

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

**Effektivität von reziprok und rotierend
arbeitenden Nickel-Titan-Instrumenten
zur Revisionsbehandlung
an gekrümmten Molaren
- Eine Mikro-Computertomografie-Studie -**

INAUGURAL-DISSERTATION

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

vorgelegt von

Pamela Reicherts

aus

Hessisch Lichtenau

Göttingen 2018

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. H. K. Kroemer
Referentin:	Priv.-Doz. Dr. med. dent. T. Rödiger
Ko-Referent:	Priv.-Doz. Dr. med. dent. S. Rinke
Drittreferentin:	Prof. Dr. med. M. Schön

Datum der mündlichen Prüfung: 05.06.2019

Die vorliegende Promotionsschrift war die Grundlage für folgende Veröffentlichung:

Rödig T, Reicherts P, Konietschke F, Dullin C, Hahn W, Hülsmann M (2014):

Efficacy of reciprocating and rotary NiTi instruments for retreatment of curved root canals assessed by micro-CT.

Int Endod J 47 (10), 942-948

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel " Effektivität von reziprok und rotierend arbeitenden Nickel-Titan-Instrumenten zur Revisionsbehandlung an gekrümmten Molaren - Eine Mikro-Computertomografie-Studie -" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den 28.12.2018

.....

(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht	2
2.1 Ätiologie pulpaler Erkrankungen.....	2
2.2 Primäre Wurzelkanalbehandlung.....	2
2.3 Revisionsbehandlung.....	4
2.3.1 Indikationen und Kontraindikationen	4
2.3.2 Ziele	5
2.3.3 Prognose einer Revisionsbehandlung	6
2.4 Wurzelkanalfüllmaterialien und -techniken.....	6
2.4.1 Techniken für die Guttapercha-Entfernung.....	7
2.5 Wurzelkanalinstrumente.....	8
2.5.1 Handinstrumente.....	8
2.5.2 ProTaper- und ProTaper Universal Retreatment-Instrumente	10
2.5.3 Reciproc-Instrumente.....	12
2.6 Mikro-Computertomografie.....	15
3 Ziel dieser Studie	20
4 Material und Methode	21
4.1 Zahnauswahl	21
4.2 Wurzelkanalpräparation.....	24
4.3 Wurzelkanalfüllung.....	25
4.4 Gruppeneinteilung.....	26
4.5 Revision.....	27
4.6 Mikro-Computertomografie	32
4.6.1 Volumenbestimmung	33
4.7 Statistische Analyse	36
5 Ergebnisse.....	37
5.1 Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials.....	37
5.2 Dentinabtrag während der Revisionsbehandlung.....	38
5.3 Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1).....	40
5.4 Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2).....	41

5.5	Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung (Γ -gesamt)	43
5.6	Zwischenfälle	44
6	Diskussion	46
6.1	Diskussion der Methode	46
6.1.1	Gruppeneinteilung.....	46
6.1.2	Revisionsbehandlung	47
6.1.3	Bewertung der Revision	50
6.1.4	Lösungsmittel.....	52
6.2	Diskussion der Ergebnisse.....	52
6.2.1	Verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial.....	52
6.2.2	Zahnhartsubstanzverlust	54
6.2.3	Arbeitszeiten.....	55
6.2.4	Zwischenfälle	56
7	Schlussfolgerungen	59
8	Zusammenfassung	60
9	Anhang	61
10	Literaturverzeichnis	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Querschnitt der ProTaper-Instrumente (a) konvexer und b) konkaver Instrumentenquerschnitt.....	11
Abbildung 2: Verwendete ProTaper- (a) und ProTaper Universal Retreatment-Instrumente (b).....	11
Abbildung 3: Verwendete Reciproc-Instrumente (R25 links und R40 rechts).....	13
Abbildung 4: S-förmiger Querschnitt eines Reciproc-Instrumentes.....	14
Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Mikro-Computertomografen.....	16
Abbildung 6: a) Filter und Objektträger und b) Objekt und Detektor.....	16
Abbildung 7: Festlegung der drei Referenzpunkte A, B und C und Bestimmung des Krümmungswinkels nach Schneider (1971).....	22
Abbildung 8: Bestimmung des Krümmungsradius modifiziert nach Schäfer et al. (2002).....	23
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchaufbaus.....	31
Abbildung 10: Haupteinheit des Mikro-Computertomografen.....	32
Abbildung 11: a) und b) Platzierung und Positionierung der Zahnwurzeln innerhalb des Probenhalters und des Mikro-Computertomografen.....	32
Abbildung 12: Anlegen einer <i>Region of Interest</i> (ROI) mit der MicroView Software, Version 2.1.2.....	34
Abbildung 13: Grauwert histogramm einer Probe.....	34
Abbildung 14: Bestimmung des Volumens der Wurzelkanalfüllung durch Eingabe der unteren Grenze von 9000 und Markierung der Kurve bis zum Ende.....	35
Abbildung 15: Volumenbestimmung der Zahnhartsubstanz durch eine rote Markierung der entsprechenden Kurvenanteile im Grauwert histogramm und Überprüfung des ausgewählten Bereichs durch die Option <i>highlight selected region</i>	35
Abbildung 16: <i>Box-Plot</i> -Diagramm zur Darstellung des postoperativen Volumens des Wurzelkanalfüllmaterials in mm ³	37
Abbildung 17: <i>Box-Plot</i> -Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrages in mm ³ während der Revisionsbehandlung.....	39
Abbildung 18: <i>Box-Plot</i> -Diagramm zur Darstellung der Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge.....	40
Abbildung 19: <i>Box-Plot</i> -Diagramm zur Darstellung der Zeit T2 (in s) bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials.....	42
Abbildung 20: <i>Box-Plot</i> -Diagramm zur Darstellung der gesamten Arbeitszeit (T-gesamt in s) für die drei experimentellen Gruppen.....	43
Abbildung 21: Frakturierte NiTi-Instrumente und unversehrte Feilen mit der entsprechenden Probe a) frakturierte D3-Feile innerhalb der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper Gruppe b) frakturiertes R25-Instrument innerhalb der Reciproc Gruppe.....	45
Abbildung 22: Perforationen im koronalen Wurzel Drittel mit dem ProTaper Universal Retreatment-Instrument D1.....	45
Abbildung 23: Zusammenfassung der Gruppeneinteilung und Datenerhebung.....	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die ProTaper-Instrumente (Dentsply Sirona)	10
Tabelle 2: Arbeitsschritte der standardisierten Wurzelkanalpräparation mit Gates-Glidden-Bohrern und FlexMaster-Instrumenten	24
Tabelle 3: Übersicht über die Mittelwerte (<i>mean</i>), Standardabweichungen (SD) und Signifikanzen der fünf präoperativen Parameter für die drei experimentellen Gruppen	26
Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Instrumente für die Revision der Gruppe 1 mit Gates-Glidden-Bohrer und Hedström-Feilen	27
Tabelle 5: Übersicht der verwendeten Instrumente für die Revision der Gruppe 2 mit ProTaper Universal Retreatment und ProTaper-Instrumenten	28
Tabelle 6: Übersicht der verwendeten Instrumente für die Revision der Gruppe 3 mit Gates-Glidden-Bohrer und Reciproc-Instrumenten	29
Tabelle 7: Mittelwerte (<i>mean</i>) und Standardabweichungen (SD) der erhobenen Daten zum Wurzelkanalfüllmaterial vor und nach Revision	38
Tabelle 8: Paarvergleiche der einzelnen Gruppen bezüglich des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials	38
Tabelle 9: Mittelwerte (<i>mean</i>) und Standardabweichungen (SD) des Dentinabtrags und der Volumina der Zahnhartsubstanz vor und nach der Revision	39
Tabelle 10: Paarvergleiche der einzelnen Gruppen bezüglich des Dentinabtrags	40
Tabelle 11: Paarvergleiche und statistischen Auswertung der Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)	41
Tabelle 12: Paarvergleiche und statistische Auswertung der Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2)	42
Tabelle 13: Paarvergleiche und statistische Auswertung der gesamten Arbeitszeit (T-gesamt)	43
Tabelle 14: Mittelwerte (<i>mean</i>) und Standardabweichungen (SD) der Arbeitszeiten T1 (in s) und T2 (in s), sowie der gesamten Arbeitszeit (T-gesamt) (in s)	44

Abkürzungsverzeichnis

ESE	<i>European Society of Endodontology</i>
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
WSR	Wurzelspitzenresektion
NiTi	Nickel-Titan
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PTUR	<i>ProTaper Universal Retreatment</i>
Mikro-CT	Mikro-Computertomografie
CT	Computertomografie
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
HE	<i>Hounsfield-Einheiten</i>
HU	<i>hounsfield unit</i>
AL	Arbeitslänge
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
NaOCl	Natriumhypochlorit
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
SD	Standardabweichung
ROI	<i>Region of Interest</i>
RP	Reciproc
HF	Hedström-Feilen
Vol. WKF	Volumen der Wurzelkanalfüllung
WKF	Wurzelkanalfüllung

1 Einleitung

Die Endodontologie ist ein Teilbereich der Zahnheilkunde, der sich mit der Anatomie und Funktion der Pulpa sowie den periradikulären Geweben beschäftigt. Dabei stehen die Prävention und Therapie dieser Strukturen bei Erkrankungen und Verletzungen im Mittelpunkt. Wird bei einer dentalen Schädigung mit Reizung der Pulpa die Ursache nicht behoben, geht der zunächst reversible Entzündungszustand des Endodonts in eine irreversible Form über, und eine Wurzelkanalbehandlung ist indiziert. In einigen Fällen scheitert allerdings diese Primärbehandlung, wodurch weitere Therapieoptionen mit dem Patienten diskutiert werden müssen. Viele Patienten wünschen einen langfristigen Erhalt der eigenen Zähne und lehnen somit eine Extraktion des Zahnes ab. Die Revisionsbehandlung stellt in der Regel die Therapie der Wahl dar. Das vollständige Entfernen der vorhandenen Wurzelkanalfüllung ist das Hauptziel einer Revision. Dieser Teil der Therapie ist insofern von großer Bedeutung, als die nachfolgenden Maßnahmen auf diesem Schritt aufbauen. In einigen Fällen hat sich die Entzündungsreaktion des Wurzelkanals auf den umgebenden Knochen ausgebreitet (sogenannte Parodontitis apicalis) und ohne geeignete desinfizierende Maßnahmen ist eine Heilung nicht zu erwarten. Die chemische Desinfektion des Wurzelkanalsystems mit anschließender mechanischer Präparation, die erneute Wurzelkanalfüllung sowie ein bakteriendichter Verschluss in Form einer geeigneten postendodontischen Versorgung stellen die weiteren Pfeiler der Therapie dar. Revisionsbehandlungen sind häufig zeitintensiv und eine besondere technische Herausforderung für den Zahnarzt. Der Schwierigkeitsgrad und die Prognose werden meist durch die Anatomie, die bereits erfolgte Therapie und die aktuelle Diagnose bestimmt.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Effektivität und Sicherheit von drei Revisionstechniken bei der Entfernung von lateral kompakter Guttapercha und *sealer* (Versiegler) aus gekrümmten Wurzelkanälen zu bestimmen. Mit Hilfe prä- und postoperativer Mikro-Computertomografie-Aufnahmen wurden der durch die Revisionsbehandlung bedingte Zahnhartsubstanzverlust und das Volumen der verbliebenen Wurzelkanalfüllung ermittelt. Des Weiteren wurden die Arbeitszeiten und prozedurale Fehler notiert.

2 Literaturübersicht

2.1 Ätiologie pulpaler Erkrankungen

Kariöse Läsionen, dentale Traumata, Parodontopathien und restaurative Maßnahmen können zu einer Schädigung der Pulpa führen (Kakehashi et al. 1965; Reeves und Stanley 1966; Langeland et al. 1971; Schäfer 2005). Bakterien und deren Stoffwechselprodukte dringen dabei über freiliegende Dentintubuli zur Pulpa vor und lösen eine initiale Entzündungsreaktion (Pulpitis) aus (Kakehashi et al. 1965; Möller et al. 1981; Ricucci und Siqueira 2010). Die in der Pulpa befindlichen Odontoblasten sind in der Lage, an den betroffenen Stellen Reizdentin zu bilden. Dieser Abwehrmechanismus schützt die Pulpa aber nur bedingt. Wird der initiale bakterielle Reiz nicht beseitigt, geht eine reversible Pulpitis in ein irreversibles Stadium mit nachfolgender Pulpanekrose über, sodass eine Wurzelkanalbehandlung notwendig wird. Beim Fortbestehen der bakteriellen Infektion im Wurzelkanalsystem kann sich die Entzündungsreaktion auf den apikalen Bereich ausweiten und zu einer Entzündung der periradikulären Gewebe führen (Parodontitis apicalis). Diese Parodontitis apicalis ist eine durch eine bakterielle Infektion verursachte Erkrankung endodontischen Ursprungs (Nair 2006; Siqueira und Rôças 2014), die mit klinischen Symptomen, wie zum Beispiel Schmerzen oder Schwellungen, assoziiert sein kann.

2.2 Primäre Wurzelkanalbehandlung

Ziel einer Wurzelkanalbehandlung ist es, den Zahn in seiner Funktion zu erhalten und gesunde periradikuläre Verhältnisse aufrechtzuerhalten beziehungsweise wiederherzustellen. Die Erfolgsaussichten bei einer primären Wurzelkanalbehandlung sind im Allgemeinen gut bis sehr gut. Allerdings bestimmen Faktoren wie Zahn- und Wurzelkanalanatomie, der mikrobiologische Ausgangsbefund des Endodonts sowie der Zustand des Parodonts maßgeblich die Prognose.

Laut der Qualitätsrichtlinien für eine endodontische Behandlung der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie (*European Society of Endodontology*) ist eine Wurzelkanalbehandlung erfolgreich, wenn der Parodontalspalt röntgenologisch eine physiologische Breite aufweist und keine klinischen Symptome bestehen (ESE 2006). Dazu zählen unter anderem Schmerzen, Schwellungen, Fistelgänge, aber auch Funktionsverluste (ESE 2006). In einer wissenschaftlichen Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und

Kieferheilkunde (DGZMK) zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen wird eine Erfolgsrate bei Zähnen mit irreversibel geschädigter Pulpa oder Pulpanekrose ohne periapikale Läsion zwischen 85 und 95% angegeben (DGZMK 2001). Diese prozentualen Angaben sind vergleichbar mit der Erfolgsrate von 96% in einer Untersuchung von Sjögren et al. (1990). Hier zeigten zudem 86% der Zähne mit einer Parodontitis apicalis eine Heilung der Läsion. Eine aktuelle Übersichtsarbeit bestätigt diese Angaben (Chércoles-Ruiz et al. 2017). Besteht eine periapikale Läsion, so beeinflusst diese den Erfolg einer Primärbehandlung (Chércoles-Ruiz et al. 2017), dabei hat die Größe der Läsion keinen Einfluss auf das Resultat (Sjögren et al. 1990). Für Zähne ohne Parodontitis apicalis variiert die Erfolgsrate zwischen 82 - 97%, wohingegen die Erfolgsquote bei periapikalen Läsionen auf 75 - 87% sinkt (Chércoles-Ruiz et al. 2017). Ein weiteres Kriterium für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung ist eine funktionelle Belastung des Zahnes ohne Beschwerden (ESE 2006).

Eine Evaluation der Therapie mittels röntgenologischer Überprüfung und klinischer Untersuchung sollte zunächst nach einem Jahr und anschließend nach Bedarf erfolgen (ESE 2006). Falls mit Hilfe röntgenologischer Kontrollen eine Verkleinerung der periapikalen Läsion festgestellt werden kann, deutet dies auf eine Heilung beziehungsweise Regeneration der knöchernen Strukturen hin. Ist die Größe der Läsion unverändert oder verkleinert sich die periapikale Radioluzenz nur geringfügig, empfehlen die Richtlinien der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie (ESE) einen Beobachtungszeitraum von mindestens vier Jahren (ESE 2006).

Studien belegen allerdings, dass die Heilung und Regeneration des Knochens in einem deutlich kürzeren Zeitraum stattfinden kann (Wu et al. 2006). In der Regel tritt in 97% der Fälle eine Heilung der periapikalen Läsion innerhalb des ersten Jahres nach erfolgter Wurzelkanalbehandlung ein (Rubinstein und Kim 1999). Die durchschnittliche Zeit bis zur Heilung betrug dabei sieben Monate (Rubinstein und Kim 1999). Der Erfolg einer primären Wurzelkanalbehandlung wird weiterhin während der Behandlung durch strikte Einhaltung verschiedener Schritte zur Infektionskontrolle (z. B. Entfernung der kariösen Läsion, Anfertigung einer bakteriendichten Aufbaufüllung, Isolation des Zahnes mit Kofferdam) beeinflusst. Weiterhin sollte während der chemo-mechanischen Aufbereitung ein Zugang zum apikalen Foramen, ein geeigneter und bakteriendichter Verschluss des Wurzelkanalsystems ohne eine Extrusion der verwendeten Materialien ins apikale Gewebe und zusätzlich eine Vermeidung einer Reinfektion durch eine postendodontische Restauration des Zahnes gewährleistet sein (Ng et al. 2008).

2.3 Revisionsbehandlung

Scheitert eine primäre Wurzelkanalbehandlung, stehen zwei mögliche Therapiekonzepte zur Auswahl. Zum einen kann eine chirurgische Wurzelspitzenresektion (WSR) durchgeführt werden und zum anderen eine orthograde Revisionsbehandlung. Obwohl diese eine besondere Herausforderung an die zahnärztliche Tätigkeit darstellen, sind Revisionen früherer endodontischer Behandlungen aufgrund ihrer Vorteile chirurgischen Interventionen vorzuziehen. Zu den Vorteilen zählen geringere intraoperative Risiken und die Möglichkeit, über einen erneuten Zugang intrakanaläre Infektionen des Wurzelkanalsystems zu beseitigen (Friedman 2002; Taşdemir et al. 2008).

Es gibt verschiedene intra- und extraradikuläre Ursachen, die zum Scheitern einer Primärbehandlung führen können. Der häufigste Grund ist eine persistierende mikrobielle Infektion innerhalb des Wurzelkanalsystems (Nair et al. 1999; Nair 2006; Siqueira und Rôças 2014). Sowohl intraradikulär verbliebenes nekrotisches Gewebe als auch Bakterien können apikale Entzündungen und Schmerzen verursachen (Schirrmeyer et al. 2006b). Aufgrund der komplexen Anatomie des Endodonts ist eine vollständige Entfernung des verbliebenen infizierten Gewebes und der Mikroorganismen unmöglich (Vertucci 1984). Vor allem im apikalen Anteil auftretende Seitenkanäle, Ramifikationen, Isthmen und konfluierende Bereiche können für eine mangelnde chemo-mechanische Desinfektion verantwortlich sein und somit zum Misserfolg der Wurzelkanalbehandlung führen (Nair 2006). Des Weiteren können eine nicht ausreichend dimensionierte Zugangskavität, mangelnde Instrumentation und Reinigung der Wurzelkanäle sowie eine Reinfektion aufgrund einer koronalen Undichdigkeit (*leakage*) zu einem Misserfolg der Wurzelkanalbehandlung führen (Nair 2006). Somit können mit Hilfe einer Revision in der Regel die meisten Ursachen, die zum Scheitern der Primärbehandlung geführt haben, beseitigt werden.

2.3.1 Indikationen und Kontraindikationen

Indikationen für die Revision einer Wurzelkanalbehandlung sind laut der wissenschaftlichen Stellungnahme der DGZMK (2004) klinische oder röntgenologische Symptome einer neu entstandenen oder persistierenden Parodontitis apicalis. Des Weiteren sollte eine Revisionsbehandlung bei klinisch oder röntgenologisch unzureichender Qualität der Wurzelkanalfüllung (Inhomogenität oder nicht biokompatibles Wurzelkanalfüllmaterial), nicht behandelten beziehungsweise nicht gefüllten Wurzelkanälen eingeleitet werden. Das vorhandene Wurzelkanalfüllmaterial sollte bei Zähnen mit externen entzündlichen Wurzelresorptionen

oder bei Exposition der Füllmaterialien zum Mundhöhlenmilieu aufgrund einer Rekontamination entfernt werden (DGZMK 2004).

Kontraindikationen für eine orthograde Revision sind extraradikuläre Infektionen, z. B. in Form einer Aktinomykose. Diese Infektion kann durch intraradikuläre Maßnahmen nicht beseitigt werden. Weitere Kontraindikationen sind echte Zysten und extrudierte Materialien. Im Periapex befindliches Wurzelkanalfüllmaterial oder körperfremde Materialien wie Kalziumhydroxid oder Amalgam können Immunreaktionen auslösen (Nair 2006). In diesen Fällen ist eine chirurgische Intervention sinnvoll. Sollte ein wurzelkanalbehandelter Zahn weitestgehend zerstört oder nach der Revision nicht mehr restaurationsfähig sein, so ist der Zahn funktional nicht mehr erhaltungswürdig und eine Extraktion meist die einzige Alternative.

2.3.2 Ziele

Die Ziele einer Revisionsbehandlung sind ein langfristiger Zahnerhalt, gesunde periradikuläre Verhältnisse sowie die Beschwerdefreiheit des Patienten. Zu Beginn der Revision muss zunächst die Qualität der koronalen Restauration überprüft werden (Stabholz und Friedman 1988). Im Rahmen der Infektionskontrolle muss zunächst entschieden werden, ob die vorhandene Restauration belassen werden kann oder eine präendodontische Aufbau-füllung angefertigt werden muss.

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg einer Revision ist die vollständige Entfernung des vorhandenen Wurzelkanalfüllmaterials, um das Endodont umfassend präparieren und desinfizieren zu können (Stabholz und Friedman 1988; Duncan und Chong 2010). Die Entfernung des Füllmaterials kann bei gut kompaktierten Wurzelkanalfüllungen sehr viel Zeit in Anspruch nehmen (Ladley et al. 1991) und besonders bei gekrümmten Wurzelkanälen sehr aufwendig sein (Gergi und Sabbagh 2007; Gu et al. 2008; Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Beasley et al. 2013; Rödiger et al. 2014; Rödiger et al. 2018). Das am meisten verwendete Wurzelkanalfüllmaterial ist hierbei Guttapercha (Nair 2006).

Friedman et al. (1989) schlugen vor, zum Erweichen von stark kompaktierter Guttapercha in gekrümmten Kanälen ein Lösungsmittel zu verwenden. Das erweichte Material bietet weniger Widerstand, wodurch Stufenbildungen in der Kanalwand und Perforationen verhindert werden (Stabholz und Friedman 1988). Der Einsatz eines Lösungsmittels sollte jedoch zurückhaltend erfolgen (Stabholz und Friedman 1988), da einige Substanzen, wie z. B. Chloroform, toxische Nebenwirkungen aufweisen (Wennberg und Ørstavik 1989).

2.3.3 Prognose einer Revisionsbehandlung

In der Literatur lassen sich verschiedene Angaben bezüglich der Prognose von Revisionsbehandlungen finden. Die Angaben hängen stark vom präoperativen Befund und dem Beobachtungszeitraum ab. In einer prospektiven Studie von Ng et al. (2011) wurde eine Überlebensrate von 95% nach vier Jahren bei wurzelkanalbehandelten Zähnen nachgewiesen. Die Behandlungsart, ob Primär- oder Revisionsbehandlung, hatte dabei keinen Einfluss auf das Ergebnis. Laut Stellungnahme der DGZMK (2001) zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen können Zähne nach gescheiterter Primärbehandlung ohne begleitende Parodontitis apicalis zu 89 bis 95% erfolgreich revidiert und therapiert werden. Dabei kann in der Regel eine Verbesserung der Qualität hinsichtlich der Homogenität, der Länge der Wurzelkanalfüllung und der Wandständigkeit erzielt werden. Bei Revisionsbehandlungen mit assoziierter periapikalen Aufhellung oder infizierten Wurzelkanalsystem sinkt die Prognose der Therapie auf 50 bis 70%. In einer klinischen Studie wurde der Einfluss der präoperativen Veränderung der Kanalanatomie auf die Prognose der Revision untersucht (Gorni und Gagliani 2004). Insgesamt wurde die Erfolgsrate mit nahezu 70% innerhalb des Beobachtungszeitraumes von zwei Jahren angegeben. Wurde allerdings die Anatomie während der Primärbehandlung verändert, führte dies zu einer geringeren Erfolgsrate von 47%. Im Vergleich dazu betrug der Erfolg 87% bei unveränderter Kanalmorphologie. Des Weiteren war die Prognose vom Vorliegen einer Parodontitis apicalis abhängig, wobei knapp 90% der Zähne ohne periapikale Läsion erfolgreich revidiert wurden. Im Gegensatz dazu betrug die Erfolgsquote bei periapikaler Radioluzenz nur 62%. Moderne Revisionsmethoden führen nicht nur zu einer Erfolgsrate von 90% nach zwei Jahren, sondern auch zu einer signifikanten Verbesserung der Lebensqualität und der Kaufunktion (He et al. 2017).

2.4 Wurzelkanalfüllmaterialien und -techniken

Eine Wurzelkanalfüllung besteht aus einem volumenstabilen Kernmaterial und einem Versiegler (*sealer*). In der Regel wird als Kernmaterial Guttapercha verwendet, die aus dem Milchsaft des Guttaperchabaumes hergestellt wird und Zinkoxid, Metallsulfate, Wachse, Kunststoffe und Farbpigmente enthält. Der *sealer* soll Inhomogenitäten zwischen der Kanalwand und den Guttaperchastiften ausgleichen sowie Seitenkanäle und kleine Hohlräume verschließen. Bei der Wurzelkanalfüllung sollte so wenig *sealer* wie möglich verwendet werden, da Guttapercha im Vergleich zum *sealer* dimensionsstabil und deutlich biokompatibler ist. Eine weit verbreitete Technik für die Obturation des Wurzelkanalsystems ist die kalte laterale Kompaktion. Bei dieser Methode werden neben einem Hauptstift zusätzliche dünnere

Guttaperchastifte appliziert, wodurch die Menge des *sealers* reduziert wird. Ergänzend zu den sogenannten kalten Fülltechniken existieren auch warme Fülltechniken mit thermoplastischer Guttapercha.

2.4.1 Techniken für die Guttapercha-Entfernung

Guttapercha ist das am häufigsten aus Wurzelkanälen entfernte Füllmaterial (Friedman et al. 1989). Bei der Entfernung dieses Materials spielen vor allem die Erfahrung des Behandlers, die Qualität der Wurzelkanalfüllung und die Anatomie des Endodonts eine entscheidende Rolle. Die Techniken zur Entfernung des Füllmaterials sollten sowohl effizient, zeitsparend als auch sicher in der Anwendung sein. Gleichzeitig sind wirtschaftliche Aspekte, wie zum Beispiel adäquate Kosten, Einflussfaktoren bei der Wahl der geeigneten Revisionsmethode. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte entwickelt die dentale Industrie stets neue Nickel-Titan-Systeme mit modifizierten Eigenschaften (Geometrie, Material, Antrieb etc.). Für die Primärbehandlung wurde bereits eine Vielzahl von Nickel-Titan-Instrumenten (NiTi-Instrumente) hergestellt, um die Wurzelkanalpräparation einfach und schnell zu gestalten. Neue Instrumentendesigns mit nicht-schneidenden Spitzen, veränderte Schneidekanten und Neigungswinkel sowie variierende Konizitäten sollen die Sicherheit und Effektivität dieser Instrumente verbessern beziehungsweise steigern (Taşdemir et al. 2008). Die Konizität (*taper*) bezeichnet die Größenzunahme pro Millimeter Längenzunahme des Arbeitsteils in Millimeter. Mittlerweile stehen auch zahlreiche, speziell für die Revisionsbehandlung entwickelte Ein- oder Mehr-Feilen-NiTi-Systeme zur Verfügung.

Für die Revision können sowohl Handinstrumente aus Edelstahl (Friedman et al. 1990; Schirrmeyer et al. 2006a) als auch rotierend arbeitende NiTi-Instrumente (Hülsmann und Bluhm 2004; Schirrmeyer et al. 2006b; Gergi und Sabbagh 2007; Ünal et al. 2009; Bürklein et al. 2014; Dincer et al. 2015) mit oder ohne Lösungsmittel (Friedman et al. 1990) verwendet werden. Auch die Verwendung von Ultraschall (Ladley et al. 1991) oder erhitzbaren Instrumenten (Wolcott et al. 1999) kann die Entfernung des Füllmaterials erleichtern. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Verwendung von NiTi-Instrumenten für die Entfernung von Guttapercha in einer verkürzten Arbeitszeit resultiert (Hülsmann und Bluhm 2004). Die Rotationsgeschwindigkeit der NiTi-Instrumente verursacht Reibungswärme, welche die Guttapercha schneller plastifiziert und dadurch die Entfernung des Materials erleichtert (Betti und Bramante 2001; Hülsmann und Bluhm 2004). Die Benutzung von NiTi-Instrumenten stellt eine weit verbreitete Methode zur Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials dar, allerdings kann die Verwendung mit prozeduralen Fehlern wie

Instrumentenfrakturen, Perforation und Blockaden assoziiert sein (Schirrmeister et al. 2006a; Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2018).

2.5 Wurzelkanalinstrumente

Manuelle Wurzelkanalinstrumente bestehen in der Regel aus Edelstahl, können aber auch aus Nickel-Titan-Legierungen hergestellt werden. Es gibt drei verschiedene Grundtypen von Instrumenten, nämlich Reamer, Hedström- und K-Feilen in jeweils verschiedenen Größen. Durch die weltweite Einführung der ISO-Normierung für manuelle Wurzelkanalinstrumente (Krammer und Schlepper 1990) wurden Instrumentenmerkmale eindeutig festgelegt. In der ISO 3630-1 befinden sich alle Angaben bezüglich Maße und Toleranzen dieser Instrumente (*International Organization for Standardization 2008*).

Die Größenangaben beziehen sich dabei auf den aktiv schneidenden Bereich (sogenannter Arbeitsteil) eines Instrumentes. Bei konischen Instrumenten nimmt der Durchmesser des Arbeitsteils kontinuierlich von der Instrumentenspitze bis zum Schaftende zu. Die Instrumentenspitze wird bei ISO-normierten Instrumenten als D1 bezeichnet und in 1/100 mm angegeben. Bei einem Instrument der ISO-Größe 10 steigt beispielsweise der Durchmesser bei einer Konizität von 2% jeweils um 0,02 mm pro Millimeter Längenzuwachs. Das heißt die Instrumentenspitze hat einen Durchmesser von 0,10 mm und nach 16 mm (Gesamtlänge des Arbeitsteils) beträgt der Durchmesser am Ende des Arbeitsteils 0,42 mm. NiTi-Instrumente besitzen im Vergleich dazu häufig größere Konizitäten.

Die Eigenschaften der Instrumente, wie zum Beispiel das Frakturverhalten und die Flexibilität, werden sowohl durch das Material, aus dem die Instrumente hergestellt wurden, als auch durch die Geometrie des Instrumentenkerns bestimmt. Dabei gilt bei zunehmenden Kerndurchmesser werden die Instrumente bruchsfester, jedoch auch weniger flexibel. Zudem wird der Spanraum kleiner, sodass das Instrument weniger Dentinspänen aus dem Wurzelkanal herausbefördern kann. Der Instrumentenquerschnitt stellt zudem das Hauptunterscheidungsmerkmal der verschiedenen Grundtypen dar (Hülsmann 2008).

2.5.1 Handinstrumente

Reamer werden durch Verdrillung eines Vier- oder Dreikantstahls mit einer halben bis ganzen Windung pro Millimeter innerhalb des Arbeitsteils gefertigt. Ein steiler Schneidekantenwinkel von 10 - 30° führt dazu, dass die Instrumente mit einer drehenden und leicht schabenden Bewegung (*watch-winding-motion*) verwendet werden, wobei Drittel- bis

Vierteldrehungen empfohlen werden. Reamer gelten als ausreichend bruchsicher und werden zum Erschließen des Wurzelkanals benutzt.

Hedström-Feilen werden aus gefrästen Rundstahl hergestellt. Sie besitzen einen flachen Schneidewinkel von 60 - 65° und weisen dadurch die höchste Scheideleistung aller Handinstrumente aus Edelstahl auf. Aufgrund des geringen Kerndurchmessers sind sie frakturanfälliger als Reamer und K-Feilen. Sie arbeiten am effektivsten ziehend aus dem Wurzelkanal heraus. Die Kanalwand sollte dabei zirkumferent bearbeitet werden.

K-Feilen weisen einen drei- oder viereckigen Querschnitt auf, wobei der Rohling allerdings stärker als ein Reamer verdrillt wird. Sie weisen eineinhalb bis zweieinhalb Windungen pro Millimeter innerhalb des Arbeitsteils auf, woraus ein Schneidekantenwinkel von 25 - 40° resultiert. Der Schneidekantenwinkel bedingt maßgeblich die Effizienz der Arbeitsweise der Instrumente. K-Feilen arbeiten ähnlich wie Reamer mit einer drehend-schabenden Bewegung am effektivsten (Hülsmann 2008).

Handinstrumente werden häufig in Untersuchungen zur Revisionsbehandlung verwendet (Hülsmann und Bluhm 2004; Schirrmeister et al. 2006a; Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Zuolo et al. 2013; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017; Silva et al. 2018). Dabei gelten sie sowohl in geraden (Hülsmann und Bluhm 2004; Gu et al. 2008; Bernardes et al. 2016; Silva et al. 2018) als auch in gekrümmten (Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017) Kanälen als ausreichend bruchsicher und gehen mit wenig prozeduralen Fehlern, wie zum Beispiel Perforationen, einher (Rödiger et al. 2012). Des Weiteren verursachen Handinstrumente einen signifikant geringeren Zahnhartsubstanzverlust als rotierende Instrumente (Rödiger et al. 2012). In der Literatur existieren unterschiedliche Angaben bezüglich der Arbeitszeit. Zum einen arbeiten Handinstrumente effektiv, jedoch beansprucht die Anwendung im Vergleich zu maschinellen Systemen mehr Zeit (Hülsmann und Bluhm 2004; Zuolo et al. 2013). In einer Untersuchung von Schirrmeister et al. (2006a) war die Revision mit Handinstrumenten allerdings signifikant schneller als mit NiTi-Instrumenten. Dies bestätigt auch eine Studie von Ünal et al. (2009), in der nach der Revision mit Handinstrumente im Vergleich zu maschinellen Systemen signifikant weniger Füllmaterial im Wurzelkanal verblieb. Kaşıkçı Bilgi et al. (2017) konnten keinen Unterschied bezüglich der Menge des verbliebenen Füllmaterials innerhalb der Revisionsgruppen (Handinstrumente, R-Endo, Reciproc und ProTaper Universal Reatreatment) feststellen. In der Untersuchung von Bernardes et al. (2016) hinterließen Handinstrumente mehr Füllmaterial im Kanal als maschinelle Systeme. Zudem konnte die Effizienz aller drei experimenteller Gruppen durch eine Ultraschallaktivierung verbessert werden.

2.5.2 ProTaper- und ProTaper Universal Retreatment-Instrumente

Das ProTaper Universal System (Dentsply Sirona, Bensheim) wurde erstmals 2001 auf dem Markt vorgestellt und besteht aus insgesamt acht NiTi-Instrumenten. Zu Beginn der Wurzelkanalpräparation werden die drei *Shaping*-Feilen (SX, S1, S2) in einer progressiven *Crown-Down*-Technik verwendet. Mit Hilfe dieser Technik werden zunächst der koronale Anteil des Wurzelkanals und dann schrittweise weiter apikal liegende Bereiche präpariert. Die fünf *Finishing*-Feilen (F1, F2, F3, F4, F5) dienen ausschließlich der apikalen Präparation. Das Besondere an den Instrumenten ist die progressive Konizität (*progressive taper*) innerhalb einer Feile. Sechs der acht Instrumente weisen mehrere Konizitäten innerhalb des Arbeitsteils auf (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die ProTaper-Instrumente (Dentsply Sirona)

Instrument	Größe	Konizität [%]
SX	19	3,5 - 19
S1	17	2 - 11
S2	20	4 - 11,5
F1	20	7 - 5,5
F2	25	8 - 5,5
F3	30	9 - 5
F4	40	6
F5	50	5

Die Konizität der *Shaping*-Feilen nimmt zum Schaft hin zu, wodurch sie das koronale und mittlere Drittel des Wurzelkanals bearbeiten und den *Finishing*-Feilen einen widerstandslosen Zugang zum apikalen Drittel ermöglichen. Der Durchmesser der Instrumentenspitzen der *Finishing*-Feilen ist innerhalb der ersten 3 mm des Arbeitsteils höher und nimmt zum Schaftende hin ab. Alle Instrumente, mit Ausnahme der Feile S1, besitzen eine Batt-Spitze, das heißt, die Instrumentenspitzen sind nicht aktiv schneidend. Die Feilen verfügen über einen konvexen (SX, S1, S2, F1, F2) oder konkaven (F3, F4, F5) Querschnitt mit einem aktiven Schneidewinkel von 30° (Abbildung 1).

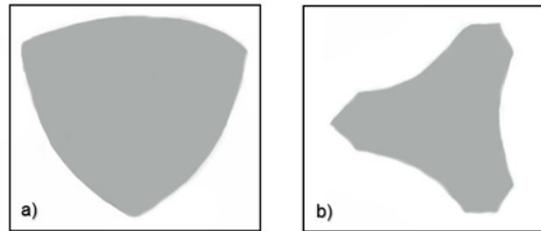


Abbildung 1: Schematischer Querschnitt der ProTaper-Instrumente (a) konvexer und b) konkaver Instrumentenquerschnitt

Aufgrund des dreiseitigen konvexen Querschnittes sind die Stabilität und die Bruchsicherheit erhöht. Allerdings ist die Flexibilität des Instruments im Vergleich zu einer NiTi-Feile mit konkavem Querschnitt deutlich niedriger. Drei scharfe Schneidekanten und eine geringe Kontaktfläche zwischen Instrument und Dentin erhöhen die Effizienz der ProTaper-Instrumente. Die Arbeitslängen sind in 21, 25 und 31 mm erhältlich. Die Abbildung 2a) zeigt die verwendeten ProTaper-Instrumente der vorliegenden Untersuchung.

Das ProTaper Universal Retreatment System (PTUR) besteht aus insgesamt drei Instrumenten, die speziell zur Entfernung von Wurzelkanalfüllmaterial bei der endodontischen Revision entwickelt wurden (Abbildung 2b). Sie werden mit leichtem, nach apikal gerichtetem Druck in einer progressiven *Crown-Down*-Sequenz verwendet. Die Feile D1 (30/.09) wird initial für das koronale Wurzelkanaldrittel verwendet. Sie besitzt eine aktive Schneidespitze, um leichter in das Füllungsmaterial einzudringen. Die Feilen D2 (25/.08) und D3 (20/.07), ohne aktive Instrumentenspitzen, werden für das Entfernen des Füllmaterials aus dem mittleren und apikalen Kanaldrittel verwendet. Durch den massiveren Instrumentenkern ist die Feile D1 steifer und weniger flexibel. Die Arbeitslängen sind 16 mm für das D1-, 18 mm für D2- und 22 mm für D3-Instrument (Gu et al. 2008).

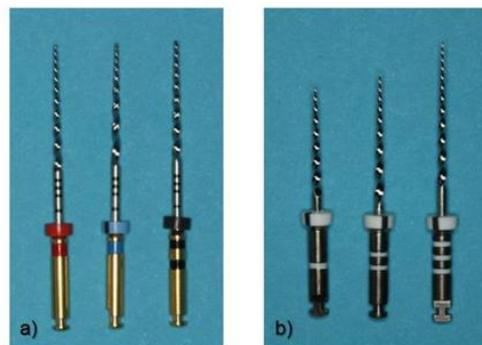


Abbildung 2: Verwendete ProTaper- (a) und ProTaper Universal Retreatment-Instrumente (b)

Das PTUR-System wurde bereits in vielen Studien zur Untersuchung der Effektivität von Revisionsbehandlungen verwendet (Gu et al. 2008; Ünal et al. 2009; Ma et al. 2012; Rödiger et al. 2012; Beasley et al. 2013; Silva et al. 2014; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Bernardes et al. 2016; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017; Jorgensen et al. 2017; Bago et al. 2019). In geraden Wurzelkanälen kann das Wurzelkanalfüllmaterial mit Hilfe des PTUR-Systems effektiv entfernt werden (Gu et al. 2008). Bei der Revision ovaler Wurzelkanäle, die unterschiedlich obturiert wurden, hinterlassen die Instrumente bei warm vertikal kompaktierten Zähnen mehr Füllmaterial im Kanalsystem, als bei der kalt lateral kompaktierten Fülltechnik (Ma et al. 2012). Bei dieser Untersuchung wurden die Ergebnisse mittels Aufnahmen eines Mikro-Computertomografen (Mikro-CT) erhoben. Außerdem kann die Verwendung eines Lösungsmittels dazu beitragen, die Arbeitslänge schneller zu erreichen (Ma et al. 2012).

In einer vergleichbaren Untersuchung von Rödiger et al. (2012) an gekrümmten Wurzelkanälen wurden mit Hilfe von prä- und postoperativer Mikro-CT-Scans das verbliebene Wurzelkanalfüllmaterial und der Abtrag des Dentins während der Revision bestimmt. Das Füllmaterial wurde zwar effektiv entfernt, aber die Verwendung von PTUR führte zu prozeduralen Fehlern, wie zum Beispiel Instrumentenfrakturen und Perforationen. Eine Studie an gekrümmten Wurzelkanälen berichtet ebenfalls von einer hohen Inzidenz an Frakturen und Perforationen (Ünal et al. 2009). Auch Jorgensen et al. (2017) bestätigten in ihrer Studie ein signifikant erhöhtes Auftreten von Instrumentenfrakturen und Deformationen der D3-Feile. Bisher konnte allerdings in keiner Studie eine vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials mit PTUR erzielt werden (Gu et al. 2008; Ünal et al. 2009; Ma et al. 2012; Rödiger et al. 2012; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Bernardes et al. 2016; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017; Jorgensen et al. 2017; Bago et al. 2019).

2.5.3 Reciproc-Instrumente

Das Reciproc-System wurde von Dr. Ghassan Yared entwickelt und im Jahr 2011 in Zusammenarbeit mit VDW auf dem dentalen Markt eingeführt. Im Gegensatz zu rotierenden NiTi-Instrumenten werden die Reciproc-Feilen mit reziproker Arbeitsweise verwendet. Der für den Antrieb der Feilen verwendete Motor bewegt das Instrument zunächst 150° gegen den Uhrzeigersinn. Dann erfolgt eine Umkehr der Drehrichtung für 30° (Kim et al. 2012; Fidler 2014). Eine vollständige Umdrehung von 360° setzt sich demnach aus drei Zyklen zusammen, wobei laut Hersteller 300 Umin⁻¹ stattfinden. Im Gegensatz zu vollrotierenden NiTi-Instrumenten schneiden die Reciproc-Feilen bei der Bewegung gegen den Uhrzeigersinn. Da der Drehwinkel in die schneidende Richtung größer ist als in die

Gegenrichtung (Kim et al. 2012), bewegt sich das Instrument kontinuierlich nach apikal (Bürklein et al. 2012). Sowohl die reziproke Bewegung als auch die Winkeleinstellungen, die unterhalb der Elastizitätsgrenze der Instrumente liegen, reduzieren das Fraktur- und Deformationsrisiko (Kim et al. 2012; Plotino et al. 2015).

Bei den Reciproc-Instrumenten handelt es sich um ein Ein-Feilen-System, d. h. der gesamte Wurzelkanal wird mit nur einem Instrument präpariert. Insgesamt sind drei unterschiedliche Reciproc-Feilen (R25, R40, R50) erhältlich. Die Auswahl des geeigneten Instrumentes richtet sich nach der Größe des Handinstrumentes, welches zur initialen Sondierung ausgewählt wurde. Die Feilen besitzen innerhalb der ersten drei Millimeter des Arbeitsteils eine kontinuierliche Konizität, danach einen regressiven *taper* bis zum Ende des nicht-autoklavierbaren Schafts. Dadurch kann das Instrument nur einmal pro Patient angewendet werden (*single use*).

Die R25-Feile besitzt an der Instrumentenspitze die Größe 25 und eine Konizität von 8% innerhalb der ersten 3 mm. Laut Herstellerangaben ist sie für enge Wurzelkanäle geeignet. Für mittelgroße Kanäle steht die R40-Feile mit der Größe 40 und einer Konizität von 6% innerhalb der ersten apikalen Millimeter zur Verfügung. Weite Kanäle können mit Hilfe des R50-Instrumentes präpariert werden. Dieses Instrument besitzt einen *taper* von 5% innerhalb der ersten 3 mm und entspricht an der Instrumentenspitze der Größe 50. Alle Instrumente sind in den Arbeitslängen 21, 25 und 31 mm erhältlich. Die Abbildung 3 veranschaulicht die verwendeten Reciproc-Instrumente der vorliegenden Studie.



Abbildung 3: Verwendete Reciproc-Instrumente (R25 links und R40 rechts)

Die Reciproc-Feilen sind aus der sogenannten M-Wire Nickel-Titan-Legierung gefertigt und besitzen einen S-förmigen Instrumentenquerschnitt (Abbildung 4).

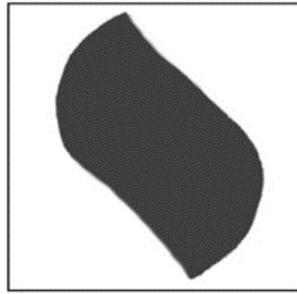


Abbildung 4: S-förmiger Querschnitt eines Reciproc-Instrumentes

Im Vergleich zu konventionellen NiTi-Instrumenten weisen sie dadurch verbesserte mechanische Eigenschaften auf. Sie sind gegenüber zyklischer Ermüdung um annähernd 150% frakturresistenter (Gao et al. 2010; Ye und Gao 2012; Dagna et al. 2014) und flexibler (Shen et al. 2013).

Die M-Wire Nickel-Titan-Legierung besteht aus drei mikrostrukturellen Phasen (Austenit, Martensit und R-Phase) (Alapati et al. 2009; Ye und Gao 2012). Die Herstellung erfolgt durch einen besonderen thermo-mechanischen Prozess (Bürklein et al. 2012). Die verbesserten mechanischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die erhöhte Verschleißfestigkeit und Widerstandskraft der aus M-Wire Nickel-Titan gefertigten Instrumente, lassen sich vor allem auf die Martensit-Phase zurückführen (Ye und Gao 2012). M-Wire-Instrumente sind aufgrund dieser Martensit-Phase verdrillbar und besitzen somit gegenüber aus einem Rohling gefrästen Instrumenten eine signifikant erhöhte Frakturfestigkeit (Gambarini et al. 2008; Al-Hadlaq et al. 2010; Kim et al. 2010; Castelló-Escrivá et al. 2012). Der geringe Kerndurchmesser trägt zusätzlich zur M-Wire NiTi-Legierung zur hohen Flexibilität der Reciproc-Instrumente bei. Sie verfügen über scharfe Schneidekanten und einen großen Spannraum für einen guten Abtransport der Dentinspänen. Obwohl die Instrumentenspitzen nicht schneidend sind, besitzen die Reciproc-Feilen aufgrund ihrer Instrumentengeometrie eine hohe Schneideeffizienz (Plotino et al. 2014). Die Feilen werden langsam, unter leichtem Druck nach apikal, in bürstenden Bewegungen gegen die Kanalwand, mit einer maximalen Auf- und Abwärtsbewegung von 3 mm verwendet.

Reciproc-Instrumente stellen primär kein Revisionssystem dar, wurden aber bereits in einigen Studien zur Revisionsbehandlung verwendet (Zuolo et al. 2013; Fruchi et al. 2014; Rios et al. 2014; Silva et al. 2014; Çanakçı et al. 2016; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Bernardes et al. 2016; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017; Martins et al. 2017; Bago et al. 2019; Silva et al. 2018).

Hinsichtlich der Effektivität bei Revisionen existieren unterschiedliche Angaben in der Literatur. Während in einigen Studien keine Unterschiede zwischen reziproker und vollrotierender Arbeitsweise in geraden Kanälen festgestellt wurden (Rios et al. 2014; Bernardes et al. 2016), wurden in anderen Untersuchungen Reciproc-Instrumente im Vergleich zu konventionell rotierenden oder Handinstrumenten als effektiver bewertet (Bago et al. 2019; Silva et al. 2018). In einer aktuellen Untersuchung verglichen Bago et al. (2019) ein vollrotierendes System (PTUR) mit zwei reziprok arbeitenden Systemen (Reciproc und Reciproc Blue). Die Autoren stellten fest, dass Reciproc in geraden, ovalen Kanälen signifikant mehr Wurzelkanalfüllmaterial entfernte als die beiden anderen Systeme. Ein weiterer Vergleich von Handinstrumenten, reziproken (Reciproc) und vollrotierenden NiTi-Instrumenten (Mtwo) in geraden Wurzelkanälen zeigte, dass Füllmaterial unabhängig vom verwendeten Instrument im Kanal verbleibt (Zuolo et al. 2013). Allerdings war die Revision mittels Reciproc die schnellste Revisionstechnik (Zuolo et al. 2013). Reciproc-Instrumente sind ebenfalls in der Lage, das Wurzelkanalfüllmaterial aus gekrümmten Wurzelkanälen zu entfernen (Fruchi et al. 2014; Çanakçı et al. 2016; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017). Zum Teil auch signifikant schneller (Çanakçı et al. 2016). Jedoch wurde in dieser Untersuchung bei der Verwendung von Reciproc signifikant mehr Debris extrudiert im Vergleich zu vollrotierenden Instrumenten (Çanakçı et al. 2016). Kaşıkçı Bilgi et al. (2017) stellten ebenfalls eine erhöhte apikale Extrusion von Debris im Vergleich zu Handinstrumenten fest. Im Gegensatz dazu ermittelten Silva et al. (2014) bei geraden Wurzelkanälen eine signifikant geringere Menge Debris im Vergleich zu konventionell rotierenden Systemen.

2.6 Mikro-Computertomografie

Die Mikro-Computertomografie ist ein nicht invasives bzw. nicht destruktives, dreidimensionales Bildgebungsverfahren. Hierfür werden aus verschiedenen Winkeln aufgenommene Röntgenaufnahmen eines Objektes mit Hilfe eines Computers zu Schnittbildern zusammengefügt. Aus dem zweidimensionalen Rohdatensatz werden mit einer entsprechenden Software überlagerungsfreie, dreidimensionale Rekonstruktionen der gescannten Objekte erzeugt. Die Rekonstruktionen erfolgen meist in Anlehnung an den von Feldkamp entwickelten Algorithmus (Feldkamp et al. 1984; Grass et al. 1999).

Die Mikro-CT nutzt nahezu dieselben technischen und physikalischen Grundlagen, die auch bei der Computertomografie (CT) verwendet werden, wobei allerdings zur klinischen CT einige Unterschiede bestehen. Im Gegensatz zu klinischen CT-Geräten rotiert beim Mikro-CT das Objekt um die eigene Achse, während die Röhren-Detektor-Kombination ortsfest

ist. Ein Mikro-Computertomograf besteht im Wesentlichen aus einer Haupteinheit, einer Konsole und einer Kontrollbox (Abbildung 5).

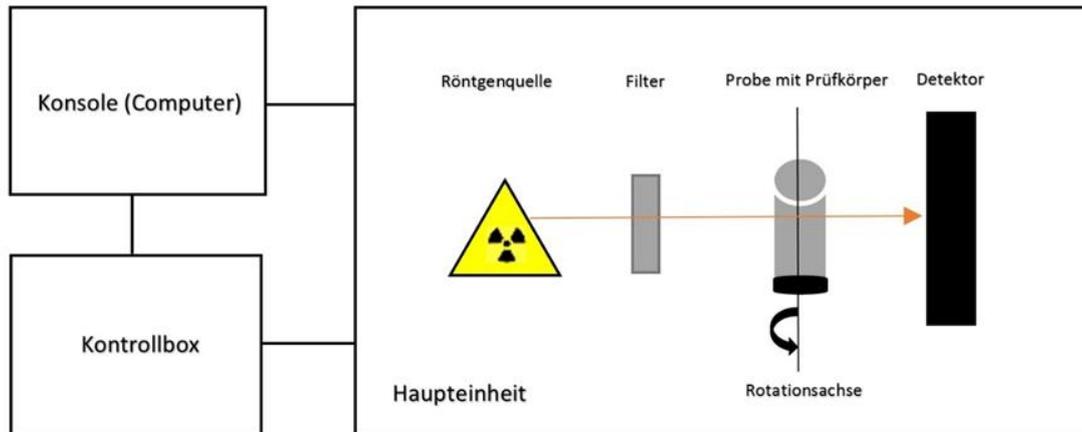


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Mikro-Computertomografen

In der Haupteinheit befindet sich das sogenannte *gantry* (Ringtunnel), welches die Röntgenquelle und den Detektor beherbergt. Die dort befindliche Röntgenröhre emittiert die Röntgenstrahlung durch einen Filter auf das zu scannende Objekt. Durch die Wahl des Filters, z. B. Aluminium- oder Kupferfilter unterschiedlicher Dicke, kann das energetische Spektrum der Strahlung bestimmt werden. Der während des Scanvorgangs um die eigene Achse rotierende Objektträger fixiert die Probe und hält sie in Position, um Bewegungsartefakte auszuschließen (Abbildung 6).

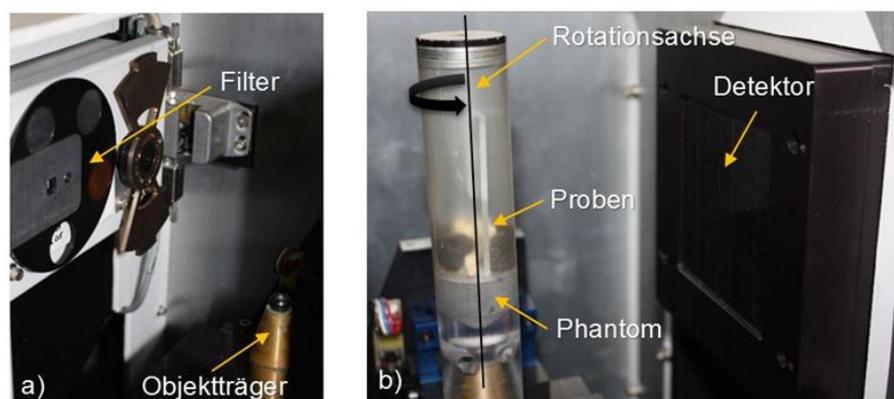


Abbildung 6: a) Filter und Objektträger und b) Objekt und Detektor

Der angelegte Strom reguliert die Intensität der Röntgenstrahlung und die Spannung bestimmt die Verteilung und den Höchstwert des Energiespektrums. Des Weiteren befinden sich in der Haupteinheit ein Detektor und eine Blende. Der Szintillator und die *Charge-Coupled Device* (CCD) Kamera des Detektors sind über eine Fiberoptik miteinander verbunden. Die dort eintreffende Röntgenstrahlung wird durch Szintillation in ein optisches Signal umgewandelt und von der Kamera erfasst. Die Projektionen werden anschließend digital gespeichert.

Die Konsole besteht aus einem Computer, mit dessen Hilfe alle Einstellungsparameter und der Scan-Prozess ausgewählt und überwacht werden können. Des Weiteren werden die Rekonstruktionen der gescannten Objekte an diesem PC durchgeführt. Mit Hilfe der Kontrollbox erfolgt die Steuerung des Gerätes: Ein- und Ausschaltung der Röntgenstrahlung, Stromzufuhr sowie Einstellungen für die Spannung, den Detektor, den Objektträger und die Blende.

Die Mikro-CT wird hauptsächlich in experimentellen Gebieten eingesetzt und für wissenschaftliche Fragestellungen herangezogen. Ein großer Vorteil ist die höhere Ortsauflösung der resultierenden Schnittbilder. Moderne CT-Geräte können eine Ortsauflösung von ca. 0,3 mm erzielen, diese liegt bei der Mikro-CT typischer Weise abhängig von der Fragestellung im Bereich von 1 - 200 μm (Kalender 2006; Burghardt et al. 2011). Die Firma Bruker gibt in ihrer Produktinformation für ihren Hochauflösungs-Mikro-Computertomografen (SkyScan1272) Werte von $< 0,35 \mu\text{m}$ an (Bruker microCT 2013). Mit Hilfe der Nanocomputertomografie wird ein räumliches Auflösungsvermögen sogar von bis zu 400 nm ermöglicht (Kampschulte et al. 2016).

Die bereits im Jahr 1972 verwendeten CT-Geräte konnten erstmals unterschiedliche Gewebearten anhand ihrer Schwächung für Röntgenstrahlen in Form von Grauwerten darstellen. Diese Werte werden in CT-Zahlen umgerechnet und auf der sogenannten *Hounsfield*-Skala wiedergegeben. Diese Umrechnung muss erfolgen, da das Spektrum der Röntgenstrahlung aufgrund der verwendeten Röhrenspannung, Filter und Einstellungsparameter variieren kann. Die CT-Zahl wird in *Hounsfield*-Einheiten (HE) oder *hounsfield units* (HU) angegeben. Jeder Wert kann auf diese Weise einer bestimmten Gewebeart zugeordnet werden. So hat beispielsweise Wasser eine CT-Zahl von 0 HE, Luft werden -1000 HE zugeordnet und Knochen kann abhängig von der Dichte Werte zwischen 500 bis 3000 HE annehmen. Die Kalibrierung der Skala erfolgt durch die Zuordnung der Strahlungsschwächungswerte von Wasser und Luft oder durch Stoffäquivalente (physikalischer Prüfkörper mit örtlich konstanter Zusammensetzung, sogenanntes Phantom), sodass einzelne Scans bzw. Bilder

miteinander verglichen werden können. Das menschliche Auge ist allerdings nicht in der Lage, die 4096 vom Gerät differenzierbaren Graustufen voneinander zu unterscheiden. Deshalb wird nur ein bestimmter Teil der Hounsfield-Skala eingeblendet. Der entsprechende Bereich des Bildes kann mit Hilfe der sogenannten „Fensterung“ frei gewählt werden. Anhand der Fragestellung werden die Position des Zentrums auf der Hounsfield-Skala und die Fensterbreite (CT-Zahlen-Bereich) ausgewählt, sodass in einer Aufnahme unterschiedliche anatomische Strukturen anhand ihrer Grauwerte begutachtet werden können (Kalender 2006).

Die deutlich höhere Ortsauflösung der Mikro-CT impliziert auch ein verändertes Design der Geräte und der verwendeten Strahlungsquelle. Es werden entweder Synchrotronstrahlungsquellen mit Parallelstrahlgeometrie oder Mikro- bzw. Feinfokusröhren mit Transmissions- oder Reflektionsanoden mit Fächer- bzw. Kegelstrahlgeometrie verwendet. Als Detektor wird ein Zeilen-, Flächen- oder Flachbilddetektor genutzt. Aufgrund der geringeren Fokusgröße und der damit verbundenen niedrigeren Röhrenleistung ist die Probengröße begrenzt (Engelke et al. 1999; Kalender 2006). Bei einer Auflösung von beispielsweise 10 µm beträgt die maximale Größe der Probe 1 cm. Die hierfür notwendigen Scanzeiten liegen im Bereich von Minuten bis Stunden (Engelke et al. 1999). Neben der Reduzierung der Fokusgröße hat auch die Größe des zu generierenden Volumendatensatzes einen Einfluss auf die zu messende Probengröße.

Mit Hilfe der Mikro-CT werden in vielen dentalen Forschungsgebieten quantitative und qualitative Aussagen getroffen (Swain und Xue 2009). Im Bereich der Endodontie gibt es verschiedene Anwendungsbereiche. Die wissenschaftlichen Fragestellungen betreffen unter anderem die Begutachtung morphologischer Besonderheiten, wie zum Beispiel C-förmige Kanäle (Amoroso-Silva et al. 2015), die Qualität verschiedener Wurzelkanalfüllsysteme (Başer Can et al. 2017), die Bewertung akzessorischer Kanäle im apikalen Bereich (Xu et al. 2016) und die Qualität der Wurzelkanalpräparation mit unterschiedlichen Instrumenten in gekrümmten Kanälen (Gagliardi et al. 2015).

In der Literatur liegen bereits einige Studien vor, die zur Beurteilung der Revisionsbehandlung ein Mikro-CT nutzten (Hammad et al. 2008; Roggendorf et al. 2010; Ma et al. 2012; Solomonov et al. 2012; Rechenberg und Paqué 2013; Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Bernardes et al. 2016; Martins et al. 2017; Rödiger et al. 2018; Bago et al. 2019; Silva et al. 2018). Hammad et al. (2008) verglichen ProTaper-Revisionsfeilen mit Handinstrumenten (K-Feilen) bezüglich ihrer Effektivität bei der Revisionsbehandlung. Anhand von prä- und postoperativen Scans mit Hilfe eines Mikro-CT

wurde das Volumen des verbliebenen Füllmaterials bestimmt. Die unterschiedlichen Wurzelkanalfüllmaterialien konnten weder mit Handinstrumenten noch maschinell vollständig entfernt werden. Allerdings waren die K-Feilen effizienter als PTUR.

Roggendorf et al. (2010) nutzten ein Mikro-CT, um die Effizienz von NiTi-Instrumenten bei der Entfernung von unterschiedlichen Wurzelkanalfüllmaterialien zu bewerten. Dabei wurde festgestellt, dass die meisten Reste an Wurzelkanalfüllmaterial, v. a. *sealer* im apikalen Drittel verbleiben. Eine Präparation um zwei weitere Größen als die initiale Präparationsgröße reduziert diese Reste signifikant. Mehrere Mikro-CT-Studien zeigten, dass keine der untersuchten Revisionstechniken in der Lage war, das Wurzelkanalfüllmaterial vollständig aus geraden, ovalen und gekrümmten Kanälen zu entfernen (Roggendorf et al. 2010; Solomonov et al. 2012; Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Bernardes et al. 2016; Martins et al. 2017; Bago et al. 2019; Silva et al. 2018). In zwei zu der vorliegenden Arbeit vergleichbaren Studien wurde mit Hilfe der Mikro-CT die Effektivität manueller und rotierender Instrumente für die Revision von Wurzelkanalfüllungen aus gekrümmten Wurzelkanälen sowie erstmalig der Dentinabtrag quantifiziert (Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014). Die maschinelle Revision führte in der ersten Studie zwar teilweise zu einer effektiveren Entfernung von Füllmaterial, ging aber auch mit einem höheren Dentinabtrag sowie mehr prozeduralen Fehlern einher (Rödiger et al. 2012). In der zweiten Untersuchung schnitten die Handinstrumente bezüglich der Menge an verbliebenem Füllmaterial signifikant besser ab, wobei der Dentinabtrag bei manueller und maschineller Revision jedoch vergleichbar war (Rödiger et al. 2014).

In einer aktuellen Untersuchung dieser Arbeitsgruppe wurde der Dentinabtrag nach Revision mit PTUR und ProTaper Next mit Hilfe von Mikro-CT-Aufnahmen quantifiziert (Rödiger et al. 2018). Hinsichtlich des Zahnhartsubstanzverlustes und des verbliebenen Füllmaterials wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen trägerbasiertem und warm vertikal kompaktiertem Füllungsmaterial festgestellt (Rödiger et al. 2018).

3 Ziel dieser Studie

Das Ziel dieser Ex-vivo-Studie war die Bestimmung der Effektivität und Sicherheit von rotierend und reziprok arbeitenden NiTi-Systemen und Handinstrumenten für die endodontische Revisionsbehandlung in gekrümmten Wurzelkanälen.

Dabei wurden Reciproc (VDW, München), ProTaper- und ProTaper Universal Retreatment-Instrumente (Dentsply Sirona) und Hedström-Feilen (VDW) miteinander verglichen. Es erfolgte die Berechnung des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials und des während der Revision entfernten Dentins anhand prä- und postoperativer Mikro-CT-Aufnahmen sowie die Bestimmung der Arbeitszeit zum Erreichen der Arbeitslänge bzw. bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials. Außerdem wurden die Extrusion apikalen Debris und das Auftreten von Zwischenfällen (Instrumentenfrakturen, Perforationen, Blockaden) notiert.

4 Material und Methode

4.1 Zahnauswahl

Insgesamt wurden für diese Studie 109 menschliche extrahierte Ober- und Unterkiefer-Molaren mit deutlichen Wurzelkrümmungen gesammelt. Eine endodontische Vorbehandlung, Wurzelkaries, Sprünge oder Frakturen der Wurzeln, nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum oder Wurzelresorptionen führten zum Ausschluss der Zähne. Nach dieser Vorauswahl wurden Gewebereste, Konkrement, Füllungen, Zahnstein und Karies entfernt und die Zähne mit einem Permanentmarker nummeriert. Die primären Zugangskavitäten wurden unter Wasserkühlung mit einem hochoberflächigen Winkelstück (Sirona, Bensheim) und einem diamantierten Schleifkörper (Gebr. Brasseler, Lemgo) angelegt. Es erfolgte die Darstellung der Kanaleingänge mit Hilfe eines Gates-Glidden-Bohrers der Größe 3 (VDW, München) und die initiale Instrumentierung der Kanäle mit einem Reamer der ISO-Größe 10 (VDW) zur Überprüfung der apikalen Gängigkeit. Wurzeln mit sicht- oder tastbaren Isthmen sowie obliterierte Kanäle wurden von dieser Studie ausgeschlossen. Um Überlagerungen bei der röntgenologischen Analyse zu vermeiden, wurden die Unterkiefer-Molaren in der Bifurkation getrennt. Bei den Oberkiefer-Molaren wurden die palatinale und die mesio-bukkale Wurzel von der disto-bukkale Wurzel separiert. Im Anschluss erfolgten digitale Röntgenaufnahmen (Trophy Elitys, Croissy-Beaubourg, Frankreich) in zwei unterschiedlichen Projektionsrichtungen (mesio-distal und bukkolingual) mit einem röntgenopakem Prüfzylinder links im Bild und einem in die Kanäle eingebrachten Handinstrument der ISO-Größe 15. In die mesialen Wurzelkanäle der Unterkiefer-Molaren wurden zwei unterschiedliche Handinstrumente inseriert, wobei für die mesiolingualen Kanäle immer ein Reamer verwendet wurde. Es wurden folgende Einstellungsparameter des Röntgengerätes gewählt: Strom 4 mA, Spannung 70 kV, Belichtungszeit 0,05 s. Die Röntgenaufnahmen wurden in einer standardisierten Weise angefertigt, wobei ein konstanter Abstand von 20 cm zwischen Röntgenröhre und Probe gewählt und die Proben direkt auf dem digitalen Sensor mit Wachs fixiert wurden. Die Röntgenbilder wurden mit Hilfe der Merlin Software (Version 2.1, medical digital concepts, Duisburg) betrachtet. Zähne mit internen Resorptionen, ampullenförmigen Kanälen oder S-förmigen Wurzelkanalkrümmungen wurden ebenfalls von dieser Studie ausgeschlossen. Für die Analyse der Röntgenbilder wurde die Software ImageJ (Version 1.43u, National Institutes of Health, Washington, DC, USA) verwendet. Es erfolgte die Bestimmung der Krümmungswinkel nach Schneider (1971) und der Krümmungsradien nach Schäfer et al. (2002) in beiden röntgenologischen Ebenen durch

zwei kalibrierte Untersucher. Diese Werte wurden in einer Excel-Tabelle notiert, und es wurden Mittelwerte berechnet, sodass für jede einzelne Wurzel jeweils zwei Krümmungswinkel und zwei Krümmungsradien vorlagen. Bei jeder Röntgenaufnahme wurde ein zuvor vermessener, röntgenopaker Prüfzylinder mit einer Länge von 7 mm abgebildet. Um den exakten Abbildungsmaßstab festzulegen, wurde der Prüfzylinder bei jeder Analyse vermessen und bei der Bestimmung der Werte von Winkel und Radius berücksichtigt. Im Anschluss erfolgte in jedem Röntgenbild die Festlegung dreier Referenzpunkte (A, B, C). Punkt A markiert dabei den Kanaleingang, Punkt B entspricht dem Beginn der Krümmung und Punkt C stellt den röntgenlogischen Apex dar. Somit befindet sich der gerade Anteil des Wurzelkanales zwischen den Punkten A und B und der gekrümmte Kanalabschnitt zwischen den Punkten B und C (Abbildung 7).

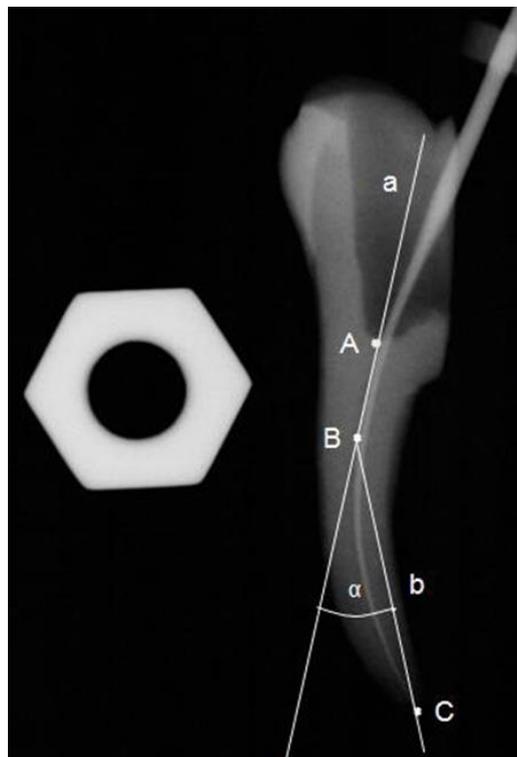


Abbildung 7: Festlegung der drei Referenzpunkte A, B und C und Bestimmung des Krümmungswinkels nach Schneider (1971)

Die Krümmungswinkel der Wurzeln wurden nach der Methode von Schneider (1971) bestimmt. Dazu wurde der Winkel α zwischen der Linie a, gebildet durch die Punkte A und B, und der Linie b, gebildet durch die Punkte B und C, gemessen. Jeder Punkt enthielt dabei eine X- und Y-Koordinate, die durch die ImageJ Software angegeben und in eine Excel-Tabelle

übertragen wurde. Punkt A = (X1 und Y1), Punkt B = (X2 und Y2) und Punkt C = (X3 und Y3). Der Krümmungswinkel wurde anschließend durch folgende Formel ermittelt:

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

(Hausdörfer 2012).

Zur Bestimmung der Krümmungsradien wurde die Methode nach Schäfer et al. (2002) verwendet (Abbildung 8). Die Verbindungslinie S zwischen den Punkten B und C definiert dabei den Krümmungsradius. Sie ist die Kreissehne eines hypothetischen Kreises. Der gekrümmte Anteil zwischen diesen Punkten ist das Bogenmaß des hypothetischen Kreises mit einem spezifischen Radius r. Dieser Radius kann durch die Verbindungslinie S bestimmt werden. Mit Hilfe einer Tangente a am hypothetischen Kreis im Punkt B, der Winkelsätze eines rechtwinkligen Dreiecks und auf der Basis der Geometrie eines gleichschenkligen Dreiecks, lässt sich folgende Formel $r = \frac{S}{2 \sin \alpha}$ für den Kreisradius und somit für den Krümmungsradius ableiten. Folgende Formel wurde in Excel dazu verwendet:

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

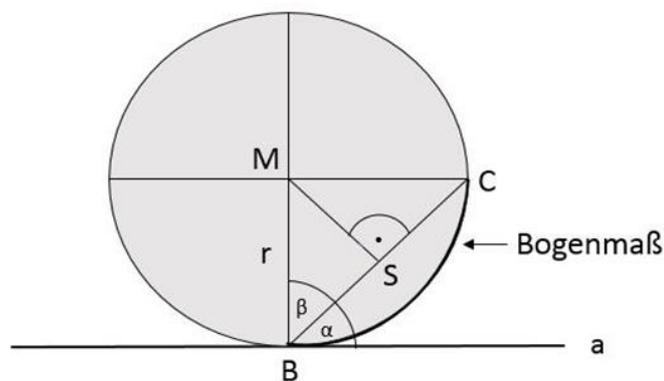


Abbildung 8: Bestimmung des Krümmungsradius modifiziert nach Schäfer et al. (2002)
(M, r = Mittelpunkt und Radius des Kreises)

Als Einschlusskriterien galten ein Krümmungswinkel zwischen 20° und 40° und ein Krümmungsradius zwischen 3 und 12 mm in mindestens einer röntgenologischen Ebene. Die Winkel und Radien, die als Einschlusskriterium für diese Studie verwendet wurden, wurden als Winkel 1 und als Radius 1 definiert. Die korrespondierenden Winkel und Radien wurden als Winkel 2 und Radius 2 definiert. Abschließend entsprachen 65 Proben diesen Kriterien. Bis zur Wurzelkanalpräparation wurden die Zähne in Leitungswasser gelagert.

4.2 Wurzelkanalpräparation

Bei allen Proben wurde ein Teil der Zahnkrone mittels eines diamantierten Schleifkörpers (Gebr. Brasseler) unter Wasserkühlung abgetrennt, um ein koronales Plateau zu schaffen. Dieses Vorgehen ermöglichte die Festlegung eines reproduzierbaren Referenzpunktes, so dass für alle Wurzelkanäle eine standardisierte Wurzellänge von 18 mm resultierte. Die Arbeitslänge (AL) wurde anschließend auf 17 mm festgelegt. Die Präparation der Wurzelkanäle erfolgte nach einem standardisierten Präparationsprotokoll (Tabelle 2).

Im koronalen Wurzel Drittel wurden zunächst Gates-Glidden-Bohrer der Größe 3 und 2 (VDW) verwendet, während die weitere Präparation mit Hilfe von FlexMaster-Nickel-Titan-Instrumenten (VDW) in *Crown-Down*-Technik erfolgte. Dabei wurde eine standardisierte Präparationssequenz mit den folgenden Größen durchgeführt: 30/.06, 25/.06, 20/.06, 30/.04, 25/.04, 20/.04, 20/.02. Die apikale Erweiterung erfolgte mit den Größen 25/.02 und 30/.02. Alle FlexMaster-Instrumente wurden mit dem Endo IT professional Motor (VDW) mit 280 Umin⁻¹ betrieben.

Tabelle 2: Arbeitsschritte der standardisierten Wurzelkanalpräparation mit Gates-Glidden-Bohrern und FlexMaster-Instrumenten (AL = Arbeitslänge)

Instrument	Umdrehungszahl	Insertionstiefe
Gates-Glidden-Bohrer Größe 3	4000 Umin ⁻¹	AL - 12 mm
Gates-Glidden-Bohrer Größe 2	4000 Umin ⁻¹	AL - 10 mm
FlexMaster 30/.06	280 Umin ⁻¹	AL - 8 mm
FlexMaster 25/.06	280 Umin ⁻¹	AL - 6 mm
FlexMaster 20/.06	280 Umin ⁻¹	AL - 4 mm
FlexMaster 30/.04	280 Umin ⁻¹	AL - 2 mm
FlexMaster 25/.04	280 Umin ⁻¹	AL
FlexMaster 20/.04	280 Umin ⁻¹	AL
FlexMaster 20/.02	280 Umin ⁻¹	AL
FlexMaster 25/.02	280 Umin ⁻¹	AL
FlexMaster 30/.02	280 Umin ⁻¹	AL

Bei jedem Instrumentenwechsel erfolgte eine manuelle Wurzelkanalspülung mit 2 ml 1%iger Natriumhypochlorit-Lösung (NaOCl) (Hedinger, Stuttgart) und eine Rekapitulation der AL mit einem Reamer der ISO-Größe 10 (VDW). Die Applikation der Spülflüssigkeit wurde mit einer 5-ml-Spritze und einer Spülkanüle (NaviTip, Ultradent, South Jordan, UT, USA) mit einem Außendurchmesser von 0,30 mm durchgeführt. Nach Abschluss der Präparation wurde mit 5 ml 20%iger Ethylendiamintetraacetat-Lösung (EDTA) (Lege artis Pharma GmbH & Co. KG, Dettenhausen) und mit 5 ml 1%igem NaOCl (Hedinger) gespült, wobei die Spülkanüle auf eine Arbeitslänge minus 1-2 mm in den Kanal eingeführt wurde. Abschließend wurden alle Wurzelkanäle mit Papierspitzen der ISO-Größe 30 getrocknet.

4.3 Wurzelkanalfüllung

Die Wurzelkanalfüllung erfolgte mittels kalter lateraler Kompaktion von Guttapercha und *sealer*. Aufgrund der Fertigungstoleranz des Herstellers wurden hierzu Guttaperchastifte der ISO-Größe 25 bis 35 (VDW) als Masterpoints ausgewählt, mit weiteren akzessorischen Stiften der ISO-Größe 15 und einem *sealer* auf Epoxid-Aminharz Basis (2Seal, VDW) verdichtet. Der Masterpoint wurde zunächst mit apikaler Friktion im Wurzelkanal angepasst, dünn mit *sealer* bestrichen und auf Arbeitslänge eingebracht. Der Masterpoint und die akzessorischen Guttaperchastifte wurden mit einem vorgebogenen Fingerspreader der ISO-Größe 20 (VDW) lateral verdichtet. Die Obturation wurde beendet, wenn sich der Spreader nur noch weniger als 5 mm in die Wurzelkanalfüllung einbringen ließ. Anschließend wurde die Guttapercha mit einem erhitzten Plugger auf einer standardisierten Länge von 10 mm \pm 1 mm abgetrennt und verdichtet. Abschließend wurde die Qualität der Obturation mit digitalen Röntgenaufnahmen in mesio-distaler und bucco-lingualer Projektionsrichtung im Hinblick auf folgende Kriterien überprüft:

- Homogene Wurzelkanalfüllung in beiden röntgenologischen Ebenen
- Wurzelkanalfüllung 0 - 2 mm vor dem röntgenologischen Apex

Inakzeptable Wurzelkanalfüllungen wurden umgehend revidiert und nach Säuberung der Wurzelkanäle erneut gefüllt.

Die Zugangskavitäten wurden provisorisch mit einem kleinen Watterpellet und Cavit (3M ESPE, Seefeld) verschlossen. Um eine vollständige Aushärtung des *sealers* zu gewährleisten, wurden alle Proben für 14 d bei 37 °C und 100%iger Luftfeuchtigkeit gelagert. Danach folgte eine zusätzliche dreimonatige Lagerung unter denselben Bedingungen, um eine künstliche Alterung der Wurzelkanalfüllung zu imitieren.

Im Anschluss wurden alle Proben mit Hilfe eines Mikro-Computertomografen (eXplore Locus SP, General Electric Medical Systems, Toronto, Ontario, Kanada) eingescannt und die präoperativen Volumina des Dentins und der Wurzelkanalfüllungen in mm^3 von zwei kalibrierten Untersuchern ermittelt und zu Mittelwerten zusammengefasst.

4.4 Gruppeneinteilung

Abschließend standen sechzig Proben zur Verfügung, die entsprechend der Mittelwerte für Wurzelkanalkrümmungen und -radien in zwei Ebenen sowie des präoperativen Volumens der Wurzelkanalfüllung in drei homogene Gruppen mit jeweils 20 Zähnen eingeteilt wurden.

Die Winkel aller Gruppen betragen im Mittel für Winkel 1 $25,5^\circ$ und im Mittel für Winkel 2 $12,4^\circ$. Der mittlere Radius 1 aller Revisionsgruppen betrug $8,0 \text{ mm}$ und der korrespondierende Radius 2 im Mittel $20,7 \text{ mm}$. Die experimentellen Gruppen wiesen ein mittleres Volumen des Wurzelkanalfüllmaterials vor der Revision von $4,7 \text{ mm}^3$ auf. Die Gruppeneinteilung anhand der Mittelwerte der genannten fünf Parameter und die Signifikanzen sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Mittelwerte wurden mit Hilfe der ANOVA-Varianzanalyse ($p < 0,05$) überprüft. Des Weiteren wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet, um die homogene Verteilung der Zähne auf die Gruppen zu untersuchen. Die Gruppen unterschieden sich hinsichtlich dieser fünf Parameter statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$) voneinander.

Tabelle 3: Übersicht über die Mittelwerte (*mean*), Standardabweichungen (SD) und Signifikanzen der fünf präoperativen Parameter für die drei experimentellen Gruppen (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/Pro Taper, RP = Reciproc)

	Winkel 1 ($^\circ$) (<i>mean</i> \pm SD)	Radius 1 (mm) (<i>mean</i> \pm SD)	Vol. WKF (mm^3) (<i>mean</i> \pm SD)	Winkel 2 ($^\circ$) (<i>mean</i> \pm SD)	Radius 2 (mm) (<i>mean</i> \pm SD)
Gruppe 1 (HF)	$25,6 \pm 4,8$	$8,1 \pm 2,2$	$4,8 \pm 2,1$	$12,7 \pm 7,3$	$21,6 \pm 19,8$
Gruppe 2 (PTUR)	$25,4 \pm 3,9$	$8,1 \pm 1,6$	$4,6 \pm 1,6$	$12,5 \pm 6,1$	$20,7 \pm 13,3$
Gruppe 3 (RP)	$25,4 \pm 4,0$	$7,9 \pm 1,5$	$4,8 \pm 2,1$	$12,1 \pm 5,7$	$19,7 \pm 13,5$
Mittelwert	25,5	8,0	4,7	12,4	20,7
p-Wert	$p = 0,9995$	$p = 0,9303$	$p = 0,9989$	$p = 0,9852$	$p = 0,9891$

4.5 Revision

Die Zuordnung der drei Gruppen ($n = 20$) zu den unterschiedlichen Revisionstechniken erfolgte per Los. Daraus ergab sich folgende Aufteilung:

- Gruppe 1 (HF): Gates-Glidden-Bohrer (VDW) und Hedström-Feilen (VDW)
- Gruppe 2 (PTUR): ProTaper Universal Retreatment und ProTaper-Instrumente (Dentsply Sirona)
- Gruppe 3 (RP): Gates-Glidden-Bohrer (VDW) und Reciproc (VDW)

In Gruppe 1 wurden das Wurzelkanalfüllmaterials initial mit Gates-Glidden-Bohrer der Größen 3 und 2 (VDW) bei einer konstanten Umdrehungszahl von 4000 Umin^{-1} entfernt. Die weitere Revision erfolgte mit Hedström-Feilen der ISO-Größen 30, 25 und 20 (VDW) mittels *Crown-Down*-Technik bis zum Erreichen der Arbeitslänge. Die apikale Erweiterung wurde mit vorgebogenen Hedström-Feilen in aufsteigender Größe bis ISO-Größe 40 durchgeführt. Die Instrumente wurden dabei zirkumferent mit leichtem Anpressdruck an die Kanalwand verwendet. Tabelle 4 gibt das Präparationsprotokoll wieder.

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Instrumente für die Revision der Gruppe 1 mit Gates-Glidden-Bohrer und Hedström-Feilen (AL = Arbeitslänge)

Instrument	Größe	Insertionstiefe
Gates-Glidden-Bohrer	3	AL - 8 mm
Gates-Glidden-Bohrer	2	AL - 6 mm
Hedström-Feile	30/.02	Ggf. AL
Hedström-Feile	25/.02	Ggf. AL
Hedström-Feile	20/.02	AL
Hedström-Feile	25/.02	AL
Hedström-Feile	30/.02	AL
Hedström-Feile	35/.02	AL
Hedström-Feile	40/.02	AL

Die ProTaper Universal Retreatment und ProTaper-Instrumente (Dentsply Sirona) wurden entsprechend den Herstellerangaben für die Revision der Wurzelkanalfüllung in Gruppe 2 benutzt. Das Füllungsmaterial wurde unter leichtem, nach apikal gerichtetem Druck in einer progressiven *Crown-Down*-Sequenz entfernt. Die Feile D1 (30/.09) wurde zur Entfernung des koronalen Füllmaterials, die Feile D2 (25/.08) für den mittleren Kanalabschnitt und die Feile D3 (20/.07) bis zum Erreichen der Arbeitslänge verwendet. Die apikale Präparation erfolgte mit den ProTaper-Instrumenten F2 (25/.08), F3 (30/.09) und F4 (40/.06). Die rotierenden NiTi-Instrumente wurden mit einem speziellen Motor (Endo IT Professional Motor, VDW) mit einer konstanten Umdrehungszahl von 500 Umin⁻¹ und einem Torque von 200 gcm betrieben. Die Drehmomentbegrenzung von D3 wurde entsprechend der Herstellerangabe auf 150 gcm reduziert. Tabelle 5 veranschaulicht das Präparationsprotokoll.

Tabelle 5: Übersicht der verwendeten Instrumente für die Revision der Gruppe 2 mit ProTaper Universal Retreatment (D1 bis D3) und ProTaper-Instrumenten (F2 bis F4) (AL = Arbeitslänge)

Instrument	Größe	Insertionstiefe
D1	30/.09	AL - 7 mm
D2	25/.08	AL - 3,5 mm
D3	20/.07	AL
F2	25/.08	AL
F3	30/.09	AL
F4	40/.06	AL

In Gruppe 3 wurden für die Entfernung der Guttapercha und des *sealers* zunächst wie in Gruppe 1 Gates-Glidden-Bohrer (VDW) verwendet. Die mit einer reziproken Arbeitsweise betriebenen Instrumente wurden mit dem VDW.SILVER RECIPROC Motor (VDW) und den systemspezifischen Einstellungen („*reciproc all*“) verwendet. Das Reciproc R25-Instrument (VDW), das eine Größe von 0,25 mm an der Instrumentenspitze und eine Konizität von 8% innerhalb der ersten 3 mm aufweist, wurde bis zum Erreichen der Arbeitslänge eingesetzt. Die weitere Revision erfolgte mit einem Reciproc R40-Instrument (VDW), dessen Instrumentenspitze bei einer 6%igen Konizität auf den ersten 3 mm einen Durchmesser von 0,40 mm besitzt. Die Insertionstiefe der jeweiligen Instrumente ist in Tabelle 6

dargestellt. Alle Instrumente wurden bei der Verwendung langsam, mit geringem nach apikal gerichteten Druck im Wurzelkanal auf- und abbewegt. Die Amplitude dieser Bewegung betrug maximal 3 mm. Nach drei dieser sogenannten Pickbewegungen wurde der Kanal gespült und das Instrument gereinigt. Mit der R40-Feile wurde zusätzlich bürstend gegen die lateralen Kanalwände gearbeitet, um verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial möglichst vollständig zu entfernen.

Tabelle 6: Übersicht der verwendeten Instrumente für die Revision der Gruppe 3 mit Gates-Glidden-Bohrer und Reciproc-Instrumenten (AL = Arbeitslänge)

Instrument	Größe	Insertionstiefe
Gates-Glidden-Bohrer	Größe 3	AL - 8 mm
Gates-Glidden-Bohrer	Größe 2	AL - 6 mm
Reciproc	R25	AL
Reciproc	R40	AL

Die für die vollständige Revision benötigte Arbeitszeit (T-gesamt) wurde mit einer digitalen Stoppuhr gemessen und notiert. Zusätzlich wurden die Arbeitszeiten T1, die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge und T2, die Zeit bis zum vollständigen Entfernen der Gutta-percha, notiert. Die Zeit T2 entspricht zusätzlich in allen Gruppen der apikalen Präparation bis zur ISO-Größe 40. Die gesamte Arbeitszeit (T-gesamt) ist die Summe aus T1 und T2. Allerdings wurden hierbei weder die Spüldauer noch die für den Instrumentenwechsel benötigte Zeit berücksichtigt. Nach jedem Instrumentenwechsel bzw. bei den reziprok arbeitenden Instrumenten nach drei Pickbewegungen erfolgte eine Zwischenspülung mit 2 ml NaOCl (1%) (Hedinger). Alle Wurzelkanäle wurden manuell mit einer 5-ml-Spritze und einer Spülkanüle (NaviTip, Ultradent) mit einem Außendurchmesser von 0,30 mm gespült. Ein Instrumentenwechsel erfolgte, wenn die jeweilige Arbeitslänge (Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6) erreicht oder kein weiteres Vordringen nach apikal möglich war. Jedes Instrument wurde nach viermaligem Gebrauch oder bei sichtbaren Deformationen ausgetauscht.

Die Revision wurde beendet, wenn mit bloßem Auge weder Wurzelkanalfüllmaterial in der Spüllösung noch am Instrument sichtbar war. Zwischenfälle, wie beispielsweise Perforationen, Instrumentenfrakturen und extrudierter Debris, wurden notiert. Hinsichtlich

des extrudierten Materials wurde keine Unterscheidung zwischen *sealer* und Guttapercha vorgenommen. Beim Auftreten einer Instrumentenfraktur wurde die Zeit für die Entfernung des Fragments nicht zur Arbeitszeit addiert.

Die Abschlusspülung erfolgte mit 5 ml 20%igem EDTA (Lege artis Pharma) und 5 ml 1%igem NaOCl (Hedinger). Die Kanäle wurden anschließend mit Papierspitzen der ISO-Größe 40 getrocknet. In allen Gruppen erfolgte die Revision entsprechend der Herstellervorgaben durch einen Behandler, der durch vorherige Testreihen mit den jeweiligen Systemen und Instrumenten vertraut war.

Im Anschluss an die Revisionen erfolgte der postoperative Mikro-CT-Scan. Alle Daten wurden nach dem in Kapitel 4.6 beschriebenen Verfahren analysiert. Anhand der postoperativen Rekonstruktionen wurden das Volumen des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials sowie das Volumen der Zahnhartsubstanz in mm^3 bestimmt. Des Weiteren wurden der Dentinabtrag in mm^3 und der Anteil des verbliebenen Füllmaterials in Prozent berechnet. Die Berechnung erfolgte durch die jeweiligen Differenzen der prä- und postoperativen Volumina und wurde durch zwei kalibrierte Untersucher durchgeführt.

Die Abbildung 9 veranschaulicht schematisch den Ablauf der Untersuchung.



Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchaufbaus

4.6 Mikro-Computertomografie

Alle 60 Proben wurden prä- und postoperativ mit Hilfe des eXplore Locus SP Mikro-Computertomografen (General Electric Medical Systems) eingescannt (Abbildung 10).



Abbildung 10: Haupteinheit des Mikro-Computertomografen

Dabei wurden die Röhrenspannung auf 90 kV, der Röhrenstrom auf 80 μ A, die Anzahl der Ansichten auf 900, die Belichtungszeit auf 3200 ms, der Detektor-Modus 2 x 2 und die effektive Pixelgröße auf 29 μ m eingestellt.

Vier Wurzeln wurden innerhalb eines gekammerten Röhrchens (Probenhalter) platziert und gleichzeitig gescannt. Die gegenüberliegenden Proben wiesen jeweils dieselbe Ausrichtung auf und wurden mit Schaumstoff fixiert, um Bewegungsartefakte während der Rotationsbewegungen zu vermeiden. Die Abbildung 11 zeigt die Platzierung der Wurzeln innerhalb des Probenröhrchens und die Positionierung des Röhrchens im Mikro-Computertomografen.

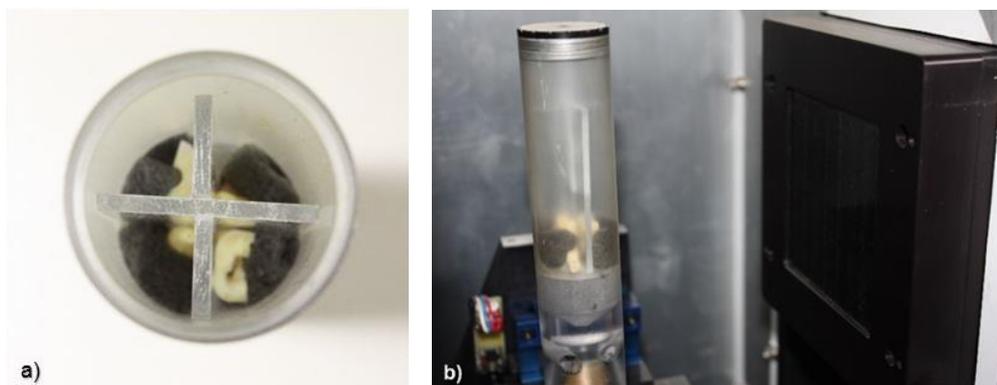


Abbildung 11: a) und b) Platzierung und Positionierung der Zahnwurzeln innerhalb des Probenhalters und des Mikro-Computertomografen

Die jeweiligen Kammern waren mit einer röntgenopaken Markierung versehen, die eine spätere Zuordnung der jeweiligen Probe ermöglichte. Diese Markierung, das Aufnahmedatum und die Scannummer wurden protokolliert. Zusätzlich wurde ein sogenanntes „Phantom“ bei jedem Scanvorgang mit gescannt, welches Referenzwerte für die verschiedenen Medien (Knochen, Wasser, Luft) besitzt, um eine spätere Kalibrierung des Scans zu ermöglichen. Mit Hilfe von Hell- und Dunkel-Kalibrierungsbildern und einer Röntgenübersichtsaufnahme wurden die eingestellten Parameter, der verwendete Filter und die Position der Objekte inklusive des Phantoms überprüft. Wurden die gewünschten Objekte nicht korrekt erfasst, erfolgte eine Korrektur des Objektträgers durch eine Mittenverschiebung. Bei jedem Scanvorgang wurde zunächst ein Grobdatensatz erzeugt, das sogenannte *MiniVolume*. Die Auflösung entspricht dabei nicht der des später rekonstruierten Objektes, sondern war deutlich geringer und diente lediglich der dreidimensionalen Ansicht. Nach Erstellung des *MiniVolume* wurde jeder Scan mit Hilfe der Referenzwerte des Phantoms kalibriert. Für die Generierung des Datensatzes einer Probe wurde der Grobdatensatz in vier einzelne zu rekonstruierende Bereiche, die *Region of Interest* (ROI), zerlegt. Dabei wurden die Koordinaten der ROI in ein Rekonstruktionsfenster eingegeben und mit Hilfe der Rekonstruktionssoftware (Reconstruction Utility, GE Healthcare, Chicago, IL, USA) hochauflösend in die ausgewählte effektive Voxelgröße von 29 μm übertragen. Zur Ansicht und Bearbeitung der Daten wurde die Software MicroView, Version 2.1.2. (GE Healthcare) verwendet.

4.6.1 Volumenbestimmung

Die Bestimmung der Volumina erfolgte vor und nach der Revision durch zwei kalibrierte Untersucher. Dabei wurden prä- und postoperativ die Volumina der Zahnhartsubstanzen und des Wurzelkanalfüllmaterials in mm^3 bestimmt. Alle Werte und die gebildeten Mittelwerte beider Untersucher wurden in einer Excel-Tabelle zusammengefasst (Abbildung 23).

Die Analyse der einzelnen Datensätze erfolgte ebenfalls mit der MicroView Software, Version 2.1.2. (GE Healthcare). Für die Bestimmung dieser Volumina wurde zunächst ein Grauwert histogramm des rekonstruierten Datensatzes erzeugt. Der zu untersuchende Bereich musste hierbei als ROI markiert sein. Dieses ROI enthielt den Zahn mit der Wurzelkanalfüllung inklusive der angrenzenden Luft (Abbildung 12).

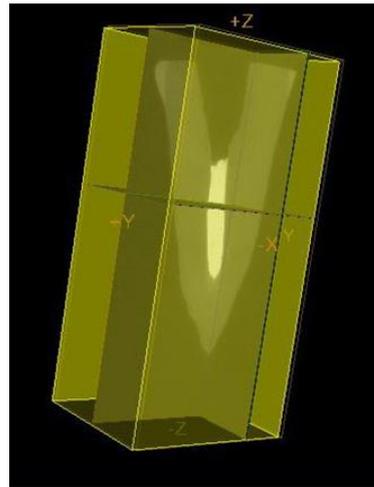


Abbildung 12: Anlegen einer *Region of Interest* (ROI) mit der MicroView Software, Version 2.1.2

Das Grauwert histogramm gibt Bildpunkte in Abhängigkeit von den Grauwerten an und enthält eine Kurve mit verschiedenen Umkehrpunkten und *peaks*. Die Umkehrpunkte entsprechen dabei den Grenzflächen zwischen den jeweiligen Medien, d. h. zwischen Luft und Zahnhartsubstanz sowie zwischen Zahnhartsubstanz und Wurzelkanalfüllmaterial. Da jedes Medium definierte Grauwerte und *peaks* besaß, konnte durch Markierung dieser Bereiche innerhalb des Histogramms das jeweilige Medium separat dargestellt und das entsprechende Volumen bestimmt werden. Hierfür wurde der ausgewählte Bereich mit der Option *highlight selected region* nochmals überprüft (Abbildung 13).

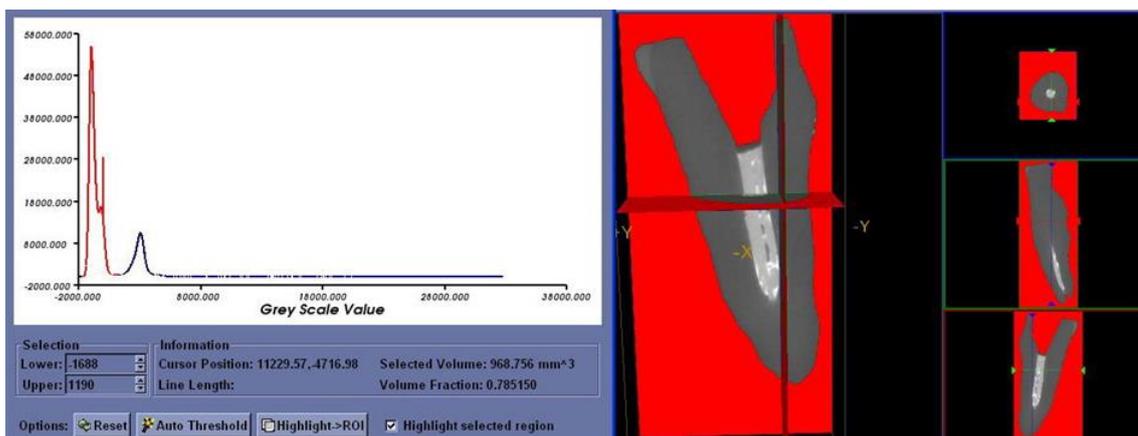


Abbildung 13: Grauwert histogramm einer Probe. Dabei ist die angrenzende Luft bis zum Umkehrpunkt der Zahnhartsubstanz markiert

Zu Beginn der Auswertung wurden alle Scans mit Hilfe des Phantoms kalibriert, um mögliche Schwankungen innerhalb der definierten Grauwerte auszuschließen. Des Weiteren

wurde der Umkehrpunkt für das Wurzelkanalfüllmaterial bei der Begutachtung zufällig ausgewählter präoperativer Scans ermittelt und eine definierte Grenze von 9000 bis zum Ende der Kurve gewählt (Abbildung 14). Durch die Festlegung des Umkehrpunktes und der Grenze konnten individuelle Schwankungen ausgeschlossen und somit eine bessere Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit für die Gruppeneinteilung gewährleistet werden.

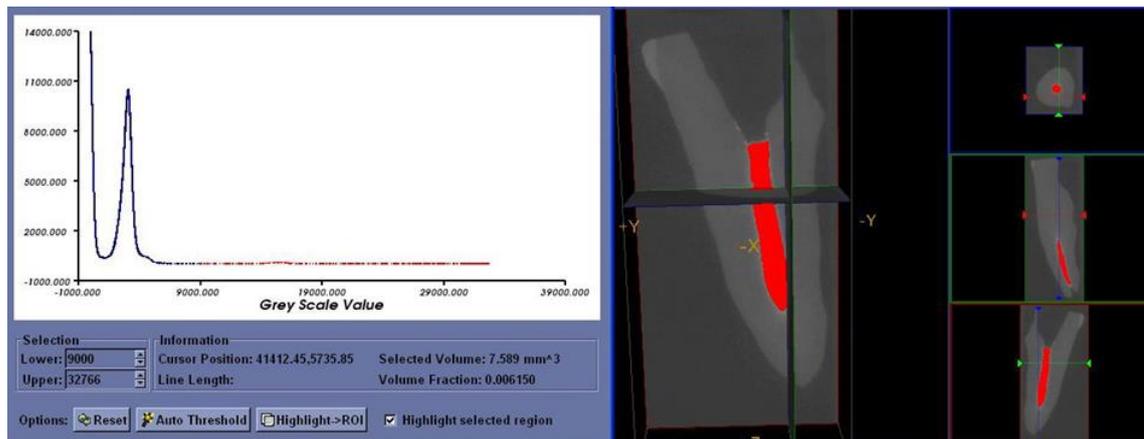


Abbildung 14: Bestimmung des Volumens der Wurzelkanalfüllung durch Eingabe der unteren Grenze von 9000 und Markierung der Kurve bis zum Ende

Für die Zahnhartsubstanz wurde der erste Umkehrpunkt individuell bei jeder Auswertung und der zweite bei 8999 festgelegt (Abbildung 15). Aufgrund der Entfernung der Zahnkrone waren die Proben nahezu schmelzfrei, sodass die Zahnhartsubstanz vollständig als Dentin gewertet wurde.

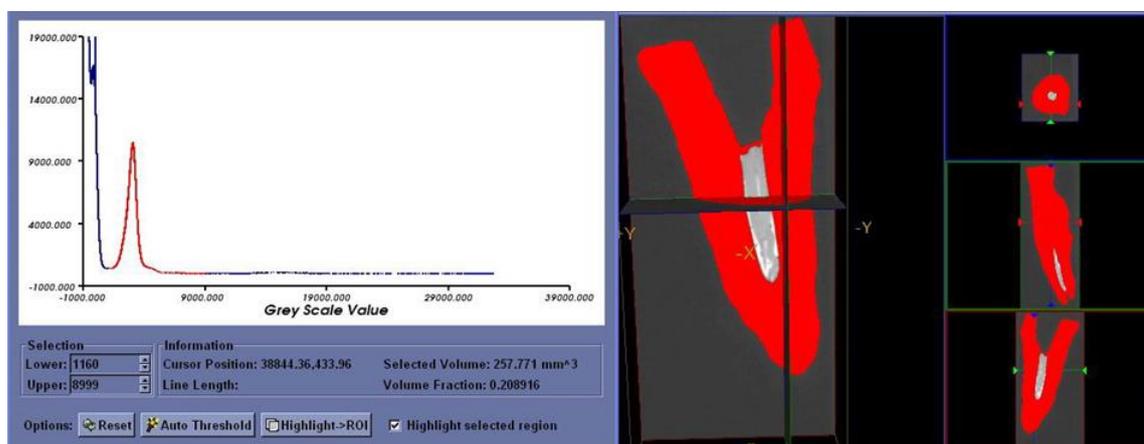


Abbildung 15: Volumenbestimmung der Zahnhartsubstanz durch eine rote Markierung der entsprechenden Kurvenanteile im Grauwert-Histogramm und Überprüfung des ausgewählten Bereichs durch die Option *highlight selected region*

4.7 Statistische Analyse

Sowohl für die Einteilung der Gruppen als auch für die Analyse der Ergebnisse wurden die ANOVA-Varianzanalyse und der parameterfreie statistische Kruskal-Wallis-Test verwendet. Bei multiplen Vergleichen wurde der Signifikanzfehler nach Tukey adjustiert. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der SAS-Software 9.2 (SAS Institute INC., Cary, NC, USA) und dem Software-System für Datenanalyse STATISTICA (Version 10, StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA).

5 Ergebnisse

5.1 Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials

Mit keiner der angewendeten Revisionstechniken war eine vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials möglich. Durchschnittlich verblieben bei der manuellen Revision $0,2 \text{ mm}^3$ des Wurzelkanalfüllmaterials, in der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Gruppe $0,3 \text{ mm}^3$ und bei Reciproc $0,4 \text{ mm}^3$ (Abbildung 16 und Tabelle 7).

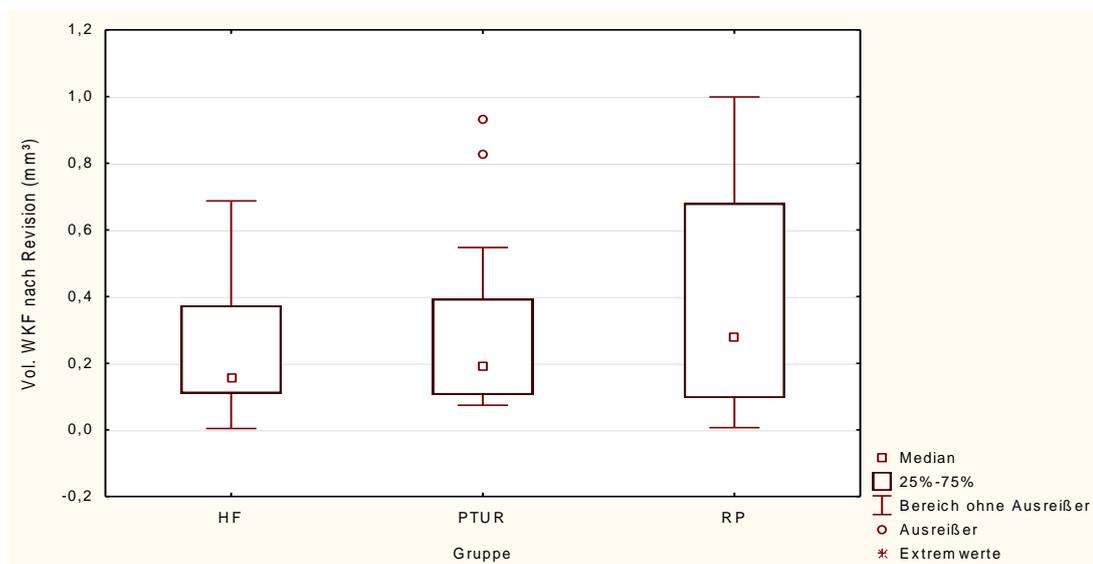


Abbildung 16: *Box-Plot*-Diagramm zur Darstellung des postoperativen Volumens des Wurzelkanalfüllmaterials in mm^3 (Vol. WKF = Volumen der Wurzelkanalfüllung, HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

In Tabelle 7 sind die erhobenen Daten bezüglich des prä- und postoperativen sowie des prozentual verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials zusammengefasst.

Tabelle 7: Mittelwerte (*mean*) und Standardabweichungen (SD) der erhobenen Daten zum Wurzelkanalfüllmaterial vor und nach Revision (Vol. WKF = Volumen der Wurzelkanalfüllung, WKF = Wurzelkanalfüllung, HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/Pro Taper, RP = Reciproc)

	HF (<i>mean</i> ± SD)	PTUR (<i>mean</i> ± SD)	RP (<i>mean</i> ± SD)
Vol. WKF vor Revision (mm ³)	4,8 ± 2,1	4,6 ± 1,6	4,8 ± 2,1
Vol. WKF nach Revision (mm ³)	0,2 ± 0,2	0,3 ± 0,2	0,4 ± 0,3
Verbliebene WKF (%)	5,1 ± 4,2	6,4 ± 4,3	8,3 ± 6,4

In der Hedström-Gruppe verblieben 5,1%, in der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Gruppe 6,4% und in der Reciproc-Gruppe 8,3% des Wurzelkanalfüllmaterials (Tabelle 7), wobei sich diese Werte nicht signifikant voneinander unterschieden ($p = 0,1429$) (Tabelle 8).

Tabelle 8: Paarvergleiche der einzelnen Gruppen bezüglich des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Vergleich	p-Wert	Interpretation
HF vs. PTUR	0,6989	Nicht Signifikant
HF vs. RP	0,1228	Nicht Signifikant
PTUR vs. RP	0,4666	Nicht Signifikant

5.2 Dentinabtrag während der Revisionsbehandlung

Die Volumina des Dentins wurden prä- und postoperativ mit Hilfe der rekonstruierten Mikro-CT-Daten erhoben. Zur Berechnung des Dentinabtrages wurde das postoperative Volumen der Zahnhartsubstanz vom präoperativen Volumen subtrahiert. Die Abbildung 17 veranschaulicht den Dentinabtrag in mm³ während der Revisionsbehandlung.

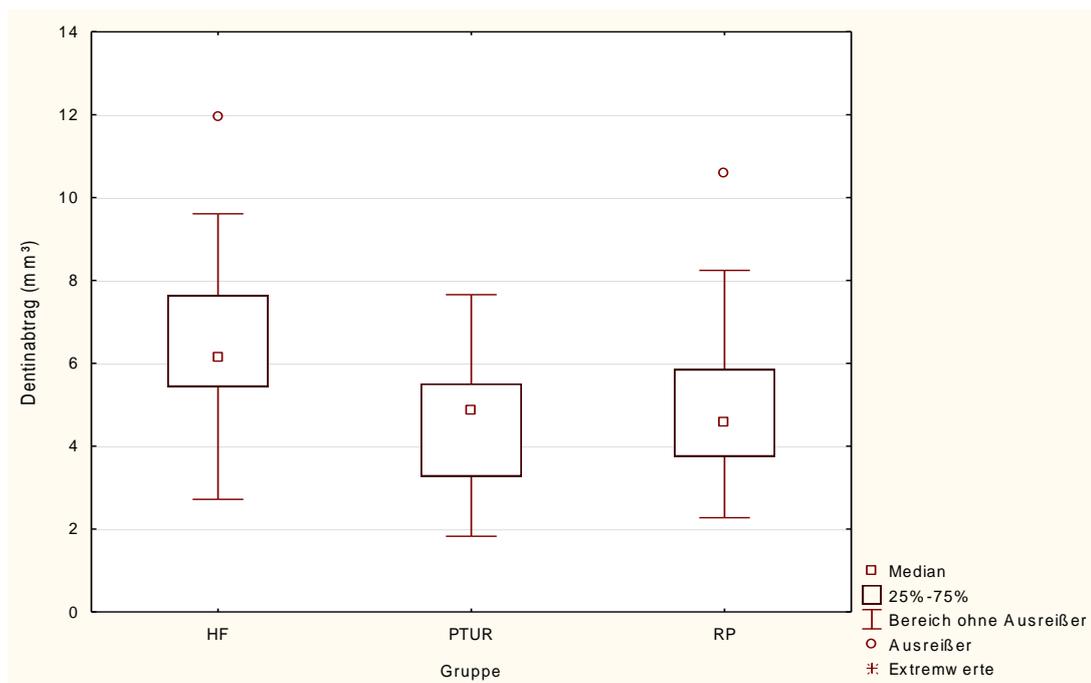


Abbildung 17: *Box-Plot*-Diagramm zur Darstellung des Dentinabtrages in mm³ während der Revisionsbehandlung (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Der größte durchschnittliche Substanzverlust wurde bei der Revision mit Handinstrumenten festgestellt (6,5 mm³). Der geringste Dentinabtrag wurde bei ProTaper Universal Retreatment und ProTaper mit 4,7 mm³ ermittelt, gefolgt von den Reciproc-Instrumenten mit 5,0 mm³ (Abbildung 17 und Tabelle 9).

Tabelle 9: Mittelwerte (*mean*) und Standardabweichungen (SD) des Dentinabtrags und der Volumina der Zahnhartsubstanz vor und nach der Revision (Vol. = Volumen, HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

	HF	PTUR	RP
	(<i>mean</i> ± SD)	(<i>mean</i> ± SD)	(<i>mean</i> ± SD)
Vol. Dentin vor Revision (mm ³)	318,8 ± 64,7	296,9 ± 58,6	284,7 ± 59,2
Vol. Dentin nach Revision (mm ³)	312,3 ± 64,7	292,2 ± 58,2	279,7 ± 58,0
Dentinabtrag (mm ³)	6,5 ± 2,2	4,7 ± 1,6	5,0 ± 2,0

Zwischen den Handinstrumenten und der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Gruppe war der Unterschied signifikant ($p = 0,0142$). Sowohl zwischen Handinstrumenten und Reciproc als auch zwischen Reciproc und ProTaper Universal Retreatment/ProTaper war der Unterschied nicht signifikant ($p = 0,0580$, $p = 0,8389$) (Tabelle 10). In Tabelle 10 werden die Signifikanzen der Paarvergleiche nach Tukey-Adjustierung angegeben.

Tabelle 10: Paarvergleiche der einzelnen Gruppen bezüglich des Dentinabtrags (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Vergleich	p-Wert	Interpretation
HF vs. PTUR	0,0142	Signifikant
HF vs. RP	0,0580	Nicht Signifikant
PTUR vs. RP	0,8389	Nicht Signifikant

5.3 Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1)

In der Abbildung 18 ist die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) in Sekunden aller drei Revisionsgruppen grafisch dargestellt.

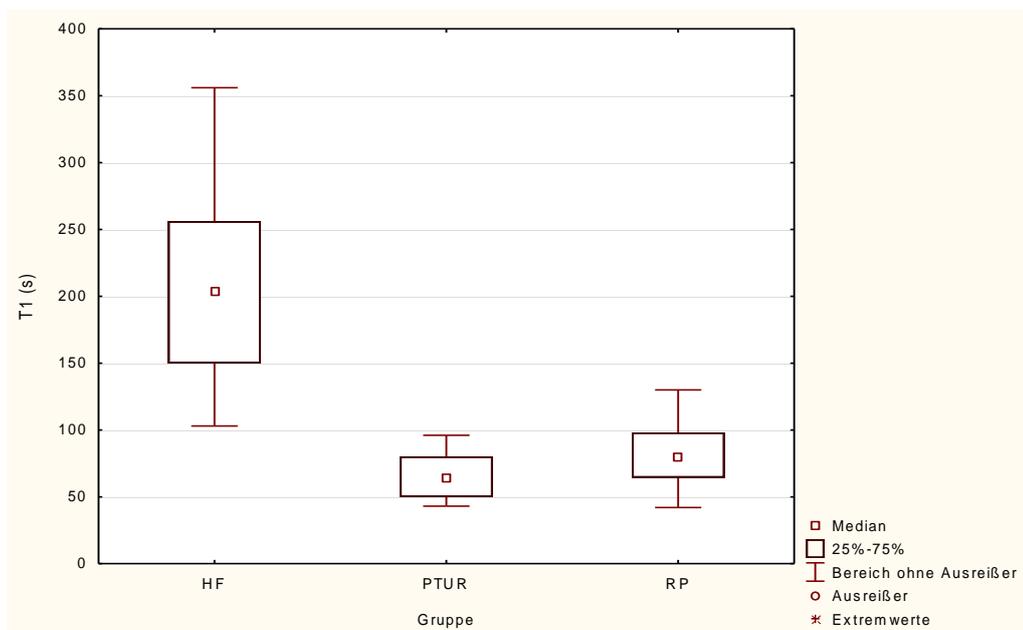


Abbildung 18: *Box-Plot*-Diagramm zur Darstellung der Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Die durchschnittliche Zeit T1 (in s) bis zum Erreichen der Arbeitslänge war bei der Hedström-Gruppe mit 207 s signifikant länger als bei den beiden Gruppen mit maschineller Revision ($p = 0,0001$). Der durchschnittliche Zeitaufwand betrug bei ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Instrumenten 66 s und in der Reciproc-Gruppe 81 s (Abbildung 18 und Tabelle 14). Zwischen den beiden maschinellen Systemen war der Unterschied nicht signifikant ($p = 0,4817$) (Tabelle 11). Tabelle 11 zeigt die p-Werte des Paarvergleichs nach Tukey-Adjustierung.

Tabelle 11: Paarvergleiche und statistischen Auswertung der Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1) (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Vergleich	p-Wert	Interpretation
HF vs. PTUR	0,0001	Signifikant
HF vs. RP	0,0001	Signifikant
PTUR vs. RP	0,4817	Nicht Signifikant

5.4 Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2)

In der Abbildung 19 ist die Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2) in Sekunden grafisch dargestellt. Diese Werte entsprechen der Zeit vom Erreichen der Arbeitslänge bis zum Ende der Revision inklusive der apikalen Präparation bis zur Größe 40.

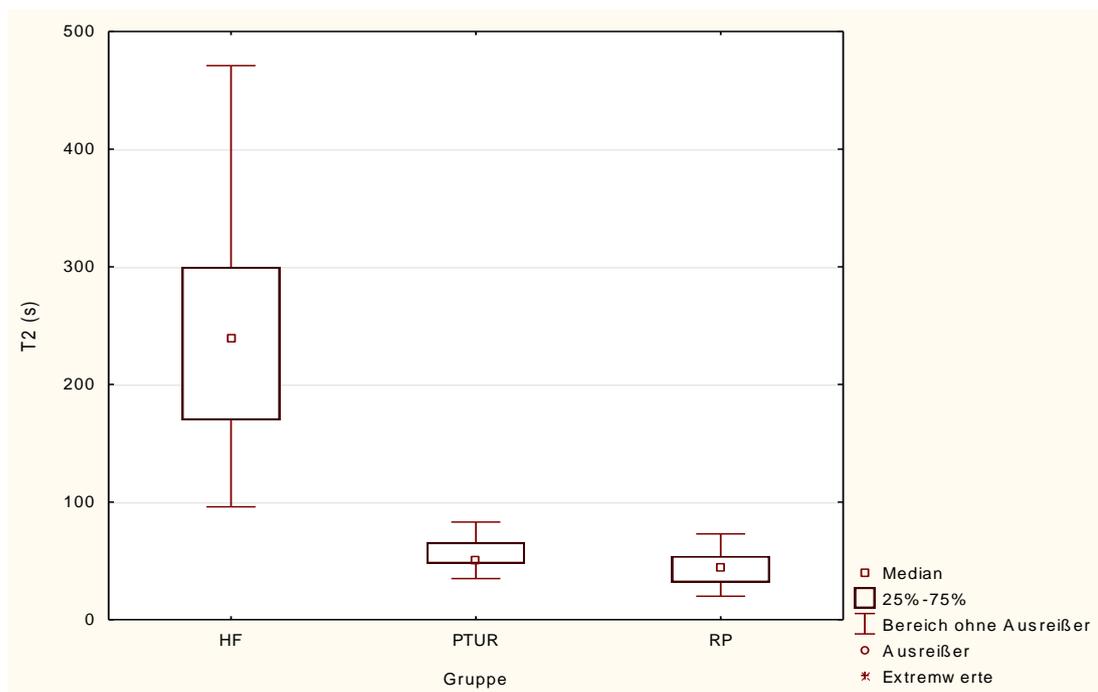


Abbildung 19: *Box-Plot*-Diagramm zur Darstellung der Zeit T2 (in s) bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Der durchschnittliche Zeitaufwand betrug in der Gruppe der Handinstrumente 251 s und fiel damit signifikant höher ($p = 0,0001$) (Abbildung 19, Tabelle 12 und Tabelle 14) als in den beiden anderen Gruppen aus. Zwischen der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Gruppe mit 56 s und der Reciproc-Gruppe mit 44 s bestand kein signifikanter Unterschied ($p = 0,7829$) (Abbildung 19, Tabelle 12 und Tabelle 14).

Tabelle 12: Paarvergleiche und statistische Auswertung der Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2) (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Vergleich	p-Wert	Interpretation
HF vs. PTUR	0,0001	Signifikant
HF vs. RP	0,0001	Signifikant
PTUR vs. RP	0,7829	Nicht Signifikant

5.5 Zeit für die gesamte Revisionsbehandlung (T-gesamt)

Die für die gesamte Revision benötigte Arbeitszeit (T-gesamt) ist in Abbildung 20 grafisch dargestellt. T-gesamt ist die Summe aus den Zeiten T1 und T2.

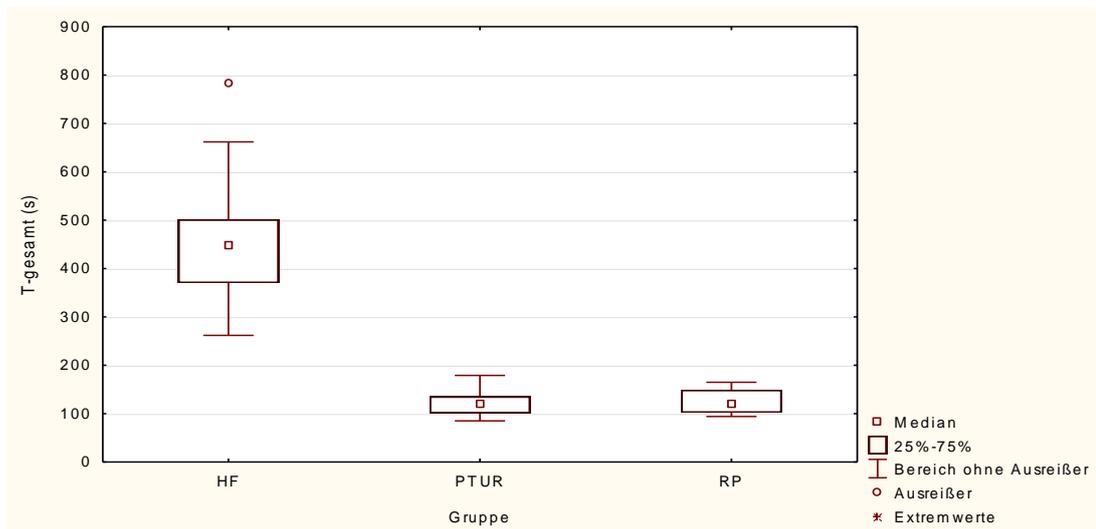


Abbildung 20: *Box-Plot*-Diagramm zur Darstellung der gesamten Arbeitszeit (T-gesamt in s) für die drei experimentellen Gruppen (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Bezüglich der gesamten Arbeitszeit dauerte die Revisionsbehandlung mit Hedström-Feilen mit 458 s signifikant am längsten ($p = 0,0001$). Zwischen der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper- (122 s) und der Reciproc-Gruppe (125 s) bestand kein signifikanter Unterschied ($p = 0,9898$) (Tabelle 13 und Tabelle 14). Tabelle 13 gibt die Vergleiche der Gruppen und Signifikanzen an.

Tabelle 13: Paarvergleiche und statistische Auswertung der gesamten Arbeitszeit (T-gesamt) (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Vergleich	p-Wert	Interpretation
HF vs. PTUR	0,0001	Signifikant
HF vs. RP	0,0001	Signifikant
PTUR vs. RP	0,9898	Nicht Signifikant

In Tabelle 14 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge (T1), die Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials (T2) sowie die für die Revisionsbehandlung benötigte Arbeitszeit (T-gesamt) nochmals zusammengefasst.

Tabelle 14: Mittelwerte (*mean*) und Standardabweichungen (SD) der Arbeitszeiten T1 (in s) und T2 (in s), sowie der gesamten Arbeitszeit (T-gesamt) (in s) (HF = Hedström-Feilen, PTUR = ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, RP = Reciproc)

Gruppe	T1 (<i>mean</i> ± SD)	T2 (<i>mean</i> ± SD)	T-gesamt (<i>mean</i> ± SD)
HF	207 ± 67	251 ± 97	458 ± 127
PTUR	66 ± 16	56 ± 13	122 ± 25
RP	81 ± 21	44 ± 15	125 ± 23

5.6 Zwischenfälle

Während der Revision auftretende Zwischenfälle, wie beispielsweise apikal extrudierter Debris, Instrumentenfrakturen und Perforationen, wurden notiert.

Hinsichtlich des extrudierten Materials wurde nicht zwischen *sealer* und Guttapercha unterschieden und lediglich eine Ja- oder Nein-Bewertung getroffen. Bei der Revision mit Hedström-Feilen trat bei sechs Zähnen eine apikale Extrusion von Debris auf. In der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Gruppe konnte bei fünf Proben extrudierter Debris festgestellt werden, während die Verwendung von Reciproc-Instrumenten in vier Fällen zur Extrusion von Debris führte.

Obwohl alle maschinellen NiTi-Instrumente entsprechend den Herstellerangaben verwendet wurden, trat in beiden Gruppen jeweils eine Instrumentenfraktur auf. In der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Gruppe frakturierte eine D3-Feile nach zweimaligem Gebrauch. Ein zuvor unbenutztes R25-Instrument frakturierte bei der Revision mit Reciproc-Instrumenten. Beide Fragmente konnten mit Hilfe von Handinstrumenten entfernt werden, sodass die Proben weiterhin verwendet werden konnten. Bei der manuellen Revision wurde keine Instrumentenfraktur festgestellt. Des Weiteren traten bei der Anwendung von ProTaper Universal Retreatment-Instrumenten drei Perforationen mit der D1-Feile auf. Die

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Instrumentenfrakturen und die aufgetretenen Perforationen.

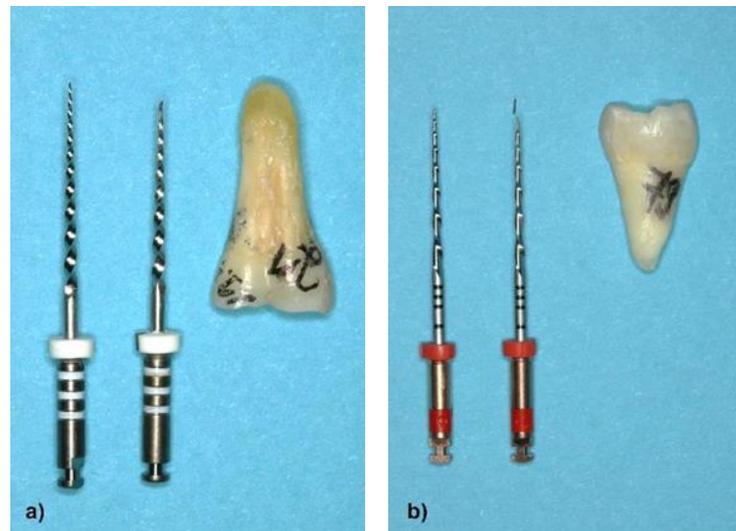


Abbildung 21: Frakturierte NiTi-Instrumente (rechts) und unversehrte Feilen (links) mit der entsprechenden Probe a) frakturierte D3-Feile innerhalb der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper Gruppe b) frakturiertes R25-Instrument innerhalb der Reciproc Gruppe

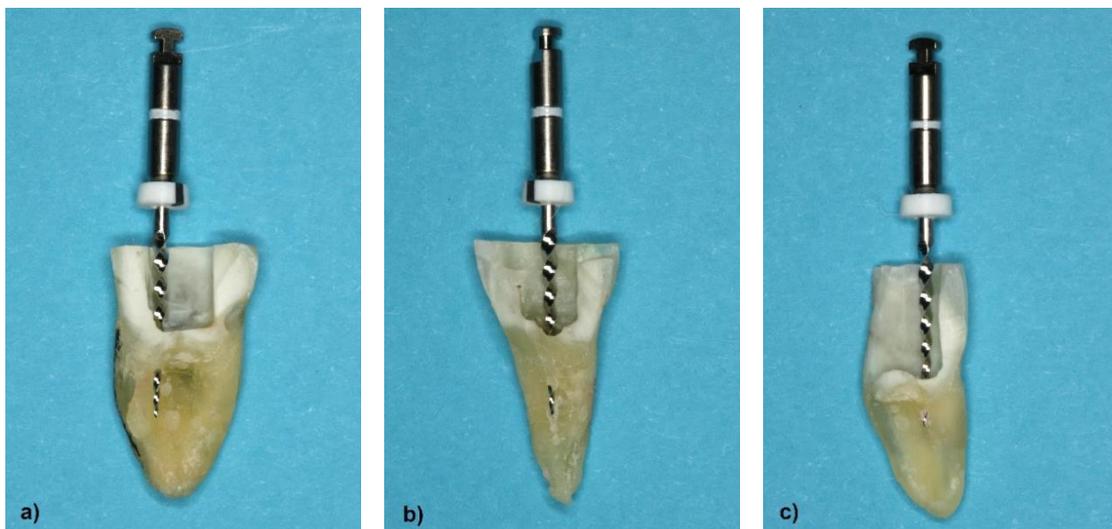


Abbildung 22: Perforationen im koronalen Wurzel Drittel mit dem ProTaper Universal Retreatment-Instrument D1 (a, b und c)

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methode

6.1.1 Gruppeneinteilung

Für die vorliegende Studie wurden ausschließlich menschliche extrahierte Molaren mit gekrümmten Wurzelkanälen verwendet. Die Bestimmung der Krümmungsradien erfolgte nach der Methode von Schäfer et al. (2002), und die Krümmungswinkel wurden nach Schneider (1971) ermittelt. Schneider (1971) klassifizierte anhand der Krümmungswinkel drei Gruppen, wobei Wurzelkanäle mit 5° oder weniger als gerade, zwischen 10° und 20° als moderat und zwischen 25° und 70° als stark gekrümmt definiert wurden. Alle Winkel und Radien wurden von zwei kalibrierten Untersuchern erhoben und zu Mittelwerten zusammengefasst, um individuelle Schwankungen bei der Datenerhebung zu vermeiden. Es wurden ausschließlich Wurzelkanäle verwendet, die in mindestens einer röntgenologischen Ebene einen Krümmungswinkel von 20° bis 40° aufwiesen und somit als moderat bis stark gekrümmt galten. Die oben genannte Bestimmung der Krümmungswinkel und -radien wurde bereits in anderen Studien verwendet (Gergi und Sabbagh 2007; Gu et al. 2008; Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Beasley et al. 2013; Rödiger et al. 2014; Martins et al. 2017; Rödiger et al. 2018; Silva et al. 2018). Des Weiteren galt ein Radius zwischen 3 und 12 mm als Einschlusskriterium für die vorliegende Untersuchung. In der Mehrzahl der bisherigen Studien wurden vor allem gerade Wurzelkanäle verwendet, da diese einfacher zu standardisieren sind (Sae-Lim et al. 2000; Hülsmann und Bluhm 2004; Schirrmeister et al. 2006c; Gu et al. 2008; Zuolo et al. 2013; Rios et al. 2014; Dincer et al. 2015; Bernardes et al. 2016; Yılmaz und Özyürek 2017; Bago et al. 2019). Die Krümmungswinkel und -radien der Wurzelkanäle haben einen starken Einfluss auf den Schwierigkeitsgrad einer Revisionsbehandlung. Die meisten anderen Untersuchungen erfassten den Radius und den Winkel lediglich in einer röntgenologischen Ebene. Nur wenige Studien bestimmten die Winkel und Radien anhand von zwei röntgenologischen Ebenen (Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017; Martins et al. 2017; Jorgensen et al. 2017; Rödiger et al. 2018; Silva et al. 2018). Da das natürliche Wurzelkanalsystem allerdings dreidimensional gekrümmt ist, stellt die Bestimmung der Werte anhand von zwei röntgenologischen Ebenen die präzisere Methode dar und führt zu einer besseren Standardisierung der Proben.

Eine Standardisierung der Proben erfolgte ebenfalls im Hinblick auf die Arbeitslänge und die Wurzelkanalfüllung. Die Zahnkronen wurden abgetrennt, sodass eine einheitliche Wurzellänge von 18 mm mit einer Arbeitslänge von 17 mm resultierte. Die Wurzelkanalfüllung wurde auf einer standardisierten Länge von 10 mm \pm 1 mm abgetrennt und verdichtet. Dadurch sollte ein möglichst einheitliches Volumen des Wurzelkanalfüllmaterials für alle Proben gewährleistet werden. Die Qualität der Obturation wurde mit Hilfe von Röntgenbildern überprüft. Entsprach die Wurzelkanalfüllung in Länge und Homogenität nicht der gewünschten Qualität wurde sie erneut durchgeführt.

Die Gruppeneinteilung erfolgte anhand von fünf Parametern: Radius und Winkel der Wurzelkanalkrümmung aus zwei röntgenologischen Ebenen sowie das präoperative Volumen des Wurzelkanalfüllmaterials. Die Aufteilung der einzelnen Proben erfolgte anhand dieser Parameter in drei homogene Gruppen, um eine möglichst standardisierte Ausgangssituation und eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen. Das Studiendesign erfolgte in Anlehnung an die von Hausdörfer (2012) und Rödiger et al. (2012) beschriebene Methode.

6.1.2 Revisionsbehandlung

Bei einer Revisionsbehandlung sollte das Füllmaterial idealerweise vollständig entfernt werden (Ferreira et al. 2001). In der vorliegenden Studie wurden zwei maschinell betriebene Systeme und Handinstrumenten in Bezug auf ihre Effektivität und Arbeitssicherheit bei der Revisionsbehandlung von Guttapercha und *sealer* aus gekrümmten Wurzelkanälen verglichen. Die Revision mit Handinstrumenten ist die meist verwendete und am besten beschriebene Technik (Friedman et al. 1990). Schlecht verdichtete Guttapercha kann mit Hilfe von Handinstrumenten einfach und schnell entfernt werden (Stabholz und Friedman 1988).

ProTaper Universal Retreatment-Instrumente wurden speziell für Revisionen entwickelt. Gu et al. (2008) bestätigten ihre Effektivität bereits an geraden Wurzelkanälen. In gekrümmten Kanälen wurden sie in einigen Studien verwendet (Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Abramovitz et al. 2012; Beasley et al. 2013; Sağlam et al. 2014; Çanakçı et al. 2016; Jorgensen et al. 2017).

Das Ein-Feilen-System Reciproc, das vorrangig für die primäre Wurzelkanalpräparation entwickelt wurde, fand bereits in einigen Studien für die Entfernung von Wurzelkanalfüllmaterialien aus geraden (Zuolo et al. 2013; Rios et al. 2014; Dincer et al. 2015; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Yılmaz und Özyürek 2017; Bago et al. 2019; Silva et al.

2018) und gekrümmten Wurzelkanälen (Fruchi et al. 2014; Çanakçı et al. 2016; Jorgensen et al. 2017) Verwendung.

Initial erfolgte die Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials in der Reciproc- und Hedström-Gruppe mit Gates-Glidden-Bohrern der Größen 3 und 2. Stabholz und Friedman (1988) empfahlen die initiale Verwendung von Gates-Glidden-Bohrern, da sich häufig koronal das am meisten verdichtete Material befindet. Lediglich die ProTaper- und ProTaper Universal Retreatment-Instrumente wurden ohne Gates-Glidden-Bohrer verwendet, da der Hersteller die Verwendung nicht ausdrücklich empfiehlt.

Sowohl in experimentellen Studien als auch bei der klinischen Behandlung ist der korrekte Zeitpunkt, an dem eine Revision beendet ist, schwierig zu bestimmen. Die Wahl des Endpunktes der Revision beeinflusst maßgeblich die Arbeitszeit und somit auch die Effektivität der jeweiligen Technik. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Revision beendet, wenn mit bloßem Auge weder Wurzelkanalfüllmaterial in der Spüllösung noch am Instrument sichtbar war. Dieses Vorgehen ist an das von Gergi und Sabbagh (2007) beschriebene Vorgehen angelehnt. Einige Autoren beendeten die Revision allerdings zu anderen Zeitpunkten, was eine erschwerte Vergleichbarkeit der einzelnen Untersuchungen und deren Ergebnisse zur Folge hat. Taşdemir et al. (2008) beendeten die Revisionsbehandlung bei Erreichen der Arbeitslänge und sobald kein weiteres Material mit diesem Instrument entfernt werden konnte. In anderen Studien wurde die Revision beendet, wenn mit bloßem Auge kein Füllmaterial im Kanal (Schirrmeister et al. 2006b) oder auf postoperativen Röntgenbildern (Hülsmann und Bluhm 2004) sichtbar war. Obwohl die Bewertung von postoperativen Röntgenbilder auch in der klinischen Praxis herangezogen wird, beschrieben Schirrmeister et al. (2006b), dass bei diesem Vorgehen im Vergleich zur Verwendung eines Mikroskops die Menge an verbliebenem Material häufig unterschätzt wird. Zudem kann bei gekrümmten Kanälen der Anteil, der sich apikal der Krümmung befindet, nicht direkt eingesehen werden. Es wurde gezeigt, dass sich die größte Menge an verbliebenem Füllungsmaterial vor allem im apikalen Anteil des Wurzelkanals befindet (Gergi und Sabbagh 2007; Ünal et al. 2009). Es kann daher geschlussfolgert werden, dass eine Kombination mittels visueller Überprüfung und röntgenologische Kontrolle bei der klinischen Behandlung sinnvoll ist.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die für die gesamte Revision benötigte Zeit (T-gesamt) notiert. Des Weiteren wurden die Arbeitszeiten T1 (Zeit bis zum Erreichen der Arbeitslänge) und T2 (Zeit bis zur vollständigen Entfernung der Guttapercha und apikale Präparation um zwei weitere Größen) ermittelt. Andere Autoren definierten die für die Revision benötigte Arbeitszeit ähnlich (Gu et al. 2008; Rödiger et al. 2012; Beasley et al. 2013;

Rödig et al. 2014; Dincer et al. 2015; Rödig et al. 2018), wobei teilweise keine weitere Präparation des apikalen Bereichs stattfand (Gu et al. 2008). Diese weitere Präparation verlängerte die für die gesamte Revision benötigte Zeit in dieser Studie.

In Anlehnung an Roggendorf et al. (2010) erfolgte die apikale Präparation um zwei weitere Größen als die ursprüngliche Präparationsgröße. Diese Untersuchung zeigte, dass durch eine Vergrößerung der apikalen Präparation die Reste an verbliebenem *sealer* signifikant verringert wurden (Roggendorf et al. 2010). Darüber hinaus ermöglicht eine weitere Apikalpräparation einen bessere Applikation und Austausch der desinfizierenden Spüllösungen (Hülsmann et al. 2011). In Revisionsfällen ist eine angemessene Größe der Präparation nicht nur für das Einbringen der Spüllösung nötig, sondern auch für die Durchführung der erneuten Wurzelkanalfüllung (Hülsmann et al. 2011). Allerdings sollte eine exzessive Entfernung der Zahnhartsubstanz beziehungsweise des Dentins vermieden werden, um Längsfrakturen und Perforationen zu vermeiden (Hülsmann et al. 2011). In der Literatur lassen sich keine Angaben zum idealen Dentinabtrag finden. Es existiert keine konkrete Aussage dazu, wieviel infiziertes Dentin entfernt werden muss, damit die Revision erfolgreich ist und wie viel Dentin abgetragen werden darf, damit der Kanal nicht unnötig geschwächt wird. Ziel dieser Studie war es eine quantitative Aussage über den tatsächlichen Dentinabtrag der jeweiligen untersuchten Revisionstechniken zu geben.

Die Revisionsbehandlung stellt eine technische Herausforderung dar, und prozedurale Fehler können auftreten. Zu den Zwischenfällen wurde in der vorliegenden Untersuchung auch die apikale Extrusion von Debris gewertet. Sowohl die Extrusion von infiziertem Debris als auch von Wurzelkanalfüllmaterial kann zu Schmerzen und Entzündungsreaktionen des Körpers führen (Schirrmeyer et al. 2006a) und postoperative Beschwerden auslösen. Dabei können selbst kleine Mengen an Guttapercha eine heftige lokale Gewebereaktion initiieren (Sjögren et al. 1995). Entsprechend der klinischen Situation, in der keine visuelle Kontrolle möglich ist, wurde nicht zwischen Dentinspänen und Füllmaterial unterschieden und die Extrusion lediglich mit einer Ja- oder Nein-Entscheidung bewertet.

Eine Extrusion ist an einem Ex-vivo-Modell einfacher zu simulieren als in vivo. In den meisten experimentelle Untersuchung wird der Apex des Wurzelkanals von Luft umgeben (Huang et al. 2007) und der physikalische Gegendruck des periapikalen Gewebes fehlt (Bürklein et al. 2014). Das Gewebe, welches den Apex umgibt, kann als natürliche Barriere eine Extrusion verhindern (Salzgeber und Brilliant 1977). Aus diesem Grund müssen quantitative Angaben zur Extrusion kritisch bewertet und können nur mit Zurückhaltung

auf die klinische Behandlung übertragen werden. In gekrümmten Kanälen treten Perforationen, Stufenbildungen, Blockaden, Instrumentenfrakturen und -deformationen, deutlich häufiger auf als bei geraden Wurzelkanälen (Schirrmeister et al. 2006a; Ünal et al. 2009). Die in der vorliegenden Studie verwendeten gekrümmten Wurzelkanäle eignen sich besser für die Bestimmung der Effektivität von Revisionstechniken (Ferreira et al. 2001), da in der klinischen Situation die Mehrzahl der behandelten Zähne natürliche Wurzelkanalkrümmungen aufweist und somit eine Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

Verglichen mit Untersuchungen an geraden Kanälen, gibt es in der Literatur deutlich weniger Studien, welche die Effektivität von Revisionen an gekrümmten Kanälen untersuchten (Ferreira et al. 2001; Schirrmeister et al. 2006a; Gergi und Sabbagh 2007; Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014; Fruchi et al. 2014; Çanakçı et al. 2016; Jorgensen et al. 2017; Rödiger et al. 2018), da wie bereits erwähnt Untersuchungen an geraden Wurzelkanälen einfacher durchzuführen und zu standardisieren sind.

6.1.3 Bewertung der Revision

Das Hauptziel der meisten Revisionsstudien ist die Bestimmung der Effektivität der untersuchten Techniken. In der Literatur wurden verschiedene Bewertungskriterien für die Effektivität einer Revisionsbehandlung beschrieben. Sowohl die Menge des verbliebenen Füllmaterials als auch die Arbeitszeit wurden als wichtige Parameter herangezogen (Gu et al. 2008; Rödiger et al. 2012; Beasley et al. 2013; Rödiger et al. 2014; Dincer et al. 2015; Rödiger et al. 2018; Bago et al. 2019).

Eine weit verbreitete Technik zur Bestimmung des verbliebenen Materials ist die radiologische Auswertung von Röntgenbildern (Ferreira et al. 2001; Schirrmeister et al. 2006b; Gergi und Sabbagh 2007; Ünal et al. 2009; Abramovitz et al. 2012). Hierfür wird der Wurzelkanal auf dem Röntgenbild in drei verschiedene Bereiche eingeteilt und *Scores* für die Menge des verbliebenen Füllmaterials im koronalen, mittleren oder apikalen Drittel vergeben (Ferreira et al. 2001). Zum anderen werden digitale Bildauswertungsprogramme verwendet, wobei die Auswertung anhand von Röntgenbildern aus zwei verschiedenen Projektionsebenen erfolgt. Dabei wird der prozentuale Anteil des verbliebenen Füllmaterials anhand der Fläche der Kanalwand digital berechnet (Ünal et al. 2009). Es handelt sich hierbei um eine einfache, schnelle und non-destruktive Methode, bei der allerdings aufgrund der nicht ausreichenden Auflösung kleine Reste an Wurzelkanalfüllmaterial übersehen werden können (Schirrmeister et al. 2006b; Duncan und Chong 2010). Weiterhin ist eine Unterscheidung zwischen Guttapercha und *sealer* häufig nicht möglich (Schirrmeister et al. 2006b). Zudem

handelt es sich um eine zweidimensionale Abbildung einer dreidimensionalen Struktur und die Evaluation des verbliebenen Füllmaterials ist subjektiv und semi-quantitativ (Ünal et al. 2009).

Eine andere Technik zur Quantifizierung des verbliebenen Füllmaterials ist die Längsspaltung der Zähne mit anschließender fotografischer oder mikroskopischer Auswertung (Wilcox und Juhlin 1994; Sae-Lim et al. 2000; Hülsmann und Bluhm 2004; Schirrmeister et al. 2006b; Zuolo et al. 2013; Rios et al. 2014). Vorteilhaft ist, dass das Wurzelkanalfüllmaterial direkt begutachtet werden kann. Allerdings kann das Spalten der Wurzelkanäle zu einem Verlust von Füllmaterial führen, wodurch die Ergebnisse falsch interpretiert werden könnten (Ferreira et al. 2001; Schirrmeister et al. 2006b). Einige Autoren dekalzifizierten die Zahnwurzeln mit Hilfe von Salpetersäure (Schirrmeister et al. 2006b; Schirrmeister et al. 2006c; Taşdemir et al. 2008; Gu et al. 2008), wodurch die Proben transparent wurden. Dieser Prozess ist zeitintensiv, und die verwendeten Chemikalien können zu Interaktionen mit einigen *sealern* und Füllmaterialien führen (Tay et al. 2005; Duncan und Chong 2010). Andererseits ist diese Methode kostengünstig, nicht invasiv und sensitiv genug, selbst kleine Bereiche an Wurzelkanalfüllmaterial und *sealer* zu bestimmen (Schirrmeister et al. 2006b).

In der vorliegenden Arbeit wurde das verbliebene Füllmaterial mit Hilfe der Mikro-Computertomografie quantifiziert, wobei diese Technik auch bei anderen Revisionsstudien Verwendung fand (Hammad et al. 2008; Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014; Sağlam et al. 2014; Fruchi et al. 2014; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Martins et al. 2017; Rödiger et al. 2018; Bago et al. 2019; Silva et al. 2018). Es handelt sich dabei um eine objektive, exakte und non-invasive Methode zur Darstellung des Wurzelkanalfüllmaterials (Hammad et al. 2008). Darüber hinaus können die untersuchten Proben dreidimensional dargestellt und die Volumina des Füllmaterials berechnet werden (Duncan und Chong 2010; Solomonov et al. 2012; Rechenberg und Paqué 2013). Die Mikro-CT eignet sich sehr gut zur Beurteilung prä- und postoperativer Aufnahmen wurzelkanalgefüllter Zähne (Rödiger et al. 2014; Monguilhott Crozeta et al. 2016). Ein weiterer Vorteil ist, dass die Proben für die Auswertung nicht beschädigt werden und sie somit einer weiteren Untersuchung zur Verfügung stehen. Des Weiteren sind genaue quantitative Aussagen zum Dentinabtrag während einer Revisionsbehandlung mit Hilfe der Mikro-CT möglich (Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014; Nevares et al. 2016; Rödiger et al. 2018).

6.1.4 Lösungsmittel

Bei Revisionsbehandlungen können Lösungsmittel, wie z. B. Eukalyptol, verwendet werden, um stark verdichtetes Wurzelkanalfüllmaterial zu erweichen (Friedman et al. 1990). Sağlam et al. (2014) quantifizierten das, nach Revision mit verschiedenen Lösungsmitteln, verbliebene Wurzelkanalfüllmaterial und stellten keinen positiven Effekt auf die Entfernbarekeit des Füllmaterials bei Verwendung eines Lösungsmittels fest. Allerdings konnte die Arbeitszeit deutlich verringert werden. Auch Hülsmann und Bluhm (2004) schlussfolgerten, dass die Verwendung eines Lösungsmittels (Eukalyptol) die Arbeitszeit verringern kann. Allerdings wird die Anwendung von Lösungsmitteln in der Literatur kontrovers diskutiert. Zum einen werden einige Präparate als toxisch (Wennberg und Ørstavik 1989) oder kanzerogen eingestuft, zum anderen kann ein dünner Film (Wilcox und Juhlin 1994; Sae-Lim et al. 2000) aus angelöstem Füllmaterial (Guttapercha und *sealer*) in die Dentintubuli (Horvath et al. 2009) vordringen und diese verstopfen. Die notwendige chemische Desinfektion und das Einwirken der medikamentösen Einlage werden dadurch erschwert. Aufgrund der genannten negativen Effekte wurden in der vorliegenden Studie keine Lösungsmittel verwendet.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial

In allen untersuchten Proben wurde verbliebenes Wurzelkanalfüllmaterial detektiert. Auch andere Studien berichteten, dass ein vollständiges Entfernen des Füllmaterials nicht möglich war (Schirrmeister et al. 2006a; Schirrmeister et al. 2006c; Taşdemir et al. 2008; Hammad et al. 2008; Ünal et al. 2009; Abramovitz et al. 2012; Rödig et al. 2012; Zuolo et al. 2013; Fruchi et al. 2014; Rios et al. 2014; Rödig et al. 2014; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Bernardes et al. 2016; Çanakçı et al. 2016; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017; Martins et al. 2017; Rödig et al. 2018; Bago et al. 2019). Die Effektivität von Ein-Feilen- im Vergleich zu Mehr-Feilen-Systemen wird teilweise als effektiver (Monguilhott Crozeta et al. 2016; Bago et al. 2019) teilweise als weniger effektiv bewertet (Alves et al. 2016). In der vorliegenden Untersuchung lag kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Effektivität von Ein- und Mehr-Feilen-Systemen vor. Zwischen den drei verwendeten Revisionstechniken bestand hinsichtlich des verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterials kein signifikanter Unterschied. In allen Gruppen wurden Reste an Guttapercha und *sealer* festgestellt, wobei diese zwischen 0,2 mm³ und 0,4 mm³ betragen. Im Durchschnitt verblieben 5,1 - 8,3% des Füllmaterials nach der Revision

im Wurzelkanal. Bislang wurde die Effektivität von Reciproc mehrheitlich für die Revision von Guttapercha aus geraden Kanälen bestimmt (Zuolo et al. 2013; Rios et al. 2014; Monguilhott Crozeta et al. 2016; Yilmaz und Özyürek 2017; Bago et al. 2019; Silva et al. 2018). In gekrümmten Kanälen werden ähnliche Werte verglichen zur vorliegenden Untersuchung ermittelt (Fruchi et al. 2014; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017). In der Studie von Fruchi et al. (2014) wurden zwei reziprok arbeitende Systeme (Reciproc und WaveOne) miteinander verglichen und das verbliebene Füllmaterial (7 - 8%) mit Hilfe der Mikro-CT ermittelt. Verglichen zur vorliegenden Untersuchung ist die Leistung der beiden Systeme als schlechter zu bewerten, da die Wurzelkanäle lediglich mittels Ein-Stift-Technik obturiert wurden. In einer anderen Mikro-CT-Studie mit vergleichbaren Revisionsprotokolls detektierten Rödiger et al. (2012) nach Anwendung von Handinstrumenten und zwei rotierenden NiTi-Systemen (PTUR und D-RaCe) eine ähnliche Mengen an verbliebenem Füllmaterial (3,7 - 11,3%). Deutlich weniger Füllmaterial (0,02 - 5,7%) wurde in einer früheren Mikro-CT-Untersuchung nach der Revision mit Hand- und ProTaper-Revisionsfeilen ermittelt (Hammad et al. 2008). Diese geringeren Werte sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Füllmaterial bei dieser Untersuchung aus geraden Wurzelkanälen revidiert wurde. Im Gegensatz zu gekrümmten Kanälen, bei denen der Krümmungswinkel einen Einfluss auf den Schwierigkeitsgrad der Revision hat, kann das Füllmaterial in geraden Kanälen unter Sicht bis zum Apex besser entfernt werden. Die Autoren jener Untersuchung vermuteten, dass eine Kombination aus Hand- und maschinellen Systemen bei der Revision noch effizienter sein könnte (Hammad et al. 2008). Ein Vergleich zwischen zwei reziprok (Reciproc und WaveOne) und einem vollrotierenden Nickel-Titan-System (PTUR) an geraden Wurzelkanälen resultierte ebenfalls in geringeren Mengen an verbliebenem Füllmaterial (2,98 - 4,30%) (Rios et al. 2014). Im Gegensatz dazu verblieb nach der Revision drei verschiedener thermoplastischer Fülltechniken mit PTUR nahezu dreimal so viel Füllmaterial (14,2 - 19,3%) in gekrümmten Kanälen (Rödiger et al. 2018). Dieser erhebliche Unterschied beruht vermutlich darauf, dass thermoplastische Guttapercha besser als ein kaltes Füllmaterial an die Kanalwände und in unzugängliche Bereiche wie Isthmen und Ausbuchtungen adaptiert und dementsprechend schlechter entfernt werden kann (Li et al. 2014; Schäfer et al. 2016).

Anhand der vorliegenden Daten und im Vergleich der Literatur wird deutlich, dass in keiner In-vitro-Studie das primäre Ziel einer Revisionsbehandlung erreicht werden konnte. Mit keiner speziellen Technik, ob vollrotierend oder reziproke Arbeitsweise, Ein- oder Mehr-Feilen-System, ist die vollständige Entfernung des vorhandenen Wurzelkanalfüllmaterials aus

geraden und gekrümmten Kanälen möglich. Des Weiteren können mit Hilfe der Mikro-CT quantitative Aussagen ohne Beschädigung der Proben gemacht werden.

6.2.2 Zahnhartsubstanzverlust

In der vorliegenden Untersuchung wurde zusätzlich der durch die Revision bedingte Zahnhartsubstanzverlust mit Hilfe von Mikro-CT-Aufnahmen bestimmt. Bislang gibt es in der Literatur keine Angaben darüber, wie viel Dentin während einer Revisionsbehandlung abgetragen werden sollte. Ein übermäßiger Dentinabtrag ist allerdings zu vermeiden, um das Risiko für Wurzellängsfrakturen sowie Perforationen zu reduzieren und die Wurzel nicht zusätzlich zu schwächen (Hülsmann et al. 2011). Der Erfolg einer endodontischen Behandlung hängt primär nicht von der Entfernung des infizierten Dentins ab, sondern maßgeblich von der Elimination pathogener Keime mit Hilfe adäquater Desinfektionsstrategien (Siqueira 2001).

Der während einer Revisionsbehandlung in gekrümmten Kanälen verursachte Dentinabtrag wurde bislang nur in wenigen Studien untersucht (Rödig et al. 2012; Rödig et al. 2014; Nevares et al. 2016; Rödig et al. 2018). In der vorliegenden Untersuchung entfernten Handinstrumente signifikant mehr Dentin als das rotierende NiTi-System (PTUR). Zwischen den beiden NiTi-Systemen PTUR und Reciproc bestand kein signifikanter Unterschied. Es kann somit geschlossen werden, dass weder die reziproke noch die rotierende Arbeitsweise bei ähnlicher Dimensionierung der Instrumente einen Einfluss auf den Dentinabtrag besitzt.

Diese Ergebnisse unterscheiden sich deutlich von einer Untersuchung mit vergleichbarem Studiendesign, in der das PTUR-System annähernd doppelt so viel Dentin wie die Handinstrumente bei nahezu identischem Präparationsprotokoll entfernte (Rödig et al. 2012). In beiden Untersuchungen wurde initial mit FlexMaster bis zur Größe 30/.02 präpariert. Obwohl in dieser früheren Untersuchung die PTUR-Instrumente mit geringeren Umdrehungszahlen von 300 Umin^{-1} verwendet wurden, sind vermutlich benutzerspezifische Faktoren, wie z. B. lateraler Druck gegen die Kanalwand, für diese Unterschiede verantwortlich. Zusätzlich mussten vier frakturierte PTUR-Instrumente mit Hilfe ultraschallaktivierter Spitzen aus den Kanälen entfernt werden, was vermutlich ebenfalls zu diesem erhöhten Dentinabtrag führte.

In einer anderen Mikro-CT-Untersuchung unterschied sich der Dentinabtrag ($8,9 - 9,3 \text{ mm}^3$) bei Verwendung eines konventionell rotierenden Systems (FlexMaster) und Handinstrumenten nicht signifikant voneinander (Rödig et al. 2014). In neueren Mikro-CT-

Studien wurde nur die Hälfte des Dentins ($2,7 - 3,5 \text{ mm}^3$) während der Revision mit PTUR, Reciproc und ProTaper Next-Feilen entfernt (Nevares et al. 2016; Rödiger et al. 2018).

Es kann daher geschlussfolgert werden, dass Instrumente mit ähnlichem Durchmesser und Konizität einen vergleichbaren Dentinabtrag herbeiführen und sich Unterschiede im Dentinabtrag durch die individuelle Handhabung der Instrumente (z. B. Intensität und lateraler Druck der Bewegungen) sowie eine andere Bestimmung des Endpunktes der Revision erklären lassen.

6.2.3 Arbeitszeiten

Die Entfernung von gut verdichtetem Füllmaterial mit Hilfe von Handinstrumenten kann sehr zeitintensiv sein (Oliveira et al. 2006). Aus diesem Grund wird versucht, eine schnelle, sichere und effektive Methode für die Entfernung des Füllmaterials aus den Wurzelkanälen zu entwickeln. In der vorliegenden Untersuchung betrug die für die vollständige Revisionsbehandlung benötigte Zeit mit Handinstrumenten im Durchschnitt 7,6 min und dauerte damit signifikant am längsten, gefolgt von der Reciproc-Gruppe mit 2,1 min und der ProTaper Universal Retreatment/ProTaper-Gruppen mit 2 min. Zwischen den beiden maschinellen Systemen bestand kein signifikanter Unterschied. Das bedeutet, dass die Anzahl der Instrumente der maschinellen Systeme keinen Einfluss auf die Arbeitszeit besitzt. Die Zeit für die Revision mit einem Ein-Feilen-System (Reciproc) war mit der eines Mehr-Feilen Systems (PTUR mit 3 Instrumenten) vergleichbar. Im Gegensatz dazu berichteten Ünal et al. (2009), dass die Anzahl und die Effektivität der Instrumente die Arbeitszeit beeinflussten. Sie gaben an, dass die Revision mit Handinstrumenten im Vergleich zu rotierenden Instrumenten schneller und effektiver war und vermuteten, dass die Entfernung von größeren Guttapercha-Stücken die Arbeitszeit verkürzte.

Die Arbeitslänge wurde mit PTUR am schnellsten erreicht und war in etwa doppelt so schnell wie in einer ähnlichen Untersuchung (Rödiger et al. 2012). Bei identischem Präparationsprotokoll, aber reduzierter Umdrehungszahl wurde die Arbeitslänge knapp 2 min später erreicht. Die schnellere Rotation der Instrumente der vorliegenden Untersuchung erzeugte vermutlich eine stärkere Reibungswärme und führte zur Plastifizierung der Guttapercha (Betti und Bramante 2001) und somit einer einfacheren Entfernbarkeit (Hülsmann und Bluhm 2004).

Entgegen der Vermutung, dass nur bei Handinstrumenten die Guttapercha in großen Stücken oder in toto entfernt werden kann, fiel in der vorliegenden Studie derselbe Effekt bei der Verwendung von Reciproc auf. Dies ist vermutlich auf den S-förmigen Instrumentenquerschnitt zurückzuführen. Diese besondere Instrumentengeometrie führt zu einer hohen

Schneideeffizienz (Plotino et al. 2014), wobei die scharfen Schneidekanten und der große Spanraum für einen schnellen Abtransport der Guttapercha sorgen und ein schnelles Erreichen der Arbeitslänge ermöglichen. Auch in anderen Studien wurde bei der Revision mit maschinell betriebenen Systemen eine verkürzte Arbeitszeit im Vergleich zu Handinstrumenten festgestellt (Hülsmann und Bluhm 2004; Saad et al. 2007; Zuolo et al. 2013; Silva et al. 2018). Anders als in der vorliegenden Untersuchung dauerte die Revision mit Reciproc knapp eine Minute länger (Zuolo et al. 2013). Die initiale Präparationsgröße (ISO-Größe 40) war allerdings größer als bei der vorliegenden Untersuchung, wodurch sich vermutlich mehr Füllmaterial in den Kanälen befand. Die für die vollständige Revision benötigte Zeit mit Reciproc (3,2 min) war signifikant am kürzesten, gefolgt von einem weiteren maschinellen System (Mtwo) (6,1 min) und Handinstrumenten (12,1 min) (Zuolo et al. 2013). Obwohl es sich bei dieser Untersuchung um eine Revisionsstudie an geraden Kanäle handelt und der Schwierigkeitsgrad einer Revision sich bei gekrümmten Wurzelkanälen erhöht, ist die gesamte Arbeitszeit in der vorliegenden Studie kürzer. Sogar im Vergleich zu anderen Untersuchungen an gekrümmten Wurzelkanälen (Ferreira et al. 2001; Schirrmeister et al. 2006a; Ünal et al. 2009) ist die deutlich kürzere Arbeitszeit der vorliegenden Untersuchung hervorzuheben.

Somit lässt sich in Bezug auf die Arbeitszeit schlussfolgern, dass das Füllmaterial mit Hilfe beider maschineller Systeme sehr schnell (innerhalb von 2 Minuten) entfernt werden kann. Dabei besitzen die Arbeitsweise, ob reziprok oder vollrotierend, und die Anzahl der Instrumente keinen Einfluss auf die Effektivität. Wobei zu erwähnen ist, dass in der vorliegenden Untersuchung die Zeit für den Instrumentenwechsel nicht berücksichtigt wurde, sie allerdings im klinischen Alltag nicht vernachlässigt werden darf. Die Wahl des für die Revisionsbehandlung geeigneten Instrumentariums obliegt daher der Präferenz des Behandlers.

6.2.4 Zwischenfälle

Obwohl alle NiTi-Instrumente entsprechend den Herstellerangaben verwendet und in Vorversuchen die korrekte Anwendung der Systeme erprobt wurde, traten Zwischenfälle wie die apikale Extrusion von Debris, Perforationen sowie Instrumentenfrakturen auf. In der Literatur existieren widersprüchliche Angaben bezüglich der Menge an apikal extrudiertem Debris bei der Verwendung von Reciproc bei Primär- und Revisionsbehandlungen. Teilweise wird von mehr (Bürklein und Schäfer 2012; Bürklein et al. 2014; Çanakçı et al. 2016) und

teils weniger (Silva et al. 2014; Dincer et al. 2015; Kaşıkçı Bilgi et al. 2017; Yılmaz und Özyürek 2017) Debris im Vergleich zu konventionell rotierenden Systemen berichtet.

Einige Autoren vermuten, dass die nicht-schneidende Spitze und die Arbeitsweise der Reciproc-Instrumente Debris in Richtung Apex transportieren und deshalb für eine größere Debrisextrusion verantwortlich sind (Bürklein und Schäfer 2012; Çanakçı et al. 2016). Die vorliegende Untersuchung kann dies nicht bestätigen, denn in allen experimentellen Gruppen trat eine apikale Extrusion von Debris auf. Die Arbeitsweise oder das Instrumentendesign hatten hierbei keinen Einfluss auf die Extrusion. Die maschinelle Revision führte in der PTUR-Gruppe bei fünf Proben und bei der Reciproc-Gruppe in vier Fällen zu einer Extrusion von Debris. Bei der Verwendung von Hedström-Feilen fiel eine Extrusion von Debris bei sechs Zähnen auf. Auch andere Autoren bestätigen sowohl während der Primär- als auch bei der Revisionsbehandlung eine Extrusion von Debris oder Füllungsmaterial (Schirrmeister et al. 2006a; Ünal et al. 2009; Bürklein et al. 2014; Dincer et al. 2015; Çanakçı et al. 2016; Yılmaz und Özyürek 2017). Dennoch sollte eine apikale Extrusion für eine erfolgreiche endodontische Behandlung nach Möglichkeit vermieden werden (Yılmaz und Özyürek 2017).

Bei der manuellen Revisionsbehandlung mit Hedström-Feilen wurden keine prozeduralen Fehler wie Perforationen, Stufenbildungen oder Instrumentenfrakturen festgestellt. Auch andere Studien belegten, dass Handinstrumente als sichere Revisionsinstrumente eingestuft werden können (Hülsmann und Bluhm 2004; Schirrmeister et al. 2006a; Ünal et al. 2009; Rödiger et al. 2012; Rödiger et al. 2014). Bei der Verwendung der PTUR-Instrumente traten drei Perforationen (15%) mit der D1-Feile im koronalen Drittel des Wurzelkanals auf. In der Studie von Ünal et al. (2009) verursachte ebenfalls die D1-Feile zwei laterale Perforationen (14%). Das spezielle Instrumentendesign der Feile, die geringe Flexibilität und die aktiv schneidende Spitze sind wahrscheinlich Gründe für die auftretenden Perforationen. Im Gegensatz dazu berichtete eine weitere Untersuchung aus derselben Arbeitsgruppe über fünf Perforationen (8%) mit der D3-Feile (Rödiger et al. 2018).

Die mechanischen Eigenschaften der Nickel-Titan-Legierung erlauben den Instrumenten zwar insgesamt mehr Flexibilität im Vergleich zu Handinstrumenten aus Edelstahl (Plotino et al. 2009), dennoch können bei der klinischen Anwendung Frakturen mit einer Häufigkeit von 0,5 - 5% auftreten (Parashos und Messer 2006). Frakturen treten häufig durch nicht korrekte oder exzessive Anwendung der Instrumente auf (Gambarini 2001). Trotz Verwendung spezieller drehmoment-kontrollierter Antriebsmotoren frakturierte in der vor-

liegenden Untersuchung bei der Revision mit PTUR-Instrumenten eine D3-Feile nach zweimaligem Gebrauch und ein zuvor unbenutztes R25-Instrument in der Reciproc-Gruppe. In einer Untersuchung aus dem Jahr 2015 wiesen die Reciproc-Instrumente sowohl bei der Primär- als auch bei der Revisionsbehandlung eine sehr geringe Deformations- ($< 0,4\%$) und Frakturinzidenz ($< 0,5\%$) auf (Plotino et al. 2015). In einer anderen Revisionsstudie mit PTUR-Instrumenten in gekrümmten Kanälen wurde keine Fraktur ermittelt (Gergi und Sabbagh 2007). Insgesamt liegt die Frakturrate der vorliegenden Studie (jeweils 5%) deutlich unter den Ergebnissen früherer Revisionsstudien an gekrümmten Wurzelkanälen von 36% (Ünal et al. 2009) und 25% (Rödig et al. 2012). Ünal et al. (2009) berichtete über fünf frakturierte PTUR-Instrumente (drei D3- und zwei D2-Feilen) und zwei Instrumente in der R-Endo-Gruppe. Die höhere Frakturrate der ProTaper-Revisionsinstrumente wurde durch die größere Konizität (7%) der Feile begründet. In der Untersuchung von Rödig et al. (2012) frakturierten fünf D-RaCe-Feilen (25%) und vier Instrumente der PTUR-Gruppe (20%). Die Verringerung der Drehmomentbegrenzung des D3-Instrumentes von 200 gcm entsprechend der Herstellerangabe auf 150 gcm, könnte eine Erklärung für geringere Frakturrate der vorliegenden Untersuchung sein. Durch die Reduzierung der Drehmomentbegrenzung ertönt früher ein akustisches Warnsignal und das Instrument kann bei drohender Überschreitung des Wertes früher aus dem Kanal entfernt und somit eine Fraktur vermieden werden. Weiterhin wurde in einer früheren Studie vermutet, dass eine Reduzierung der Umdrehungszahl zu einer geringeren Frakturrate führt (Hausdörfer 2012). Dies kann durch die vorliegende Studie nicht bestätigt werden, da eine Erhöhung der Drehzahl bei den PTUR-Instrumenten von 300 Umin^{-1} auf 500 Umin^{-1} in einer geringeren Frakturrate resultierte. Neben der Umdrehungszahl und des Drehmomentes können die mechanischen Eigenschaften der Legierung (NiTi) (Plotino et al. 2009), Konizität (Haikel et al. 1999), Instrumentendesign und -querschnitt (Gutmann und Gao 2012), der Krümmungswinkel und der Radius des behandelten Zahnes (Rödig et al. 2018) sowie Behandler abhängige Faktoren wie zum Beispiel die Erfahrung mit dem jeweiligen System und die Anwendung (Parashos et al. 2004) Einflussfaktoren für prozedurale Fehler sein.

Insgesamt traten bei allen verwendeten Instrumenten Zwischenfälle auf. Abschließend ist zu sagen, dass die Verwendung von maschinellen Systemen für die Revisionsbehandlung im Vergleich zu Handinstrumenten allerdings mit einer höheren Perforations- bzw. Frakturrate assoziiert ist.

7 Schlussfolgerungen

1. Keine der verwendeten Revisionstechniken führte zur vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials.
2. Handinstrumente sind genauso effektiv wie maschinelle Systeme.
3. Im Vergleich zu den Handinstrumenten wurde mit den beiden maschinellen Systemen die Arbeitslänge signifikant schneller erreicht.
4. Die für die vollständige Revision benötigte Arbeitszeit war mit PTUR- und Reciproc-Instrumenten signifikant kürzer als mit Hedström-Feilen.
5. Handinstrumente entfernten signifikant mehr Dentin als PTUR, der Unterschied zu Reciproc war nicht signifikant.
6. In allen Gruppen konnte eine apikale Extrusion von Debris festgestellt werden.
7. Bei beiden maschinellen Systemen wurde eine Frakturnrate von jeweils 5% ermittelt. In der PTUR-Gruppe traten in 15% der Fälle Perforationen auf. Handinstrumente führten zu keinen prozeduralen Fehlern.
8. Das Ein-Feilen-System (Reciproc) ist genauso effektiv wie das speziell für die Revision entwickelte Mehr-Feilen-System (PTUR).
9. Die Arbeitsweise, ob reziprok oder konventionell rotierend, hat keinen Einfluss auf die Effektivität bei der Revisionsbehandlung an gekrümmten Molaren.

8 Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, die Effektivität und Arbeitssicherheit von rotierend und reziprok arbeitenden Nickel-Titan- und Handinstrumenten in gekrümmten Wurzelkanälen mit Hilfe von Mikro-CT-Aufnahmen zu untersuchen.

Insgesamt wurden für diese Untersuchung 109 extrahierte menschliche Ober- und Unterkiefer-Molaren gesammelt. Nach röntgenologischer Bestimmung der Krümmungswinkel und -radien in zwei Ebenen wurden die gekrümmten Wurzelkanäle mit FlexMaster präpariert und mit *sealer* und Guttapercha mittels lateraler Kompaktion obturiert. Die Einteilung der 60 für diese Untersuchung geeigneten Wurzelkanäle erfolgte anhand von fünf Parametern auf drei homogene Gruppen ($n = 20$). Die Revision wurde entweder mit Reciproc, ProTaper Universal Retreat/ProTaper oder mit Hedström-Feilen durchgeführt. Anhand prä- und postoperativer Mikro-CT-Scans wurden die Volumina des Dentins und des Wurzelkanalfüllmaterials bestimmt. Anschließend wurden der Dentinabtrag und der Anteil des verbliebenen Füllmaterials berechnet, zusätzlich wurden die Arbeitszeiten und prozedurale Fehler notiert.

Mit keiner der verwendeten Revisionstechniken wurde das Wurzelkanalfüllmaterial vollständig entfernt. Im Durchschnitt verblieben 5,1 - 8,3% des Füllmaterials. Hedström-Feilen waren genauso effektiv wie Reciproc- und PTUR-Instrumente. Ihre Anwendung führte allerdings zu einem signifikant höheren Dentinabtrag im Vergleich zu PTUR ($p < 0,05$). Zwischen Hedström-Feilen und Reciproc war der Unterschied statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$). Beide maschinellen Systeme arbeiten signifikant schneller als Handinstrumente ($p = 0,0001$). Die Anwendung von Handinstrumenten führte zu keinen prozeduralen Fehlern wie Instrumentenfrakturen oder Perforationen. Es traten zwei Instrumentenfrakturen bei den maschinellen Systemen auf (jeweils 5%). Die Verwendung von PTUR-Instrumenten führte bei drei Proben (15%) zu einer koronalen Perforation des Wurzelkanals.

Das Wurzelkanalfüllmaterial konnte in keiner experimentellen Gruppe vollständig entfernt werden. Während der Revision entfernten Handinstrumente mehr Dentin verglichen zu rotierend oder reziprok arbeitenden Instrumenten. Sowohl Ein- als auch Mehr-Feilen-Systeme eignen sich für die Revisionsbehandlung und entfernen das Wurzelkanalfüllmaterial innerhalb weniger Minuten. Allerdings ist die Anwendung von maschinellen Systemen mit einer höheren Frakturrate assoziiert. Mit keiner der verwendeten Revisionsmethoden wurde eine apikale Extrusion von Debris vermieden.

9 Anhang

Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt eine Zusammenfassung der Gruppeneinteilung, der Mittelwerte für die Krümmungswinkel und -radien, der prä- und postoperative Volumina des Dentins und des Wurzelkanalfüllmaterials sowie der Arbeitszeiten und der prozeduralen Fehler. Die Datenerhebung erfolgte durch zwei kalibrierte Untersucher.

Zahn	Gruppe	Winkel1 [°]	Radius1 [mm]	Winkel2 [°]	Radius2 [mm]	Dentin prä [mm³]	Dentin post [mm³]	Abtrag [mm³]	WKf prä [mm³]	WKf post [mm³]	Vol.WKf [%]	Reste [s]	T1 [s]	T2 [s]	Tgesamt [s]	Debris	Zwischenfälle
5	1	32,884873	5,252795	6,77311	25,235193	225,679	219,756	5,923	4,051	0,149	3,678104172	356	256	612			
7	1	20,023339	11,17494	7,227654	23,933381	257,929	255,2105	2,7185	7,584	0,275	3,626054852	202	96	298			
36	1	28,586209	5,305251	22,639792	7,306626	216,0295	211,18	4,8495	4,134	0,164	3,96710208	245	157	402	ja		
39	1	29,808695	8,203063	16,670794	12,750098	234,6825	228,7645	5,918	2,952	0,123	4,166666667	204	232	436			
42	1	25,800131	5,188692	5,834351	23,946882	308,887	303,3495	5,5375	6,108	0,131	2,144728225	170	153	323			
52	1	20,474717	11,75997	8,140836	26,779025	369,6925	362,7605	6,932	10,201	0,687	6,734633859	139	339	478			
58	1	21,354607	10,25786	11,002493	20,907675	441,135	433,607	7,528	3,8625	0,468	12,11650485	147	300	447			
59	1	26,996984	9,058465	12,407402	16,38024	369,7385	363,5215	6,217	3,323	0,14	4,213060488	248	237	485			
67	1	32,618106	5,876251	19,309671	8,246502	396,0675	387,155	8,9125	2,733	0,172	6,293450421	269	393	662			
70	1	20,762696	11,51533	8,141485	24,47461	302,9515	296,8595	6,092	6,46	0,087	1,346749226	110	162	372			
71	1	27,719134	8,182366	12,487782	17,593804	285,595	277,4895	8,1055	3,575	0,467	13,06293706	103	214	317	ja		
72	1	29,932098	4,815732	22,633277	6,271976	371,4375	365,0655	6,372	4,09	0,162	3,960880196	312	471	783	ja		
80	1	23,636605	7,571529	7,572092	18,214815	310,644	305,869	4,775	4,673	0,028	0,599186818	144	118	262			
83	1	20,485885	9,934926	16,789653	13,480646	330,035	324,6195	5,4155	2,693	0,103	3,824730784	162	260	422			
91	1	35,728346	7,420676	2,466333	98,253411	266,191	254,253	11,938	4,49	0,384	8,55233853	270	229	499			
92	1	21,604733	9,925333	30,759008	7,651113	383,9225	381,133	2,7895	8,917	0,561	6,291353594	190	178	368	ja		
93	1	24,028495	5,354146	13,869713	10,016689	253,665	244,057	9,608	3,51	0,004	0,113960114	153	299	452	ja		
95	1	26,573467	7,839208	17,623084	10,142036	403,5975	395,8465	7,751	3,691	0,021	5,668951504	230	243	473	ja		
99	1	20,073972	8,077196	8,082512	23,377795	341,2225	335,7665	5,456	5,942	0,117	1,969033995	114	390	504			
104	1	22,812116	8,764865	3,895122	37,594953	306,746	300,4455	6,3005	2,432	0,362	14,88486842	264	293	557			
2	2	29,15015	6,386634	5,218836	24,172762	238,271	233,5395	4,7315	4,1	0,38	9,268292683	93	77	170			
18	2	20,172501	11,88115	16,622847	11,849216	274,715	269,5465	5,1685	4,276	0,297	6,945743686	56	63	119			
21	2	25,364655	8,464627	8,304356	18,867959	286,6355	280,8605	5,775	7,63	0,09	1,179554391	80	35	115			Fraktur
26	2	27,712006	8,092811	10,452046	17,302271	355,26	351,4025	3,8575	2,978	0,105	3,525856279	60	68	128			
33	2	20,7139	7,180156	15,351254	11,202977	299,6475	297,8205	1,827	5,445	0,405	7,438016529	51	51	102			
38	2	22,764264	9,0021	6,418222	22,313015	188,5625	185,572	2,9905	4,239	0,21	4,953998585	48	51	99	ja		
43	2	32,340442	5,492286	13,073982	23,555025	285,799	282,481	3,318	5,646	0,074	1,310662416	48	44	92			
47	2	31,1199	8,678274	10,289546	40,600931	265,3575	260,394	4,9635	5,212	0,827	15,86722947	96	83	179	ja		
61	2	23,678154	9,039478	12,336687	16,114891	288,3705	283,129	5,2415	5,62	0,141	2,508896797	70	51	121			Perforation
62	2	32,380215	6,706908	7,879672	29,145691	304,951	300,2685	4,6825	5,729	0,929	16,21574446	89	51	140	ja		
69	2	26,721828	9,188691	19,908526	11,403072	327,9235	321,262	6,6615	3,217	0,14	4,351880634	67	48	115			
74	2	20,58064	8,116709	2,960081	55,322505	241,341	238,4585	2,8825	6,768	0,17	2,511820331	61	75	136			
75	2	23,565828	7,399785	4,461152	44,087824	204,5965	201,301	3,2955	2,08	0,168	8,076923077	61	70	131			Perforation
78	2	25,64976	5,38717	17,114065	7,549099	452	448,7515	3,2485	5,812	0,097	1,668960771	68	48	116			
84	2	20,406093	9,183813	21,040634	6,06462	286,039	283,0755	2,9635	2,5935	0,107	4,125698863	43	42	85			
88	2	26,885061	9,314924	16,73784	12,792565	342,6385	337,64	4,9985	2,417	0,083	3,434009102	70	51	121			
90	2	21,181445	9,722075	5,699932	29,195482	276,3215	271,314	5,0075	6,765	0,547	8,085735403	84	56	140			
101	2	23,598147	9,253931	19,955512	9,971094	332,778	326,0625	6,7155	4,201	0,4115	9,795286836	49	41	90	ja		
102	2	28,298294	5,975858	23,186025	7,703444	339,549	332,032	7,517	3,038	0,287	9,447004608	80	55	135	ja		Perforation
103	2	26,432572	7,81847	12,769205	14,955721	346,712	339,056	7,656	3,312	0,246	7,427536232	47	53	100			
1	3	23,287074	7,769948	9,548296	14,045022	239,22	234,2465	4,9735	8,167	0,449	5,497734786	100	48	148	ja		
3	3	20,221661	6,570949	8,139756	22,649183	184,1115	181,295	2,8165	9,232	0,685	7,419844021	105	45	150			
10	3	25,054759	7,774041	9,880898	20,356462	257,1435	251,711	5,4325	3,048	0,225	7,381889764	70	47	117			
11	3	26,472888	9,188699	22,483549	11,501513	343,256	335,014	8,242	5,139	0,999	19,43957968	65	73	138			
12	3	34,727491	6,237743	11,995301	12,585717	359,9225	352,7135	7,209	3,627	0,195	5,376344086	87	57	144			
14	3	20,063646	9,772645	11,332086	13,245858	233,424	230,829	2,595	6,634	0,498	7,506783238	97	24	121			
17	3	30,031815	9,659925	15,577891	14,004099	385,18	374,5895	10,591	4,005	0,655	16,3545568	42	63	105			
23	3	22,663108	7,98753	11,326015	13,953439	314,5065	308,211	6,2955	2,055	0,099	4,817518248	62	47	109			
24	3	21,566068	8,12197	13,175786	13,045181	273,5715	269,2975	4,274	3,105	0,048	1,54589372	62	36	98			
31	3	28,428053	6,577227	2,491796	66,190976	135,0305	130,509	4,5215	2,837	0,041	1,445188579	93	37	130			
34	3	27,254119	9,168565	24,7536	9,522823	300,6395	295,4205	5,219	2,982	0,222	7,444668008	62	32	94			
46	3	30,232054	8,480032	5,34049	35,945209	314,675	310,442	4,233	8,273	0,824	9,960111205	97	58	155			
48	3	22,333196	10,49118	8,986565	25,082866	259,071	255,297	3,774	4,904	0,073	1,48858075	83	29	112	ja		
51	3	28,533229	6,946241	5,004517	32,989156	317,8975	313,3015	4,596	3,595	0,674	18,74826147	100	51	151	ja		
73	3	20,349899	8,256876	8,738676	17,087652	273,7115	271,4365	2,275	4,505	0,3285	7,291897891	65	32	97			
77	3	25,840781	8,480072	7,673394	27,948712	348,1695	342,284	5,8855	2,664	0,21	7,882882883	70	29	99			
79	3	28,311363	4,066757	14,703335	6,09607	271,6625	267,418	4,2445	5,806	0,007	0,120564933	130	20	150			Fraktur
100	3	20,882782	8,701035	14,02359	15,163576	313,291	309,5875	3,7035	7,064	0,877	12,41506229	99	66	165	ja		
105	3	27,394744	7,226859	18,125981	10,293719	297,97	294,2425	3,7275	4,401	0,094	2,135878209	64	33	97			
109	3	24,28055	6,083995	18,343442	12,014401	271,658	265,833	5,825	3,275	0,72	21,98473282	75	45	120			

Abbildung 23: Zusammenfassung der Gruppeneinteilung und Datenerhebung (Gruppe 1: Hedström-Feilen, Gruppe 2: ProTaper Universal Retreatment/ProTaper, Gruppe 3: Reciproc)

10 Literaturverzeichnis

Abramovitz I, Relles-Bonar S, Baransi B, Kfir A (2012): The effectiveness of a self-adjusting file to remove residual gutta-percha after retreatment with rotary files. *Int Endod J* 45, 386–392

Alapati SB, Brantley WA, Iijima M, Clark WAT, Kovarik L, Buie C, Liu J, Ben Johnson W (2009): Metallurgical characterization of a new nickel-titanium wire for rotary endodontic instruments. *J Endod* 35, 1589–1593

Al-Hadlaq SMS, Aljarbou FA, AlThumairy RI (2010): Evaluation of cyclic flexural fatigue of M-wire nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 36, 305–307

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

Amoroso-Silva PA, Ordinola-Zapata R, Duarte MAH, Gutmann JL, del Carpio-Perochena A, Bramante CM, Moraes IG de (2015): Micro-computed tomographic analysis of mandibular second molars with c-shaped root canals. *J Endod* 41, 890–895

Bago I, Suk M, Katić M, Gabrić D, Anić I (2019): Comparison of the effectiveness of various rotary and reciprocating systems with different surface treatments to remove gutta-percha and an epoxy resin-based sealer from straight root canals. *Int Endod J* 52, 105–113

Başer Can ED, Keleş A, Aslan B (2017): Micro-CT evaluation of the quality of root fillings when using three root filling systems. *Int Endod J* 50, 499–505

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

Bernardes RA, Duarte MAH, Vivan RR, Alcalde MP, Vasconcelos BC, Bramante CM (2016): Comparison of three retreatment techniques with ultrasonic activation in flattened canals using micro-computed tomography and scanning electron microscopy. *Int Endod J* 49, 890–897

Betti LV, Bramante CM (2001): Quantec SC rotary instruments versus hand files for gutta-percha removal in root canal retreatment. *Int Endod J* 34, 514–519

Bruker microCT: SkyScan 1272. High-Resolution X-Ray Microtomograph, Kontich, Belgien 2013

Burghardt AJ, Link TM, Majumdar S (2011): High-resolution computed tomography for clinical imaging of bone microarchitecture. *Clin Orthop Relat Res* 469, 2179–2193

- Bürklein S, Schäfer E (2012): Apically extruded debris with reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems. *J Endod* 38, 850–852
- Bürklein S, Hinschitzka K, Dammaschke T, Schäfer E (2012): Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *Int Endod J* 45, 449–461
- Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2014): Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J* 47, 405–409
- Çanakçı BC, Ustun Y, Er O, Genc Sen O (2016): Evaluation of apically extruded debris from curved root canal filling removal using 5 Nickel-Titanium Systems. *J Endod* 42, 1101–1104
- Castelló-Escrivá R, Alegre-Domingo T, Faus-Matoses V, Román-Richon S, Faus-Llácer VJ (2012): In vitro comparison of cyclic fatigue resistance of ProTaper, WaveOne, and Twisted Files. *J Endod* 38, 1521–1524
- Chércoles-Ruiz A, Sánchez-Torres A, Gay-Escoda C (2017): Endodontics, endodontic retreatment, and apical surgery versus tooth extraction and implant placement: a systematic review. *J Endod* 43, 679–686
- Dagna A, Poggio C, Beltrami R, Colombo M, Chiesa M, Bianchi S (2014): Cyclic fatigue resistance of OneShape, Reciproc, and WaveOne: An in vitro comparative study. *J Conserv Dent* 17, 250–254
- DGZMK (2001): Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen. Stellungnahme DGZMK V 1.0 Stand 11/00. *Dtsch Zahnärztl Z* 56, 206–207
- DGZMK (2004): Revision einer Wurzelkanalbehandlung: Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und der DGZ V 3.0. *Dtsch Zahnärztl Z* 59, 242–243
- 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
- Duncan HF, Chong BS (2010): Non-surgical retreatment: experimental studies on the removal of root filling materials. *ENDO* 4, 111–126
- Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Seibert U, Schaller S, Kalender W (1999): Mikro-CT. Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur. *Radiologe* 39, 203–212
- ESE (2006): Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 39, 921–930
- Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW (1984): Practical cone-beam algorithm. *J Opt Soc Am A* 1, 612

- Ferreira JJ, Rhodes JS, Ford TR (2001): The efficacy of gutta-percha removal using ProFiles. *Int Endod J* 34, 267–274
- Fidler A (2014): Kinematics of 2 reciprocating endodontic motors: the difference between actual and set values. *J Endod* 40, 990–994
- Friedman S (2002): Considerations and concepts of case selection in the management of post-treatment endodontic disease (treatment failure). *Endod Topics* 1, 54–78
- Friedman S, Rotstein I, Shar-Lev S (1989): Bypassing gutta-percha root fillings with an automated device. *J Endod* 15, 432–437
- Friedman S, Stabholz A, Tamse A (1990): Endodontic retreatment - case selection and technique. 3. Retreatment techniques. *J Endod* 16, 543–549
- Fruchi LdC, Ordinola-Zapata R, Cavenago BC, Hungaro Duarte MA, Bueno CEdeS, Martin AS de (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
- Gagliardi J, Versiani MA, Sousa-Neto MD de, Plazas-Garzon A, Basrani B (2015): Evaluation of the shaping characteristics of ProTaper Gold, ProTaper Next, and ProTaper Universal in curved canals. *J Endod* 41, 1718–1724
- Gambarini G (2001): Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after prolonged clinical use. *Int Endod J* 34, 386–389
- Gambarini G, Grande NM, Plotino G, Somma F, Garala M, Luca M de, Testarelli L (2008): Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium instruments produced by new manufacturing methods. *J Endod* 34, 1003–1005
- Gao Y, Shotton V, Wilkinson K, Phillips G, Johnson WB (2010): Effects of raw material and rotational speed on the cyclic fatigue of ProFile Vortex rotary instruments. *J Endod* 36, 1205–1209
- Gergi R, Sabbagh C (2007): Effectiveness of two nickel-titanium rotary instruments and a hand file for removing gutta-percha in severely curved root canals during retreatment: an ex vivo study. *Int Endod J* 40, 532–537
- Gorni FGM, Gagliani MM (2004): The outcome of endodontic retreatment: a 2-yr follow-up. *J Endod* 30, 1–4
- Grass M, Koppe R, Klotz E, Proksa R, Kuhn MH, Aerts H, Beek J op de, Kemkers R (1999): Three-dimensional reconstruction of high contrast objects using C-arm image intensifier projection data. *Comput Med Imaging Graph* 23, 311–321
- Gu L-S, Ling J-Q, Wei X, Huang X-Y (2008): Efficacy of ProTaper Universal rotary retreatment system for gutta-percha removal from root canals. *Int Endod J* 41, 288–295

- Gutmann JL, Gao Y (2012): Alteration in the inherent metallic and surface properties of nickel-titanium root canal instruments to enhance performance, durability and safety: a focused review. *Int Endod J* 45, 113–128
- Haïkel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C (1999): Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 25, 434–440
- Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2008): Three-dimensional evaluation of effectiveness of hand and rotary instrumentation for retreatment of canals filled with different materials. *J Endod* 34, 1370–1373
- Hausdörfer T: Die Effizienz von D-RaCe- und ProTaper-Universal-Retreatment-Nickel-Titan-Instrumenten und Handfeilen bei der Entfernung von Guttapercha aus gekrümmten Wurzelkanälen. Eine Micro-Computertomografie-Studie. Med. Diss. Göttingen 2012
- He J, White RK, White CA, Schweitzer JL, Woodmansey KF (2017): Clinical and patient-centered outcomes of nonsurgical root canal retreatment in first molars using contemporary techniques. *J Endod* 43, 231–237
- Horvath SD, Altenburger MJ, Naumann M, Wolkewitz M, Schirrmeister JF (2009): Cleanliness of dentinal tubules following gutta-percha removal with and without solvents: a scanning electron microscopic study. *Int Endod J* 42, 1032–1038
- Huang X, Ling J, Wei X, Gu L (2007): Quantitative evaluation of debris extruded apically by using ProTaper Universal Tulsa rotary system in endodontic retreatment. *J Endod* 33, 1102–1105
- Hülsmann M: Endodontie: Checklisten der Zahnmedizin. 1. Auflage; Thieme, Stuttgart 2008
- Hülsmann M, Bluhm V (2004): Efficacy, cleaning ability and safety of different rotary NiTi instruments in root canal retreatment. *Int Endod J* 37, 468–476
- Hülsmann M, Drebenstedt S, Holscher C (2011): Shaping and filling root canals during root canal re-treatment. *Endod Topics* 19, 74–124
- International Organization for Standardization (2008): ISO 3630-1.
<https://www.iso.org/standard/37702.html>
- Jorgensen B, Williamson A, Chu R, Qian F (2017): The efficacy of the WaveOne reciprocating file system versus the ProTaper Retreatment system in endodontic retreatment of two different obturating techniques. *J Endod* 43, 1011–1013
- Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ (1965): The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 20, 340–349
- Kalender WA: Computertomographie: Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen. 2. überarb. und erw. Auflage; Publicis Corporate Publishing, Erlangen 2006

- Kampschulte M, Langheinirch AC, Sender J, Litzlbauer HD, Althöhn U, Schwab JD, Alexandre-Lafont E, Martels G, Krombach GA (2016): Nano-computed tomography: technique and applications. *Rofo* 188, 146–154
- Kaşıkçı Bilgi I, 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
- Kim H-C, Yum J, Hur B, Cheung GS-P (2010): Cyclic fatigue and fracture characteristics of ground and twisted nickel-titanium rotary files. *J Endod* 36, 147–152
- Kim H-C, Kwak S-W, Cheung GS-P, Ko D-H, Chung S-M, Lee W (2012): Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endod* 38, 541–544
- Krammer J, Schlepper H: *VDW-Handbuch Endodontisches Instrumentarium*. 5. Auflage; Vereinigte Dentalwerke, München 1990
- Ladley RW, Campbell AD, Hicks ML, Li S-H (1991): Effectiveness of halothane used with ultrasonic or hand instrumentation to remove gutta-percha from the root canal. *J Endod* 17, 221–224
- Langeland K, Dowden WE, Tronstad L, Langeland LK (1971): Human pulp changes of iatrogenic origin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 32, 943–980
- Li G-H, Niu L-N, Selem LC, Eid AA, Bergeron BE, Chen J-H, Pashley DH, Tay FR (2014): Quality of obturation achieved by an endodontic core-carrier system with crosslinked gutta-percha carrier in single-rooted canals. *J Dent* 42, 1124–1134
- Ma J, Al-Ashaw AJ, Shen Y, Gao Y, Yang Y, Zhang C, Haapasalo M (2012): Efficacy of ProTaper Universal Rotary Retreatment system for gutta-percha removal from oval root canals: a micro-computed tomography study. *J Endod* 38, 1516–1520
- Martins MP, Duarte MAH, Cavenago BC, Kato AS, da Silveira Bueno CE (2017): Effectiveness of the ProTaper Next and Reciproc systems in removing root canal filling material with sonic or ultrasonic irrigation: a micro-computed tomographic study. *J Endod* 43, 467–471
- Möller AJ, Fabricius L, Dahlén G, Ohman AE, Heyden G (1981): Influence on periapical tissues of indigenous oral bacteria and necrotic pulp tissue in monkeys. *Scand J Dent Res* 89, 475–484
- 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 PN (2006): On the causes of persistent apical periodontitis: a review. *Int Endod J* 39, 249–281
- Nair PN, Sjögren U, Figdor D, Sundqvist G (1999): Persistent periapical radiolucencies of root-filled human teeth, failed endodontic treatments, and periapical scars. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 87, 617–627
- Nevares G, Albuquerque DS de, Freire LG, Romeiro K, Fogel HM, Dos Santos M, Cunha RS (2016): Efficacy of ProTaper Next compared with Reciproc in removing obturation material from severely curved root canals: a micro-computed tomography study. *J Endod* 42, 803–808
- Ng Y-L, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2008): Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature - part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J* 41, 6–31
- Ng Y-L, Mann V, Gulabivala K (2011): A prospective study of the factors affecting outcomes of non-surgical root canal treatment: part 2: tooth survival. *Int Endod J* 44, 610–625
- Oliveira DPd, Barbizam JVB, Trope M, Teixeira FB (2006): Comparison between gutta-percha and resilon removal using two different techniques in endodontic retreatment. *J Endod* 32, 362–364
- Parashos P, Messer HH (2006): Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. *J Endod* 32, 1031–1043
- Parashos P, Gordon I, Messer HH (2004): Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. *J Endod* 30, 722–725
- Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G (2009): A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 35, 1469–1476
- Plotino G, Giansiracusa Rubini A, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G (2014): Cutting efficiency of Reciproc and waveOne reciprocating instruments. *J Endod* 40, 1228–1230
- Plotino G, Grande NM, Porciani PF (2015): Deformation and fracture incidence of Reciproc instruments: a clinical evaluation. *Int Endod J* 48, 199–205
- Rechenberg DK, 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
- Reeves R, Stanley HR (1966): The relationship of bacterial penetration and pulpal pathosis in carious teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 22, 59–65
- Ricucci D, Siqueira JF (2010): Biofilms and apical periodontitis: study of prevalence and association with clinical and histopathologic findings. *J Endod* 36, 1277–1288

- Rios MdA, Villela AM, Cunha RS, Velasco RC, Martin AS de, Kato AS, Bueno CE dS (2014): Efficacy of 2 reciprocating systems compared with a rotary retreatment system for gutta-percha removal. *J Endod* 40, 543–546
- Rödig T, Hausdörfer T, Konietschke F, Dullin C, Hahn W, Hülsmann M (2012): Efficacy of D-RaCe and ProTaper Universal Retreatment NiTi instruments and hand files in removing gutta-percha from curved root canals - a micro-computed tomography study. *Int Endod J* 45, 580–589
- Rödig T, Kupis J, Konietschke F, Dullin C, Drebenstedt S, Hülsmann M (2014): Comparison of hand and rotary instrumentation for removing gutta-percha from previously treated curved root canals: a microcomputed tomography study. *Int Endod J* 47, 173–182
- Rödig T, Wagner J, Wiegand A, Rizk M (2018): Efficacy of the ProTaper retreatment system in removing Thermafil, GuttaCore or vertically compacted gutta-percha from curved root canals assessed by micro-CT. *Int Endod J* 51, 808–815
- Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S (2010): Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *Int Endod J* 43, 200–209
- Rubinstein RA, Kim S (1999): Short-term observation of the results of endodontic surgery with the use of a surgical operation microscope and super-EBA as root-end filling material. *J Endod* 25, 43–48
- Saad AY, Al-Hadlaq SM, Al-Katheeri NH (2007): Efficacy of two rotary NiTi instruments in the removal of gutta-percha during root canal retreatment. *J Endod* 33, 38–41
- Sae-Lim V, Rajamanickam I, Lim BK, Lee HL (2000): Effectiveness of ProFile .04 taper rotary instruments in endodontic retreatment. *J Endod* 26, 100–104
- Sağlam BC, Koçak MM, Türker SA, Koçak S (2014): Efficacy of different solvents in removing gutta-percha from curved root canals: a micro-computed tomography study. *Aust Endod J* 40, 76–80
- Salzgeber RM, Brilliant JD (1977): An in vivo evaluation of the penetration of an irrigating solution in root canals. *J Endod* 3, 394–398
- Schäfer E: Struktur der Pulpa und ihre Erkrankungsformen. In: Heidemann D (Hrsg.): *Endodontie*. 4. Auflage; Elsevier, Urban & Fischer, München 2005, 2–24
- Schäfer E, Diez C, Hoppe W, Tepel J (2002): Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. *J Endod* 28, 211–216
- Schäfer E, Schrenker C, Zupanc J, Bürklein S (2016): Percentage of gutta-percha filled areas in canals obturated with cross-linked gutta-percha core-carrier systems, single-cone and lateral compaction technique. *J Endod* 42, 294–298

- Schirrmeister JF, Meyer KM, Hermanns P, Altenburger MJ, Wrbas K-T (2006a): Effectiveness of hand and rotary instrumentation for removing a new synthetic polymer-based root canal obturation material (Epiphany) during retreatment. *Int Endod J* 39, 150–156
- Schirrmeister JF, Hermanns P, Meyer KM, Goetz F, Hellwig E (2006b): Detectability of residual Epiphany and gutta-percha after root canal retreatment using a dental operating microscope and radiographs-an ex vivo study. *Int Endod J* 39, 558–565
- Schirrmeister JF, Wrbas K-T, Meyer KM, Altenburger MJ, Hellwig E (2006c): Efficacy of different rotary instruments for gutta-percha removal in root canal retreatment. *J Endod* 32, 469–472
- Schneider SW (1971): A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 32, 271–275
- Shen Y, Zhou H-m, Zheng Y-f, Peng B, Haapasalo M (2013): Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments. *J Endod* 39, 163–172
- Silva EJNL, Belladonna FG, Carapiá MF, Muniz BL, Rocha MS, Moreira EJL (2018): Micro-computed tomographic evaluation of canal retreatments performed by undergraduate students using different techniques. *Restor Dent Endod* 43, e5
- 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
- Siqueira JF (2001): Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail. *Int Endod J* 34, 1–10
- Siqueira JF, Rôças IN (2014): Present status and future directions in endodontic microbiology. *Endod Topics* 30, 3–22
- Sjögren U, Hägglund B, Sundqvist G, Wing K (1990): Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *J Endod* 16, 498–504
- Sjögren U, Sundqvist G, Nair PN (1995): Tissue reaction to gutta-percha particles of various sizes when implanted subcutaneously in guinea pigs. *Eur J Oral Sci* 103, 313–321
- Solomonov M, Paqué F, Kaya S, Adigüzel O, Kfir A, Yiğit-Özer S (2012): Self-adjusting files in retreatment: a high-resolution micro-computed tomography study. *J Endod* 38, 1283–1287
- Stabholz A, Friedman S (1988): Endodontic retreatment - case selection and technique. Part 2: Treatment planning for retreatment. *J Endod* 14, 607–614
- Swain MV, Xue J (2009): State of the art of Micro-CT applications in dental research. *Int J Oral Sci* 1, 177–188

- Taşdemir T, Er K, Yildirim T, Celik D (2008): Efficacy of three rotary NiTi instruments in removing gutta-percha from root canals. *Int Endod J* 41, 191–196
- Tay FR, Pashley DH, Williams MC, Raina R, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, King NM (2005): Susceptibility of a polycaprolactone-based root canal filling material to degradation. I. Alkaline hydrolysis. *J Endod* 31, 593–598
- Ünal GÇ, Üreyen Kaya B, Taç AG, Keçeci AD (2009): A comparison of the efficacy of conventional and new retreatment instruments to remove gutta-percha in curved root canals: an ex vivo study. *Int Endod J* 42, 344–350
- Vertucci FJ (1984): Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 58, 589–599
- Wennberg A, Ørstavik D (1989): Evaluation of alternatives to chloroform in endodontic practice. *Endod Dent Traumatol* 5, 234–237
- Wilcox LR, Juhlin JJ (1994): Endodontic retreatment of Thermafil versus laterally condensed gutta-percha. *J Endod* 20, 115–117
- Wolcott JF, van Himel T, Hicks ML (1999): Thermafil retreatment using a new “system B” technique or a solvent. *J Endod* 25, 761–764
- Wu M-K, Dummer PMH, Wesselink PR (2006): Consequences of and strategies to deal with residual post-treatment root canal infection. *Int Endod J* 39, 343–356
- Xu T, Tay FR, Gutmann JL, Fan B, Fan W, Huang Z, Sun Q (2016): Micro-computed tomography assessment of apical accessory canal morphologies. *J Endod* 42, 798–802
- Ye J, Gao Y (2012): Metallurgical characterization of M-Wire nickel-titanium shape memory alloy used for endodontic rotary instruments during low-cycle fatigue. *J Endod* 38, 105–107
- 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
- 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

Frau Prof. Dr. med. dent. Annette Wiegand, Direktorin der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen, gilt mein Dank für die motivierende Unterstützung während der Erstellung dieser Dissertation.

Mein besonderer Dank gilt Frau Oberärztin PD Dr. med. dent. Tina Rödiger aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Göttingen für die Überlassung des Dissertationsthemas und für die engagierte und sorgfältige Betreuung dieser Arbeit.

Danken möchte ich Herrn Dr. sc. hum. Christian Dullin aus der Abteilung für Diagnostische Radiologie der Universitätsmedizin Göttingen für die Einweisung am Mikro-CT.

Herrn PD Dr. rer. nat. Frank Konietschke von der University of Texas in Dallas möchte ich für seine Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse danken.