gefahr einer Wurzelfraktur auszugehen. Die Wahl der Größe der zur Freilegung verwendeten Ultraschallfeile, die optische Vergrößerungsmöglichkeit durch ein Mikroskop (Hou 2018) und die Erfahrung des Zahnarztes spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Obturationsentfernung.

Während der Freilegung der Thermafil-Kunststoffträger mit Hilfe von Ultraschallansätzen kann es zur Beschädigung und Schwächung der Kunststoffträgerköpfe kommen, die in Folge beim Entfernenversuch mit der Schlinge schneller abreißen können.

Ein Vergleich des Zeitaufwandes beider Entfernungsmethoden war aufgrund einer nicht eindeutig zeitlich definierbaren Anwendung des FragRemovers nicht

möglich. Eine Standardisierung des Zeitaufwands war aufgrund der nicht vergleichbaren Anwendung beider Systeme ausgeschlossen. Jedoch war, unter Einbeziehung der Vorbereitung beider Entfernungstechniken, eine deutliche Tendenz hinsichtlich eines verringerten Zeiteinsatzes bei der Reciproc-Verwendung zu erkennen. Die Platzierung der FragRemover-Schleife über dem Thermanfil-Kunststoffträger und das erneute Einlegen eines Drahtes für einen zweiten Entfernungsversuch erwiesen sich als sehr zeitaufwendig. Die einfachere Handhabung des Reciproc-Systems trug ebenfalls zu einer Zeitersparnis gegenüber der Anwendung des FragRemovers bei.

Die simulierte klinische Situation durch Verwendung eines Phantomkopfes und eines Dental-Mikroskops erschwerte die Entfernungsversuche. Der Versuchsaufbau ist daher im Gegensatz zu vergleichbaren Studien, in denen die Entfernung an manuell gehaltenen Zähnen durchgeführt wurde, deutlich realitätsnäher. Die manuelle Fixierung der Zähne erlaubt deren Drehung und somit ein einfacheres Einbringen der Instrumente. Auch die räumlichen Bedingungen ohne die umgrenzenden Gewebe und Materialien (Wange, Gegenkiefer, Kofferdamgummi und -klammer) erleichtern die Arbeit deutlich und sind mit den limitierten Gegebenheiten der Mundhöhle nicht vergleichbar. Sowohl die Visualisierung mit dem Mikroskop als auch das Einbringen und die Fixierung der Drahtschlinge sind unter simulierten klinischen Bedingungen erheblich schwieriger durchzuführen als am frei beweglichen und gut zugänglichen Einzelzahn. Die unter diesen erschwerten Bedingungen durchgeführten Entfernungsversuche spiegeln somit eine realistischere Situation als vergleichbare Studien wieder.

#### 4.1.2.1 FragRemover-Gruppe

Die Entfernung des Thermanfil-Obturator unter Verwendung der Schlingentechnik leitet sich aus der Bergung von frakturierten Wurzelkanalinstrumenten ab. Die dazu benutzte Drahtschleife wird mit einer Vorrichtung (FragRemover) in den Kanal eingebracht. Dabei ist eine optische Vergrößerungshilfe von Nöten. Hierzu muss eine entsprechende Vergrößerung genutzt werden, um unter Sichtkontrolle die Drahtschlinge um den Kunststoffträger zu bringen. Des Weiteren ist ein routinierter Umgang von endodontischen Behandlungsabläufen für die Anwendung der Schlingentechnik vorauszusetzen. Die Applikation der Schleife erwies sich als häufig zeitaufwendiger Vorgang.

Für die Applikation der Drahtschlinge um den koronalen Anteil des Kunststoffträgers bedarf es ausreichender Platzverhältnisse im Wurzelkanal. Daher ist die Größe der den Draht beinhaltenden Kanüle möglichst klein zu

wählen. Jedoch darf der Innendurchmesser dieser Spülkanüle nicht kleiner sein als der doppelte Querschnitt des zu applizierenden Drahtes, da ein Einfädeln des Fadens sonst nicht möglich ist. Die benötigte Drahtstärke hängt von der Größe des Thermafil-Obturators ab. Eine höhere Drahtstärke ist widerstandsfähiger gegenüber den notwendigen Zugkräften beim Luxationsversuch des Kunststoffträgers. Jedoch ist durch die daraus resultierende größere Kanülenstärke ein geringeres Platzangebot zur Applikation der Schlinge vorhanden. Abhilfe würde eine invasivere Freilegung zu Ungunsten der Dicke der restlichen Zahnhartsubstanz schaffen, allerdings mit dem erhöhten Risiko einer Perforation. Die Wahl eines dünneren Drahtdurchmessers bedeutet eine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber der angewandten Zugbelastung und kann zu einem Zerreißen des Drahtes führen. Die Wahl der angemessenen Draht- und Kanülenstärke sollte der entsprechenden Situation angepasst sein, es liegen aber hierzu keine Daten oder Empfehlungen vor. Zur Vereinheitlichung der Versuche wurde eine standardisierte Applikation mit mittlerer Drahtstärke (0,15 mm) gewählt.

Jede Anwendung des FragRemovers erfordert die vorherige Anbringung der benötigten Drahtschleife. Durch einen komplexen Vorgang wird die Schlinge mit Hilfe der Kanüle am Applikator befestigt. Abhängig von der Draht- und Kanülenstärke muss dazu eine optische Vergrößerungshilfe verwendet werden. Das Reißen des Drahtes sowie ein vollständiges Zuschneiden der Schlinge ohne Fassung des Kunststoffträgers resultieren in der Notwendigkeit einer erneuten Ladung der Apparatur. Dadurch ist von einem erhöhten Zeitaufwand für eine mehrmalige Anwendung auszugehen.

Die Notwendigkeit eines dentalen Mikroskops, der erhöhte Materialaufwand, ein erhöhter Zeitbedarf und ein hoher Grad an endodontischer Behandlungserfahrung limitieren die Anwendung des FragRemovers auf Spezialisten im Fachgebiet der Endodontie.

#### 4.1.2.2 Reciproc-Gruppe

Mit reziprokierendem Bewegungsablauf arbeitende Instrumenten-Systeme zeigen in der Entfernung von Guttapercha im bereits wurzelkanalgefüllten Zahn aufgrund einer signifikanten Zeitersparnis eine höhere Effizienz als rotierende Nickel-Titan-Instrumente (Zuolo et al. 2013; de Souza et al. 2015; Plotino et al. 2015). Die durch den Zahnhartsubstanzverlust erhöhte Anfälligkeit für Wurzelfrakturen unterscheidet sich zwischen beiden Bewegungssystemen nicht (Üstün et al. 2015). Eine erhöhte Schneidleistung und somit ein niedrigerer Materialrückstand trägt ebenfalls zur Effektivitätssteigerung einer Revisionsbehandlung bei. Das reziproke Bewegungsmuster ist hierbei der

herkömmlichen rotierenden Feilenbewegung ebenbürtig, teilweise auch überlegen (Zuolo et al. 2013; Koçak et al. 2016). Ziel der vorliegenden Versuche war es unter anderem, eine effektive Entfernungsmethode für Thermanfil-Obturatoren zu untersuchen. Daher wurden Reciproc-Feilen der Verwendung von rotierendem Instrumentarium vorgezogen.

Im Vergleich mit anderen reziprok-arbeitenden Instrumenten weist Reciproc keine signifikanten Unterschiede in der Effektivität in der Entfernung von Wurzelfüllmaterialien auf (Rios et al. 2014).

Beiden zu vergleichenden Entfernungstechniken ging eine vorherige Freilegung des koronalen Anteils des Kunststoffträgers voraus. Dieses zeitintensiven Arbeitsschrittes bedarf es beim Entfernungsversuch mit Reciproc nicht, jedoch wurde dieser für eine Vergleichbarkeit beider Versuchsgruppen ebenfalls vorgenommen. Des Weiteren bietet das koronale Darstellen des Kunststoffträgers den Vorteil einer vereinfachteren Applikation des Nickel-Titan-Instruments, da der Kunststoff leichter von der ihn ummantelten Guttapercha optisch abzugrenzen ist. Es kann somit die Stelle der höchsten Guttapercha-Schichtstärke ausgemacht und das Instrument direkt hier eingebracht werden. Dies ermöglichte theoretisch eine Instrumentierung der Guttapercha ohne den Kunststoffträger zu schwächen. Jedoch konnte aufgrund der unterschiedlichen Wurzelkanalanatomien keine standardisierte Stelle zum Einbringen der Reciproc-Feilen evaluiert werden. Des Weiteren kam es in einigen Fällen zur Zerspannung des Thermanfil-Kunststoffträgers. Dadurch war für den Operateur eine direkte visuelle Kontrolle der kompletten Entfernung des Kunststoffträgers nicht ohne weiteres möglich. Durch die Nutzung zwei verschiedener Reciproc-Feilengrößen ist ein Instrumentenwechsel obligat. Jedoch ist der zu erwartende Zeitaufwand für einen Instrumentenwechsel wahrscheinlich vernachlässigbar klein.

Bei der Revision von bereits gefüllten Wurzelkanälen mit maschinellen endodontischen Instrumenten kommt es in jedem Fall zur Materialüberpressung über das *Foramen apicale* (Nevares et al. 2017). Dabei ist die Menge des überpressten Materials ausschlaggebend. Eine erhöhte Menge kann eine Fremdkörperreaktion im periapikalen Gewebe hervorrufen und eine Ursache für einen Fehlschlag der endodontischen Revisionsbehandlung sein (Nair 2006). Eine Mehrzahl der vorliegenden Studien ergab eine geringere Menge an apikal extrudiertem Material für Revisionen mit reziproken Bewegungssystemen im Vergleich zu Handinstrumenten oder rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten (Silva et al. 2014; Dincer et al. 2015; Uzunoglu und Turker 2016; Bilgi et al. 2017). Einige Studien zeigen eine vergleichbare oder höhere Menge von extrudiertem Material nach reziprokierender Instrumentation (Çanakçı et al.

2016; Li et al. 2017; Nevares et al. 2017; Yılmaz und Özyürek 2017). Beim Vergleich der sich reziprok bewegenden Instrumentensysteme untereinander zeigte sich kein signifikanten Unterschied an Materialüberpressungen (Silva et al. 2014).

Aufgrund der erleichterten Handhabung und der zeitsparenderen Anwendung zur Entfernung von Thermafil-Obturatoren lässt sich Reciproc wahrscheinlich besser in den klinischen Alltag integrieren. Auch ein möglicher Verzicht auf starke Vergrößerungshilfen durch dentale Mikroskope und einen weniger ausschlaggebenden Einfluss von endodontischer Behandlungserfahrung machen die Verwendung von Reciproc attraktiver.

## **4.2 Volumetrische Analyse des verbleibenden Wurzelfüllmaterials und des Dentinabtrages**

Zur Bestimmung der Effektivität einer Entfernungsmethode von Wurzelkanalfüllungen wird neben einer möglichen Invasivität, dargestellt durch Dentinabtrag und Komplikationsrate, der Verbleib von Wurzelfüllmaterial beurteilt (Rödig et al. 2018a). Die dreidimensionale Darstellung des Wurzelkanals stellt dabei die Grundlage für die volumetrische Berechnung möglicher iatrogener Veränderungen der Anatomie des Wurzelkanalsystems dar. Hierzu dient die Micro-Computertomographie, eine röntgenologisch-räumliche Darstellung von Objekten im Auflösungsbereich von Mikrometern.

In dieser Studie wurde die Micro-Computertomographie verwendet, da im Gegensatz zu zweidimensionalen Auswertungsverfahren das Micro-CT eine non-invasive und zugleich sehr präzise Analyse ermöglicht. Dabei ist es nicht notwendig, die Zahnwurzel longitudinal zu separieren, um anschließend mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie eine lediglich zweidimensionale, bestenfalls semi-quantitative Bestimmung des verbliebenen Wurzelfüllmaterials durchzuführen (Simsek et al. 2014; Vidal et al. 2016). Es kann eine strukturelle Erhaltung und Schonung der Zahnhartgewebe unter gleichzeitiger volumetrischer Berechnung des Wurzelfüllmaterials erfolgen. Morphologische Veränderungen im Dentin, beispielsweise Rissbildungen und ein möglicher Dentinverlust, können ebenfalls gemessen werden.

Der verwendete Auflösungsbereich der Tomogramme liegt bei 10,5 µm. Die Auflösung entspricht derer vergleichbarer Studien (10-12,8 µm) und liegt dabei im üblicherweise verwendeten Standard (Alberto Rubino et al. 2018; Moe et al. 2018; Delai et al. 2019; Rödig et al. 2019). Eine höhere Auflösung der dreidimensionalen Datensätze ergibt aufgrund der nur sehr gering veränderten Volumina keine signifikante Verbesserung der Volumenberechnung. Die hier

genutzte Auflösung kann auch zur Darstellung von Dentinrissen genutzt werden, welche wesentlich genauere dreidimensionale Darstellungen erfordern. In vergleichbaren Studien wurde hierbei mit ähnlichen oder niedrigeren Auflösungen (10,5-30 µm) gearbeitet (Mandava et al. 2018; Rödiger et al. 2018b).

Die kongruente Überlagerung der prä- und postoperativen Datensätze bildet die Grundlage für eine fehlerfreie Berechnung der Volumenänderungen. Hierbei wurde auf eine semimanuelle Überlagerungsform in allen drei Richtungsachsen zurückgegriffen, da eine computergestützte Überlagerung zu viele Abweichungen ergab. Eventuelle Artefakte und Defekte an der Wurzelaußenseite der untersuchten Zähne erschwerten eine passgenaue Überlagerung zusätzlich. Aufgrund dessen wurde vorrangig die Struktur der mesialen Wurzel kongruent überlagert.

### **4.3 Diskussion der Ergebnisse**

#### **4.3.1 Diskussion der Ergebnisse der Entfernungsversuche**

Die Auswertung der Versuche zur Entfernung des Thermanfil-Kunststoffträgers zeigt eine wesentlich höhere Erfolgschance bei Anwendung des Reciproc-Systems im Vergleich zum FragRemover. Dies ist möglicherweise auf die vereinfachte Applikation der Reciproc-Technik gegenüber der Verwendung des FragRemovers zurückzuführen. Darüber hinaus ist eine wesentlich geringere Komplikationsrate zu verzeichnen.

Bei der Beurteilung des Erfolges der Entfernung stellt sich das Reciproc-System als deutlich effektiver dar. Es konnten dreimal mehr Kunststoffträger mit Hilfe der Reciproc-Instrumente entfernt werden als mit dem FragRemover. Jedoch zeigt ein Vergleich beider Methoden hinsichtlich der vollständigen Luxation des Thermanfil-Kunststoffträgers deutlich geringere Unterschiede. Die vollständige Entfernung des Kunststoffträgers ist ausschlaggebend für den weiteren klinischen Verlauf der Revisionsbehandlung, da im Wurzelkanal zurückgebliebene Kunststoffanteile die vollständige Entfernung des Wurzelfüllmaterials und damit eine vollständige Desinfektion des Wurzelkanalsystems behindern können.

Keine der beiden Versuchsgruppen weist eine direkte Korrelation zwischen Winkel und Radius der Wurzelkrümmung in Bezug auf die Entfernbarkeit des Kunststoffträgers auf. Somit ist ein Zusammenhang zwischen der Wurzelkanalanatomie und der Entfernung von Thermanfil-Obturatoren mit Hilfe von Reciproc und dem FragRemover nicht gegeben. Der zu entfernende

Kunststoffträger besitzt keine direkte Beziehung zur Wurzelkanalwand aufgrund der zirkulären Guttapercha-Ummantelung.

#### 4.3.1.1 Entfernung mit dem FragRemover

Die Anwendung des FragRemovers in den Entfernungsversuchen zeigte lediglich eine Erfolgsrate von 40%, wobei teilweise bis zu 4 Versuche notwendig waren. Jedoch können die fehlgeschlagenen Versuche nicht gesamtheitlich als Fehlschlag der Revisionsbehandlung betrachtet werden. Die Hälfte der fehlgeschlagenen Entfernungsversuche weist keine schwerwiegenden Komplikationen auf, welche eine weitere Revisionsbehandlung verhindern würden. Allerdings birgt die weitere Schwächung der Wurzelkanalwand durch die Notwendigkeit einer erneuten Freilegung des Kunststoffträgerkopfes die erhöhte Gefahr einer Perforation oder späteren Wurzelfraktur (Ossareh et al. 2018).

Die Entfernungsversuche mit dem FragRemover weisen eine erhöhte Komplikationsrate auf. Mehr als dreiviertel aller Applikationen (84%) des FragRemovers führten aufgrund von Komplikationen nicht zum Erfolg. Eine hohe Fehleranfälligkeit der Durchführung und die schwierige Handhabung beeinflussen diese Komplikationsrate. Jedoch war, abhängig von der Komplikation, eine weitere Durchführung der Entfernungsversuche in den meisten Fällen möglich. Die häufigste Ursache von Komplikationen war eine fehlende Friktion der Schlinge am koronalen Anteil des Kunststoffträgers. Zur Behebung dieses Fehlers ist eine stärkere Spannung des Drahtes von Nöten. Dies kann allerdings in einer Separation des koronalen Anteils des Therafil-Kunststoffträgers resultieren, der am zweithäufigsten aufgetretenen Komplikation. Eine Lösung dieser Problematik würde möglicherweise eine deutlich erhöhte Erfolgsrate der FragRemover-Anwendung ermöglichen.

#### 4.3.1.2 Entfernung mit Reciproc-Instrumenten

Die Anwendung des Reciproc-Systems zur Therafil-Entfernung zeigte eine gute Erfolgsquote von 80%. Jedoch gelang eine vollständige Entfernung des Kunststoffträgers nur in zwei von drei Fällen (66,7%). Eine negative Auswirkung auf die weitere Revisionsbehandlung durch im Wurzelkanal verbliebene Fragmente wäre denkbar und könnte sich somit auf die Erfolgsprognose der Revisionsbehandlung auswirken.

Die Komplikationsrate während der Arbeit mit dem Reciproc-System betrug 23,3%. Als am häufigsten aufgetretene Komplikation (42,8%) wurde zwar die Arbeitslänge im Entfernungsversuch erreicht, jedoch gelang eine Luxation des Kunststoffträgers nicht. Eine weitere Komplikation (28,6%) führte zu einem

Fehlschlag des Entfernungsvorganges aufgrund einer nicht erfolgreichen Passage der ThermoFil-Obturatoren mit der Reciproc-Feile. Ein Zusammenhang beider Komplikationen mit der Schneidleistung der Reciproc-Feilen ist dabei nicht ausgeschlossen, jedoch lässt sich ein direkter Zusammenhang der Fehlschläge mit dem verwendeten Feilen-System nicht eindeutig erkennen. Eine Fraktur der verwendeten Feilen in zwei Zähnen (28,6%) resultiert möglicherweise aus der Luxationsbewegung zur Entfernung des Kunststoffträgers aus dem Wurzelkanal, was möglicherweise eine Überbelastung und die daraus entstehende Materialschwächung der Reciproc-Feile zur Folge hatte.

### **4.3.2 Diskussion der Micro-CT-Ergebnisse**

#### 4.3.2.1 Einfluss der Wurzelkanalanatomie auf die Volumenänderungen

Die Anatomie des Wurzelkanals besitzt Einfluss auf die Präparation und Füllung des Wurzelkanals (Tang et al. 2011) sowie auf die Revision des gefüllten Wurzelkanals (Rechenberg und Paqué 2013). Um eine denkbare Einwirkung der strukturellen Gegebenheiten des Wurzelkanalsystems zu untersuchen, wurden die verwendeten Wurzelkanäle hinsichtlich Krümmungsradius und Krümmungswinkel unterschieden.

Hierbei zeigte sich lediglich bei der Entfernung mit Reciproc-Instrumenten ein signifikanter Einfluss auf den Dentinabtrag im apikalen Wurzelkanal. Demnach korreliert ein erhöhter Krümmungswinkel des Wurzelkanals mit einem erhöhten Abtrag an Zahnhartsubstanz im Wurzelkanal. Ein weiterer Einfluss von Krümmungswinkel und Krümmungsradius wurde nicht festgestellt. Ursache hierfür könnte die Positionierung des zu entfernenden ThermoFil-Kunststoffträgers sein. Durch die thermische Verformung der ummantelnden Guttapercha passt sich diese der Anatomie des Wurzelkanalsystems an, der Kunststoffträger liegt dadurch meist zentriert im Wurzelkanal. Des Weiteren wurde die Eingruppierung der verwendeten Wurzelkanäle nur anhand der größten Krümmungswinkel bzw. kleinsten Krümmungsradien in jeweils einer röntgenologischen Messrichtung festgelegt.

#### 4.3.2.2 Dentinabtrag

Die Entfernung einer Wurzelkanalfüllung geht oftmals einher mit einem Abtrag der umgebenden Zahnhartsubstanz. Die Menge des dabei entfernten Dentins ist ein wichtiges Kriterium zur Bestimmung der Invasivität einer Technik zur Instrumentierung obturierter Wurzelkanäle.

Beide in dieser Studie verwendeten Methoden unterscheiden sich, gemessen am gesamten Wurzelkanal, nicht signifikant im Dentinabtrag. Da zur Entfernungstechnik mit Hilfe des FragRemovers bislang keine Studien vorliegen, ist lediglich die Anwendung von Reciproc-Instrumenten mit den Resultaten anderer Studien vergleichbar. Dabei entsprechen die gemessenen Werte in etwa einer Vergleichsstudie mit einem durchschnittlichen Dentinabtrag von  $3,5 \text{ mm}^3$  bei alleiniger Verwendung der R25-Feile, ebenfalls gemessen an gekrümmten, mesialen Wurzelkanälen von Unterkiefermolaren, die jedoch mit einem anderen Wurzelfüllmaterial gefüllt waren (Nevares et al. 2016). Eine Studie zur Volumenmessung des Dentinabtrags bei der Entfernung von Thermafil-Obturatoren aus gekrümmten, mesialen Wurzelkanälen von Unterkiefermolaren mit Reciproc-Instrumenten liegt bisher nicht vor. Aufgrund einer gewissen Analogie zwischen rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten und Feilen mit reziprokem Bewegungsmuster kann die Studie von Rödiger et al. mit ähnlichem Versuchsaufbau, jedoch unter Verwendung von rotierenden Systemen zur Entfernung von Thermafil-Obturatoren zu einem Vergleich herangezogen werden. In dieser Studie wurde ein durchschnittlicher Dentinabtrag von  $2,7\text{-}3,2 \text{ mm}^3$  gemessen (Rödiger et al. 2018a). Diese Ergebnisse beider Vergleichsstudien im gemessenen Dentinabtrag sind mit den in dieser Studie gemessenen Werten annähernd identisch. Dies ist selbst unter Berücksichtigung des vergleichsweise hohen Dentinverlustes durch die koronale Freilegung des Thermafil-Kunststoffträgers zutreffend, welche in den vergleichbaren Studien nicht stattfand.

Da die Reciproc-Instrumente mit einer Größe von .06/40 verwendet wurden, der Wurzelkanal zuvor aber nur bis zur Größe 35 präpariert worden war, war mit einem deutlichen Dentinabtrag in dieser Gruppe zu rechnen.

Es wäre anzunehmen, dass die Anwendung des FragRemovers aufgrund einer fehlenden Schneidleistung deutlich weniger Dentinabtrag aufweist, als die Entfernung mit dem Reciproc-System. Jedoch weichen die gemessenen entfernten Dentinvolumina im gesamten Wurzelkanal nicht signifikant voneinander ab. Einen möglichen Zusammenhang könnte die koronale Freilegung des Thermafil-Kunststoffträgers darstellen. Zwar wurde, um eine Vergleichbarkeit der Methoden zu gewährleisten, der koronale Anteil des Kunststoffträgers in beiden Gruppen durch Entfernung zirkumferenten Dentins freigelegt, jedoch wurde darüber hinaus häufig im Laufe von ersten, nicht erfolgreichen Entfernungsversuchen mit Hilfe des FragRemovers eine weitere koronale Freilegung erforderlich.

Eine volumetrische Berechnung des entfernten Dentins im apikalen Wurzelkanalanteil zeigt hingegen andere Ergebnisse. Hierbei ist der koronal

freigelegte Anteil des Thermafil-Kunststoffträgers nicht eingerechnet. Es ist ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Methoden zu erkennen. Die Anwendung des FragRemovers, der apikal nicht schneidend arbeitet, ist um ein vielfaches schonender gegenüber der Zahnhartsubstanz als die Dentin entfernende Reciproc-Instrumentierung.

#### 4.3.2.3 Verbliebenes Wurzelfüllmaterial

Anhand der dreidimensionalen Analyse des Wurzelkanals mit Hilfe des Micro-CTs können Aussagen zur Effektivität von Revisionstechniken getroffen werden, indem der Abtrag von Wurzelfüllmaterial und der prozentuale Anteil von verbliebenem Obturationsmaterial im Wurzelkanal volumetrisch ermittelt werden.

Die in dieser Studie zur Anwendung gekommenen Entfernungstechniken weisen bei Berücksichtigung nur der erfolgreichen Entfernungsversuche im gesamten Wurzelkanal keine signifikanten Unterschiede weder im Abtrag von Wurzelfüllmaterial, noch im prozentualen Anteil der verbliebenen Thermafil-Obturation auf. Jedoch lässt sich ein signifikanter Unterschied im apikalen Wurzelkanal erkennen. Vorrangiges Ziel der Versuchsdurchführung war die Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers. Bei erfolgreicher Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers erzielten beide Methoden vergleichbare Ergebnisse. Dies war im apikalen Anteil des Wurzelkanals nicht der Fall. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der Thermafil-Kunststoffträger nicht die apikalste Ausdehnung der Wurzelfüllung darstellt, sondern die ummantelnde Guttapercha. Somit kann, trotz entfernter Thermafil-Kunststoffträgers ein großer Anteil an Wurzelfüllmaterial apikal verbleiben. Auf den Abtrag dieses Materialrests hat das schneidende Reciproc-Instrumentarium deutlich mehr Einfluss als der non-invasive FragRemover. Damit wäre der signifikante Unterschied in der Effektivität der Entfernung der Thermafil-Obturation erklärbar. Um eine Entfernung des Kunststoffträgers mit Reciproc-Instrumenten zu erzielen, muss in die ummantelnde Guttapercha schneidend eingedrungen werden. Dies resultiert in einem höheren Abtrag von Wurzelfüllmaterial gegenüber der FragRemover Nutzung, bei der der Kunststoffträger isoliert aus der ummantelnden Guttapercha herausgezogen werden kann.

Es wurde ein durchschnittlicher Abtrag von Wurzelfüllmaterial von 1,08-2,11 mm<sup>3</sup> bei Verwendung des FragRemovers und 2,14-2,42 mm<sup>3</sup> bei der Reciproc-Instrumentierung, abhängig vom Erfolg des Entfernungsversuchs, gemessen. Die Entfernung mit Hilfe des FragRemovers weist dabei 38,0-68,1% und die Entfernung mit Reciproc-Instrumenten 37,1-44,0% Restmaterial im Wurzelkanal auf. Da zur Methode des FragRemovers keine Studien vorliegen, ist lediglich

die Anwendung von Reciproc-Instrumenten vergleichbar. Hierbei ist wiederum in keiner Vergleichsstudie eine Entfernung von Thermafil-Obturatoren mit Hilfe von Reciproc-Instrumenten enthalten. Daher ist lediglich ein Vergleich des verbliebenen Wurzelfüllmaterials zwischen rotierendem Instrumentarium und Reciproc-Feilen an Thermafil-Obturationen möglich. In der Vergleichsstudie verblieben nur 14-19% des Wurzelfüllmaterials nach der Revisionsbehandlung im Wurzelkanal (Rödig et al. 2018a), deutlich weniger als in der vorliegenden Studie. Endpunkt der Arbeit in der vorliegenden Studie war – anders als in der Studie von Rödig et al. die Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers, nicht die vollständige Guttapercha- und Sealerentfernung. Zur Bewertung des Füllmaterialabtrags von Reciproc-Instrumenten lassen sich nur Studien mit anderen Wurzelkanalfülltechniken heranziehen. Dabei wurden Obturationstechniken wie die kalt-laterale Kompaktion oder die warme vertikale Kompaktion genutzt, welche nicht zu den trägerbasierten thermoplastischen Wurzelkanalobturationen gehören. Dies resultiert in einer nicht vergleichbaren Entfernbarekeit im Vergleich zu Thermafil-Obturatoren. Die Vergleichsstudien weisen daher eine hohe prozentuale Streubreite von verbliebenem Füllmaterial von 10-89% im Wurzelkanal auf (Alves et al. 2016; Crozeta et al. 2016b; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Nevares et al. 2016; Kaloustian et al. 2019). Dabei wurden abweichende Größen und Reihenfolgen der Reciproc-Instrumente verwendet. Demnach ist eine direkte Einordnung und Vergleichbarkeit des Ergebnisses der vorliegenden Studie in Bezug auf die Effektivität in der Entfernung des Thermafil-Obturators nicht möglich.

#### **4.4 Schlussfolgerungen**

Eine Beeinflussung des Entfernungsvorganges durch die Wurzelkanalanatomie liegt nur im apikalen Wurzelkanal durch den Wurzelkanalkrümmungswinkel vor. Aus einem Krümmungswinkel von über  $23,75^\circ$  resultiert im apikalen Wurzelkanalanteil ein signifikant höherer Dentinabtrag durch Reciproc-Instrumente. Eine Reciproc-Instrumentierung weist eine höhere Erfolgschance zur Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers auf. Die Anwendung von Reciproc-Instrumenten erzielt einen signifikant höheren Dentinabtrag, aber auch ein geringeres Restvolumen von Füllmaterial im apikalen Wurzelkanal. Beide Entfernungsmethoden weisen bei erfolgreicher Durchführung keine signifikanten Unterschiede im Dentinabtrag und im verbliebenen Füllmaterial im gesamten Wurzelkanal auf. Beide Entfernungsmethoden weisen, unabhängig vom Entfernungserfolg, keine signifikanten Unterschiede im Dentinabtrag im gesamten Wurzelkanal vor. Die Anwendung von Reciproc-Instrumenten, unabhängig vom Entfernungserfolg, erzielt ein signifikant geringeres

Restvolumen von Füllmaterial im gesamten Wurzelkanal. Während der Anwendung beider Entfernungsmethoden traten prozedurale Fehler auf.

Es ist somit eine effektivere Entfernung der Thermafil-Obturatoren bei Verwendung von Reciproc im Gegensatz zum FragRemover möglich. Jedoch lässt sich, aufgrund eines erhöhten Dentinabtrags auf eine höhere Invasivität des Reciproc-Systems schließen. Eine schonendere Alternative für den Erhalt von Zahnhartsubstanz stellt daher der Einsatz des FragRemovers dar.

## 5 Zusammenfassung

Das primäre Ziel einer Revisionsbehandlung sollte eine möglichst vollständige Entfernung von Wurzelfüllmaterial sein, um eine effektive Reinigung des Wurzelkanalsystems zu ermöglichen.

Die vorliegende Ex-vivo-Studie vergleicht die Effektivität der Entfernung von Thermafil-Obturatoren bei Anwendung des FragRemovers und der Reciproc-Instrumentierung.

Sechzig mesiale Wurzelkanäle in extrahierten Unterkiefermolaren wurden aufgrund von röntgenologischen Krümmungsmerkmalen des Wurzelkanals in Form von *Matched-Pairs* in zwei homogene Gruppen eingeteilt. Nach Präparation bis zur Größe .04/35 wurden die Wurzelkanäle mit Thermafil-Obturatoren gefüllt und der Kunststoffträger des Thermafil-Systems koronal freigelegt. Die gefüllten Zähne wurden zur Simulation der klinischen Verhältnisse in einen Phantomkopf montiert und mit Kofferdam isoliert. Die Durchführung der Entfernungsversuche erfolgte durch einen endodontisch erfahrenen Zahnarzt unter Zuhilfenahme eines dentalen Mikroskops mit Reciproc-Instrumenten und dem FragRemove. Durch eine prä- und postoperative micro-computertomographische Analyse der Wurzelkanäle wurden das verbliebene Füllmaterial und der Dentinabtrag volumetrisch bestimmt. Des Weiteren wurden aufgetretene Komplikationen und prozedurale Fehler dokumentiert.

Die Anwendung von Reciproc-Instrumenten zeigte eine höhere Erfolgsquote in der Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers als der FragRemove. Nach Reciproc-Instrumentierung verblieb ein signifikant geringeres Restvolumen an Füllmaterial im Wurzelkanal. Die Anwendung von Reciproc-Instrumenten resultierte in einem signifikant höheren Dentinabtrag im apikalen Wurzelkanal. Der Dentinabtrag beider Methoden war im gesamten Wurzelkanal nicht signifikant unterschiedlich. Ein Wurzelkanalkrümmungswinkel über 23,75° resultierte in einem signifikant erhöhten Dentinabtrag im apikalen Wurzelkanalanteil bei Reciproc-Instrumentierung. Bei der Anwendung beider Entfernungsmethoden kam es zu prozeduralen Zwischenfällen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse eine effektivere Entfernung der Thermafil-Obturation bei Anwendung von Reciproc-Instrumenten belegen. Die Anwendung des FragRemovers resultiert jedoch in einer Zahnhartsubstanz schonenderen Entfernung des Thermafil-Kunststoffträgers.

## 6 Anhang

### 6.1 Datenerhebung

Die nachfolgende Abbildung A1 stellt eine Zusammenfassung der Parameter für die Gruppeneinteilung und die Volumenberechnung durch die Daten der Micro-Computertomographie dar. Dabei sind jeweils die gemessenen Krümmungswinkel und -radien aus bucco-lingualer (Winkel1 bzw. Radius1) und mesio-distaler (Winkel2 bzw. Radius2) Röntgenrichtung gezeigt, sowie die Wurzellänge jedes verwendeten Zahnes. Des Weiteren sind die Daten der volumetrischen Berechnung des Füllmaterials vor (WKF prä) und nach (WKF post) dem Entfernungsversuch und die dabei entfernte Zahnhartsubstanz (Dentinabtrag) enthalten. Auch der prozentuale Anteil an verbliebenem Wurzelfüllmaterial (WKF Reste) ist dargestellt.

Zahn	Gruppe	Winkel1 (°)	Radius1 (mm)	Winkel2 (°)	Radius2 (mm)	Wurzellänge (mm)	WKF prä (mm <sup>3</sup> )	WKF post (mm <sup>3</sup> )	WKF Reste (%)	Dentinabtrag (mm <sup>3</sup> )
1	1	33.00	8.30	28.00	6.30	12.50	5.46	0.14	37.44	1.56
2	2	33.00	8.50	3.00	43.70	11.50	3.33	1.71	46.65	2.80
3	1	15.00	14.30	4.00	73.10	11.00	4.36	0.27	93.84	2.56
5	2	21.00	12.00	12.00	20.30	12.50	3.55	2.14	33.72	2.82
6	2	22.00	10.70	20.00	9.30	11.00	4.20	2.70	35.71	6.60
7	2	24.00	11.70	22.00	11.50	11.50	3.89	2.14	23.56	3.34
9	2	22.00	9.10	6.00	22.50	11.00	3.56	2.33	32.87	2.52
13	2	24.00	9.70	26.00	9.70	13.50	4.30	2.74	44.08	3.80
14	2	24.00	9.30	10.00	15.30	12.50	4.42	2.77	37.33	2.65
15	1	21.00	11.30	13.00	21.10	13.50	4.33	2.75	37.36	2.21
17	1	23.00	11.00	6.00	44.50	14.00	3.30	0.28	91.52	3.82
28	2	18.00	10.50	9.00	18.50	9.00	4.37	1.71	60.87	3.77
30	2	26.00	9.40	4.00	76.00	11.00	4.88	1.22	75.00	4.05
36	1	21.00	9.50	16.00	15.10	11.50	4.15	1.83	55.30	3.23
38	2	33.00	7.50	41.00	2.40	11.50	3.30	1.74	55.38	2.36
41	2	15.00	14.70	11.00	20.20	13.00	3.15	2.41	23.49	1.98
42	2	23.00	11.30	11.00	21.50	13.50	3.25	0.61	81.46	3.47
43	1	20.00	13.20	16.00	13.80	12.00	3.20	1.50	53.13	1.02
50	2	24.00	12.00	15.00	20.10	12.00	3.09	1.97	36.25	3.73
61	2	24.00	11.80	14.00	17.20	12.50	4.37	3.34	32.80	4.17
63	1	25.00	8.40	12.00	21.40	12.00	2.97	0.70	76.43	6.37
67	2	28.00	8.10	12.00	13.50	12.00	3.70	2.50	32.43	5.33
68	2	15.00	13.70	21.00	6.80	11.00	2.74	0.77	71.30	2.07
70	1	25.00	9.50	24.00	9.70	12.00	4.17	0.73	82.49	4.88
71	1	21.00	9.40	9.00	22.70	11.50	2.80	1.76	37.14	5.45
73	2	12.00	17.10	20.00	13.40	13.00	3.97	2.69	32.24	3.71
74	1	18.00	14.10	12.00	22.60	12.00	3.89	0.48	87.66	4.48
82	1	23.00	11.00	16.00	16.50	13.00	3.28	0.24	92.68	2.55
83	2	24.00	10.90	12.00	19.20	12.00	5.00	1.85	63.00	4.51
88	2	20.00	8.90	16.00	17.20	12.50	3.77	2.53	32.89	3.14
89	1	35.00	5.50	37.00	4.30	10.00	3.10	0.16	94.19	4.56
94	1	16.00	13.80	20.00	10.40	11.50	2.64	0.53	73.32	5.80
95	2	13.00	12.40	10.00	20.40	12.00	3.39	2.34	30.97	2.23
98	2	20.00	9.10	3.00	75.50	11.00	3.81	2.42	36.48	2.86
101	1	12.00	22.10	23.00	6.80	10.00	3.81	0.56	85.30	5.02
102	2	19.00	11.80	24.00	9.80	12.00	3.55	2.25	36.62	1.86
103	2	26.00	8.30	16.00	8.70	10.00	2.53	1.61	36.36	1.96
104	2	23.00	12.30	9.00	31.00	14.00	3.25	2.61	19.69	1.74
107	2	13.00	20.00	23.00	11.30	12.00	3.85	2.91	24.42	2.52
110	1	25.00	11.70	8.00	43.10	13.50	3.55	0.69	80.56	1.75
112	2	32.00	9.00	13.00	18.70	13.50	3.78	2.38	37.04	1.94
113	1	20.00	10.40	15.00	21.40	15.00	3.37	0.41	89.67	3.26
121	1	27.00	8.40	12.00	22.10	13.50	4.22	0.15	96.45	2.82
122	1	14.00	16.00	23.00	7.80	12.50	3.20	2.09	34.69	1.83
124	1	20.00	12.00	13.00	17.80	12.00	2.95	0.45	84.75	4.64
127	2	23.00	11.30	17.00	13.30	15.00	6.56	2.34	56.71	3.44
128	1	20.00	11.80	14.00	21.30	13.50	3.50	2.33	31.71	2.83
129	1	16.00	14.30	12.00	18.80	14.50	3.88	3.08	20.62	3.48
130	1	21.00	10.60	9.00	25.30	13.00	3.35	0.12	96.42	0.94
131	2	15.00	15.50	22.00	12.00	13.50	4.17	0.26	93.76	1.74
133	1	32.00	8.90	19.00	15.10	14.00	4.50	2.88	36.00	1.22
136	1	21.00	9.80	14.00	16.70	14.00	3.53	0.41	88.39	2.81
138	2	16.00	13.40	11.00	16.00	13.00	3.70	2.56	30.81	2.80
139	2	17.00	10.40	15.00	12.00	11.50	3.34	1.61	51.80	1.82
141	1	22.00	11.60	8.00	26.20	14.50	3.13	2.07	33.87	4.80
144	1	19.00	10.90	16.00	13.80	12.00	2.84	1.66	41.55	3.87
145	1	22.00	8.10	20.00	11.30	11.00	2.58	1.57	39.15	3.17
146	1	25.00	10.10	14.00	17.60	11.50	2.60	1.70	34.62	2.01
147	1	12.00	16.60	19.00	13.40	12.50	2.77	0.36	87.00	4.22
149	1	18.00	11.50	13.00	16.00	10.00	1.86	0.31	83.33	3.12

Abbildung A1: Zusammenfassung der Gruppeneinteilung und Ergebnisse (Gruppe 1: FragRemover, Gruppe 2: Reciproc)

## 7 Literaturverzeichnis

- Ahmed HMA, Versiani MA, De-Deus G, Dummer PMH (2017): A new system for classifying root and root canal morphology. *Int Endod J* 50, 761–770
- Ahn SY, Kim HC, Kim E (2016): Kinematic effects of nickel-titanium instruments with reciprocating or continuous rotation motion: A systematic review of in vitro studies. *J Endod* 42, 1009–1017
- Alberto Rubino G, de Miranda Candeiro GT, Gonzales Freire L, Faga Iglecias E, de Mello Lemos É, Luiz Caldeira C, Gavini G (2018): Micro-CT evaluation of gutta-percha removal by two retreatment systems. *Iran Endod J* 13, 221–227
- Alves FRF, Marceliano-Alves MF, Sousa JCN, Silveira SB, Provenzano JC, Siqueira JF (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
- Arnold M (2016): Entfernung schwer zugänglicher Fragmente aus dem Wurzelkanal mit einem neuen Hilfsmittel. *Endodontie* 67, 145-156
- Bayram HM, Bayram E, Ocak M, Uzuner MB, Geneci F, Celik HH (2017): Micro-computed tomographic evaluation of dentinal microcrack formation after using new heat-treated nickel-titanium systems. *J Endod* 43, 1736–1739
- 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
- Bertrand MF, Pellegrino JC, Rocca JP, Klinghofer A, Bolla M (1997): Removal of Thermafil root canal filling material. *J Endod* 23, 54–57
- Bilgi IK, Köseleler I, 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
- Bjørndal L, Carlsen O, Thuesen G, Darvann T, Kreiborg S (1999): External and internal macromorphology in 3D-reconstructed maxillary molars using computerized X-ray microtomography. *Int Endod J* 32, 3–9
- Çanakçı BC, Ustun Y, Er O, Sen OG (2016): Evaluation of apically extruded debris from curved root canal filling removal using 5 nickel-titanium systems. *J Endod* 42, 1101–1104
- Chiara P, Fausto Z, Peters OA, Francesco I, Rosaria GM, Luigi G, Giovanna GM, Carlo P (2019): The fate of root canals obturated with Thermafil: 10-year data for patients treated in a master's program. *Clin Oral Investig* 23, 3367–3377.
- Chu CH, Lo ECM, Cheung GSP (2005): Outcome of root canal treatment using Thermafil and cold lateral condensation filling techniques. *Int Endod J* 38, 179–185

- Crozeta BM, de Sousa-Neto MD, Leoni GB, Mazzi-Chaves JF, Silva-Sousa YTC, Baratto-Filho F (2016a): 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
- Crozeta BM, Silva-Sousa YTC, Leoni GB, Mazzi-Chaves JF, Fantinato T, Baratto-Filho F, de Sousa-Neto MD (2016b): Micro-computed tomography study of filling material removal from oval-shaped canals by using rotary, reciprocating, and adaptive motion systems. *J Endod* 42, 793–797
- Cujé J, Bargholz C, Hülsmann M (2009): The outcome of retained instrument removal in a specialist practice. *Int Endod J* 43, 545–554
- de Oliveira BP, Câmara AC, Duarte DA, Heck RJ, Antonino ACD, Aguiar CM (2017): Effect of reciprocating systems and working lengths on apical microcrack development: a micro-CT study. *Braz Dent J* 28, 710–714
- de Souza PF, Oliveira Goncalves LC, Franco Marques AA, Sponchiado Junior EC, Roberti Garcia L da F, de Carvalho FMA (2015): Root canal retreatment using reciprocating and continuous rotary nickel-titanium instruments. *Eur J Dent* 9, 234–239
- De-Deus G, Murad C, Paciornik S, Reis CM, Coutinho-Filho T (2008): The effect of the canal-filled area on the bacterial leakage of oval-shaped canals. *Int Endod J* 41, 183–190
- Delai D, Jardine AP, Mestieri LB, Boijink D, Fontanella VRC, Grecca FS, Kopper PMP (2019): Efficacy of a thermally treated single file compared with rotary systems in endodontic retreatment of curved canals: a micro-CT study. *Clin Oral Investig* 23, 1837–1844
- Dincer AN, Er O, Canakci BC (2015): Evaluation of apically extruded debris during root canal retreatment with several NiTi systems. *Int Endod J* 48, 1194–1198
- Dummer PM, Lyle L, Rawle J, Kennedy JK (1994): A laboratory study of root fillings in teeth obturated by lateral condensation of gutta-percha or Thermafil obturators. *Int Endod J* 27, 32–38
- Emmanuel S, Shantaram K, Sushil KC, Manoj L (2013): An in-vitro evaluation and comparison of apical sealing ability of three different obturation technique - lateral condensation, Obtura II, and Thermafil. *J Int Oral Health* 5, 35–43
- Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Seibert U, Schaller S, Kalender W (1999): Mikro-CT Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur. *Radiol* 39, 203–212
- Feldkamp LA, Goldstein SA, Parfitt MA, Jesion G, Kleerekoper M (1989): The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography. *J Bone Miner Res* 4, 3–11
- Frajlich SR, Goldberg F, Massone EJ, Cantarini C, Artaza LP (1998): Comparative study of retreatment of Thermafil and lateral condensation endodontic fillings. *Int Endod J* 31, 354–357
- Fruchi L de C, Ordinola-Zapata R, Cavenago BC, Hungaro Duarte MA, da Silveira Bueno CE, de Martin AS (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
- Fu M, Zhang Z, Hou B (2011): Removal of broken files from root canals by using ultrasonic techniques combined with dental microscope: A retrospective analysis of treatment outcome. *J Endod* 37, 619–622
- Gavini G, Caldeira CL, Akisue E, Candeiro GT, Kawakami DA (2012): Resistance to flexural fatigue of Reciproc R25 files under continuous rotation and reciprocating movement. *J Endod* 38, 684–687
- Gençoğlu N, Garip Y, Baş M, Samani S (2002): Comparison of different gutta-percha root filling techniques: Thermafil, Quick-fill, System B, and lateral condensation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 93, 333–336
- Geurtsen G, Heidemann D, Hickel R, Löst C, Petschelt A, Raab W, Schäfer E (2000): Wurzelkanalaufbereitungen. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und DGZ. *Dtsch Zahnärztl Z* 55, 719
- 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
- Goldberg F, Artaza LP, Silvio AD (2001): Effectiveness of different obturation techniques in the filling of simulated lateral canals. *J Endod* 27, 362–364
- Guimarães LS, Gomes CC, Marceliano-Alves MF, Cunha RS, Provenzano JC, Siqueira JF (2017): Preparation of oval-shaped canals with TRUShape and reciproc systems: A micro-computed tomography study using contralateral premolars. *J Endod* 43, 1018–1022
- Gutmann JL, Saunders WP, Saunders EM, Nguyen L (2007a): An assessment of the plastic Thermafil obturation technique. Part 2. *Int Endod J* 26, 179–183
- Gutmann JL, Saunders WP, Saunders EM, Nguyen L (2007b): An assessment of the plastic Thermafil obturation technique. Part 1. *Int Endod J* 26, 173–178
- 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
- Heidemann D, Hülsmann M, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, Weiger R (2004): Revision einer Wurzelkanalbehandlung. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und der DGZ. *Dtsch Zahnärztl Z* 59, 605
- Hou BX (2018): [Role of the operating microscope in diagnosis and treatment of endodontic diseases]. *Chin J Stomatol* 53, 386–391
- Hülsmann M (1990): The retrieval of silver cones using different techniques. *Int Endod J* 23, 298–303
- Hülsmann M, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, Weiger R (2007): Good clinical practice: Die Wurzelkanalaufbereitung. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und DGZ. *Dtsch Zahnärztl Z* 60, 1-11

- Hülsmann M, Schinkel I (1999): Influence of several factors on the success or failure of removal of fractured instruments from the root canal. *Endod Dent Traumatol* 15, 252–258
- Imura N, Zuolo ML, Kherlakian D (1993): Comparison of endodontic retreatment of laterally condensed gutta-percha and thermafil with plastic carriers. *J Endod* 19, 609–612
- Jung M, Lommel D, Klimek J (2005): The imaging of root canal obturation using micro-CT. *Int Endod J* 38, 617–626
- Kaloustian MK, Nehme W, El Hachem C, Zogheib C, Ghosn N, Michetti J, Naaman A, Diemer F (2019): Evaluation of two shaping systems and two ultrasonic irrigation devices in removing root canal filling material from mesial roots of mandibular molars: A micro CT study. *Dent J* 7, 2
- Keles A, Koöseoglu M (2009): Dissolution of root canal sealers in EDTA and NaOCl solutions. *J Am Dent Assoc* 140, 74–79
- Koçak MM, Koçak S, Türker SA, Sağlam BC (2016): Cleaning efficacy of reciprocal and rotary systems in the removal of root canal filling material. *J Conserv Dent* 19, 184–188
- Kuhn JL, Goldstein SA, Feldkamp LA, Goulet RW, Jesion G (1990): Evaluation of a microcomputed tomography system to study trabecular bone structure. *J Orthop Res* 8, 833–842
- Levitan ME, Himel VT, 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 JH, Wu TT, He H, Han JL (2017): [Evaluation of the efficacy of two kinds of NiTi retreatment instruments for removing filling material during root canal retreatment]. *Shanghai J Stomatol* 26, 268–271
- Lipski M (2000): [Studies comparing the efficacy of root canal filling with gutta-percha lateral condensation and Thermafil obturators]. *Ann Acad Med Stetin* 46, 317–330
- Mandava J, Yelisela RK, Arikatla SK, Ravi RC (2018): Micro-computed tomographic evaluation of dentinal defects after root canal preparation with hyflex edm and vortex blue rotary systems. *J Clin Exp Dent* 10, 844–851
- Marques-Ferreira M, Abrantes M, Ferreira HD, Caramelo F, Botelho MF, Carrilho EV (2017): Sealing efficacy of system B versus Thermafil and Guttacore obturation techniques evidenced by scintigraphic analysis. *J Clin Exp Dent* 9, 56–60
- Migliau G, Sofan AAA, Sofan EAA, Cosma S, Eramo S, Gallottini L (2014): Root canal obturation: experimental study on the thermafil system related to different irrigation protocols. *Ann Stomatol (Roma)* 5, 91–97
- Moe MMK, Ha JH, Jin MU, Kim YK, Kim SK (2018): Root canal shaping effect of instruments with offset mass of rotation in the mandibular first molar: A micro-computed tomographic study. *J Endod* 44, 822–827
- Monguilhott 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 PNR (2006): On the causes of persistent apical periodontitis: a review. *Int Endod J* 39, 249–281
- Nassri MRG, Carlik J, Silva CRN da, Okagawa RE, Lin S (2008): Critical analysis of artificial teeth for endodontic teaching. *J Appl Oral Sci* 16, 43–49
- 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
- Nevares G, de Albuquerque DS, Bueno CE da S, Cunha RS (2015): Is Guttacore more easily removed from the root canal than Thermafil? An ex-vivo study. *J Can Dent Assoc* 81, 22
- Nevares 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
- Nevares G, Romeiro K, Albuquerque D, Xavier F, Fogel H, Freire L, Cunha R (2017): Evaluation of apically extruded debris during root canal retreatment using ProTaper Next and Reciproc in severely curved canals. *Iran Endod J* 12, 323–328
- Ossareh A, Rosentritt M, Kishen A (2018): Biomechanical studies on the effect of iatrogenic dentin removal on vertical root fractures. *J Conserv Dent* 21, 290-296
- Peters OA, Paqué F (2011): Root canal preparation of maxillary molars with the self-adjusting file: A micro-computed tomography study. *J Endod* 37, 53–57
- Peters OA, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F (2000): Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res* 79, 1405–1409
- Pirani C, Pelliccioni GA, 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, Iacono F, Gatto MR, Fitzgibbon RM, Chersoni S, Shemesh H, Prati C (2017): Outcome of secondary root canal treatment filled with Thermafil: a 5-year follow-up of retrospective cohort study. *Clin Oral Investig* 22, 1363–1373
- Pirani C, Friedman S, Gatto MR, Iacono F, Tinarelli V, Gandolfi MG, Prati C (2018): Survival and periapical health after root canal treatment with carrier-based root fillings: five-year retrospective assessment. *Int Endod J* 51, 178–188
- Plotino G, Ahmed HMA, Grande NM, Cohen S, Bukiet F (2015): Current assessment of reciprocation in endodontic preparation: A comprehensive review-Part II: Properties and effectiveness. *J Endod* 41, 1939–1950
- Rechenberg D-K, Paqué F (2013): Impact of cross-sectional root canal shape on filled canal volume and remaining root filling material after retreatment. *Int Endod J* 46, 547–555

- Rios M de A, Villela AM, Cunha RS, Velasco RC, Martin ASD, Kato AS, Bueno CE da S (2014): Efficacy of 2 reciprocating systems compared with a rotary retreatment system for gutta-percha removal. *J Endod* 40, 543–546
- Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG (1985): The “balanced force” concept for instrumentation of curved canals. *J Endod* 11, 203–211
- Rödig T, Hausdörfer T, Konietschke F, Dullin C, Hahn W, Hülsmann M (2012): Efficacy of D-RaCe and ProTaper Universal Retreatment NiTi instruments and hand files in removing gutta-percha from curved root canals – a micro-computed tomography study: Retreatment of curved root canals. *Int Endod J* 45, 580–589
- Rödig T, Wagner J, Wiegand A, Rizk M (2018a): 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
- Rödig T, Müller C, Hoch M, Haupt F, Schulz X, Wiegand A, Rizk M (2018b): Moisture content of root canal dentine affects detection of microcracks using micro-computed tomography. *Int Endod J* 51, 357–363
- Rödig T, Koberg C, Baxter S, Konietschke F, Wiegand A, Rizk M (2019): Micro-CT evaluation of sonically and ultrasonically activated irrigation on the removal of hard-tissue debris from isthmus-containing mesial root canal systems of mandibular molars. *Int Endod J* 52, 1173–1181
- 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
- Royzenblat A, Goodell G (2007): Comparison of removal times of Thermafil plastic obturators using ProFile rotary instruments at different rotational speeds in moderately curved canals. *J Endod* 33, 256–258
- Schäfer E, Olthoff G (2002): Effect of three different sealers on the sealing ability of both Thermafil obturators and cold laterally compacted gutta-percha. *J Endod* 28, 638–642
- 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
- Schneider SW (1971): A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 32, 271–275
- Shahabinejad H, Ghassemi A, Pishbin L, Shahravan A (2013): Success of ultrasonic technique in removing fractured rotary nickel-titanium endodontic instruments from root canals and its effect on the required force for root fracture. *J Endod* 39, 824–828
- Silva EJNL, Sá L, Belladonna FG, Neves AA, Accorsi-Mendonça T, Vieira VTL, De-Deus G, Moreira EJ (2014): Reciprocating versus rotary systems for root filling removal: Assessment of the apically extruded material. *J Endod* 40, 2077–2080
- Simsek N, Keles A, Ahmetoglu F, Ocak MS, Yologlu S, Simsek N, Keles A, Ahmetoglu F, Ocak MS, Yologlu S (2014): Comparison of different retreatment techniques and root canal sealers: a scanning electron microscopic study. *Braz Oral Res* 28, 1–7

- Slaus G, Bottenberg P (2002): A survey of endodontic practice amongst Flemish dentists. *Int Endod J* 35, 759–767
- Spriggs K, Gettleman B, Messer HH (1990): Evaluation of a new method for silver point removal. *J Endod* 16, 335–338
- Stabholz A, Friedman S (1988): Endodontic retreatment – Case selection and technique. Part 2: Treatment planning for retreatment. *J Endod* 14, 607–614
- Tang L, Sun T, Gao X, Zhou X, Huang D (2011): Tooth anatomy risk factors influencing root canal working length accessibility. *Int J Oral Sci* 3, 135–140
- Üstün Y, Topçuoğlu HS, Düzgün S, Kesim B (2015): The effect of reciprocation versus rotational movement on the incidence of root defects during retreatment procedures. *Int Endod J* 48, 952–958
- Uzunoglu E, Turker SA (2016): Impact of different file systems on the amount of apically extruded debris during endodontic retreatment. *Eur J Dent* 10, 210–214
- Venino PM, Citterio CL, Pellegatta A, Ciccarelli M, Maddalone M (2017): A micro-computed tomography evaluation of the shaping ability of two nickel-titanium instruments, HyFlex EDM and ProTaper Next. *J Endod* 43, 628–632
- Vidal FT, Nunes E, Horta MCR, Freitas MRLS, Silveira FF (2016): Evaluation of three different rotary systems during endodontic retreatment – Analysis by scanning electron microscopy. *J Clin Exp Dent* 8, e125–e129
- Violich DR, Chandler NP (2010): The smear layer in endodontics – a review. *Int Endod J* 43, 2–15
- Vittoria G, Pantaleo G, Blasi A, Spagnuolo G, Iandolo A, Amato M (2018): Thermafil: A new clinical approach due to new dimensional evaluations. *Open Dent J* 12, 173–180
- Ward JR, Parashos P, Messer HH (2003): Evaluation of an ultrasonic technique to remove fractured rotary nickel-titanium endodontic instruments from root canals: An experimental study. *J Endod* 29, 756–763
- Wefelmeier M, Eveslage M, Bürklein S, Ott K, Kaup M (2015): Removing fractured endodontic instruments with a modified tube technique using a light-curing composite. *J Endod* 41, 733–736
- Wilcox LR, Juhlin JJ (1994): Endodontic retreatment of Thermafil versus laterally condensed gutta-percha. *J Endod* 20, 115–117
- Wong AWY, Zhang S, Li SKY, Zhang C, Chu CH (2017): Clinical studies on core-carrier obturation: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health* 17, 167–177
- Wu MK, van Der Sluis LWM, Wesselink PR (2004): Fluid transport along gutta-percha backfills with and without sealer. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology* 97, 257–262
- Yılmaz K, Özyürek T (2017): Apically extruded debris after retreatment procedure with Reciproc, ProTaper Next, and twisted file adaptive instruments. *J Endod* 43, 648–651

- Zhang L, Joubert C, Bruder G, Yang K, Aseel-Fine A, Jones K, Rafailovich M (2017): Effectiveness of X-ray computed microtomography to determine structure-property relationships of Gutta-percha. *Dent Mater J* 36, 253–259
- Zuolo AS, Mello JE, Cunha RS, Zuolo ML, Bueno CES (2013): Efficacy of reciprocating and rotary techniques for removing filling material during root canal retreatment. *Int Endod J* 46, 947–953

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. dent. Michael Hülsmann, Oberarzt der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, für die Vergabe des Themas und die sorgfältige Betreuung dieser Dissertation.

Für die Einweisung und Betreuung der Arbeit am Micro-CT gilt mein Dank Frau Dr. rer. nat. Marta Rizk, wissenschaftliche Mitarbeiterin der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie.

Herrn Dr. rer. nat. Andreas Leha, Leiter der wissenschaftlichen Serviceeinrichtung der Abteilung Medizinische Statistik der Universität Göttingen, möchte ich für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung danken.