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

Vergleichende *In-vitro*-Studie zur maschinellen
Wurzelkanalpräparation mit den NiTi-Single-File-Systemen
RECIPROC[®], Wave One[™] und One Shape[®]

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

vorgelegt von
Sandra Hiller
aus
Wernigerode

Göttingen 2014

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. H. K. Kroemer

I. Berichterstatter: Prof. Dr. Michael Hülsmann

II. Berichterstatterin: PD Dr. Sabine Sennhenn-Kirchner

Promotor: Prof. Dr. Martin Oppermann

Tag der mündlichen Prüfung: 14.04.2015

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1. Einleitung	1
2. Ziele der Arbeit	3
3. Grundlagen	4
3.1 Wurzelkanalpräparation	4
3.1.2 Definition und Indikation der Wurzelkanalbehandlung	4
3.2 Arbeitsschritte der Wurzelkanalpräparation	4
3.2.1 Formgebung	5
3.2.2 Reinigung und Desinfektion	5
3.2.3 Gekrümmte Wurzelkanäle	6
3.2.4 Präparationstechniken	6
3.2.5 Präparationsfehler und ihre Prävention	8
3.3 Die maschinelle Wurzelkanalpräparation	10
3.4 Neuartige NiTi Systeme	13
3.5 Drehmomentbegrenzte Antriebssysteme mit reziproker Programmierung	15
3.6 RECIPROC®	16
3.7 Wave One™	20
3.8 One Shape®	22
4. Material und Methoden	24
4.1 NiTi-Systeme	24
4.2 Auswahl und Vorbereitung der Zähne	24
4.2.1 Das Muffelsystem	25
4.2.2 Herstellung der Versuchskörper	26
4.2.3 Anfertigung der präoperativen Röntgenaufnahmen	27
4.2.4 Bestimmung des präoperativen Krümmungswinkels	28
4.2.5 Bestimmung des präoperativen Krümmungsradius	29
4.2.6 Einteilung in die Versuchsgruppen	30
4.3 Versuchsdurchführung	30
4.3.1 Präparation des mesiobukkalen Wurzelkanals	31
4.3.2 Präparation mit dem System RECIPROC®	32

4.3.3 Präparation mit dem System Wave One™	32
4.3.4 Präparation mit dem System One Shape®	33
4.3.5 Anfertigung der postoperativen Röntgenaufnahmen	33
4.3.6 Vorbereitung der Querschnittsanalyse	33
4.3.7 Präparation des mesiolingualen Kanals	34
4.3.8 Herstellung der Proben für das Rasterelektronenmikroskop	35
4.4 Auswertung und statistische Verfahren	35
4.4.1 Untersuchung der Wurzelkanalbegradigung	36
4.4.2 Auswertung des Wurzelkanalquerschnittes	37
4.4.3 Bewertung der Proben für das Rasterelektronenmikroskop	39
4.4.4 Bewertung der Arbeitszeit	40
4.4.5 Bewertung der Arbeitssicherheit	41
5. Ergebnisse	42
5.1 Wurzelkanalbegradigung und Veränderung des Radius	42
5.2 Veränderungen des Wurzelkanalquerschnittes	46
5.2.1 Qualitative Bewertung der Kanalquerschnittsform	47
5.2.2 Quantitative Bewertung des Kanalquerschnittes	49
5.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Wurzelkanalwand	52
5.3.1 Entfernung von Debris	53
5.3.2 Entfernung des Smear Layers	55
5.4 Arbeitszeit	56
5.5 Arbeitssicherheit	58
6. Diskussion	60
6.1 Diskussion von Material und Methoden	60
6.1.1 Herstellung der Versuchskörper	60
6.1.2 Messung der Wurzelkanalbegradigung und Veränderung des Radius	61
6.1.3 Auswertung der Querschnittsfotografien	62
6.1.4 Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung	62
6.1.5 Bewertung des Zeitaufwandes	63
6.2 Diskussion der Versuchsergebnisse	64
6.2.1 Begradigung der Wurzelkanalkrümmung und Veränderung des Radius	64
6.2.2 Qualitative Bewertung des Wurzelkanalquerschnittes	65
6.2.3 Quantitative Bewertung des Querschnittes	66
6.2.4 Reinigung der Wurzelkanalwand	67

6.2.5 Zeitaufwand.....	69
6.2.6 Arbeitssicherheit.....	70
7. Zusammenfassung	73
8. Literatur	75
9. Anhang	88
9.1 Verwendete Materialien und Geräte	88
9.2 Arbeitsbögen	92
9.2.1 Arbeitsbogen RECIPROC®	92
9.2.2 Arbeitsbogen Wave One™	93
9.2.3 Arbeitsbogen One Shape®	94
9.2.3 Bewertungsbogen Rasterelektronenmikroskop.....	95
9.3 Statistische Auswertung	96

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.2.5.1: Stufenbildung mit Perforation	9
Abb. 3.2.5.2: Apikale Trichterbildung mit Isthmus und Perforation	9
Abb. 3.6.1: Die Feile R25 des RECIPROC®-Systems	17
Abb. 3.7.1: Die Feile „primary“ des Systems Wave One™	20
Abb. 3.8.1: Die Feile One Shape®	23
Abb. 4.2.1.1: Das Muffelsystem geschlossen und geöffnet	25
Abb. 4.2.2.1: Eingebetteter Zahn mit Reamer auf Röntgenlänge	26
Abb. 4.2.3.1: Sensorhalter mit Klammerkreuzen, Fixierungshilfe für Röntgentubus.	27
Abb. 4.2.3.2: Einstellung zur Röntgenaufnahme mit Versuchskörper.....	28
Abb. 4.2.4.1: Bestimmung des Krümmungswinkels nach SCHNEIDER (1971)	29
Abb. 4.2.5.1: Bestimmung des Radius	30
Abb. 4.3.1: Arbeitsabläufe am Beispiel der R25-Feile des RECIPROC®-Systems.....	31
Abb. 4.3.6.1: Herstellung der horizontalen Sägeschnitte	34
Abb. 4.4.1.1: Koordinatensysteme mit definierten Passpunkten im Referenz- und Zielbild...	37
Abb. 4.4.2.1: Beispielbilder eines Querschnittes	38
Abb. 4.4.2.2: Beispielbild eines Sägeschnittes mit zwei exemplarischen Passpunkten.....	39
Abb. 5.1.1: Positives Präparationsergebnis mit dem System RECIPROC®	44
Abb. 5.1.2: Negatives Präparationsergebnis mit dem System RECIPROC®	44
Abb. 5.1.3: Positives Präparationsergebnis mit dem System Wave One™	44
Abb. 5.1.4: Negatives Präparationsergebnis mit dem System Wave One™	44
Abb. 5.1.5: Positives Präparationsergebnis mit dem System One Shape®	45
Abb. 5.1.6: Negatives Präparationsergebnis mit dem System One Shape®	45
Abb. 5.1.7: Winkeldifferenz der mesiobukkalen Kanäle	46
Abb. 5.1.8: Winkeldifferenz der mesiolingualen Kanäle	46
Abb. 5.2.1.1: Verteilung der postoperativen Querschnittsformen der untersuchten Gruppen.	49
Abb. 5.2.2.1: Verteilung des Wandkontakts	50
Abb. 5.2.2.2: Präparationsergebnisse mit dem System RECIPROC®	51
Abb. 5.2.2.3: Präparationsergebnisse mit dem System Wave One™	51
Abb. 5.2.2.4: Präparationsergebnisse mit dem System One Shape®	51
Abb. 5.3.1.1: Häufigkeit der Debris-Scores	54
Abb. 5.3.1.2: Vollständig bedeckte apikale Kanalwand, Debris.....	54
Abb. 5.3.1.3: Saubere koronale Kanalwand.....	55

Abb. 5.3.2.1: Häufigkeit der vergebenen Smear Layer-Scores.....	56
Abb. 5.4.1: Durchschnittliche Instrumentierungszeit der drei untersuchten Systeme	58

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.2.6.1: Präoperative Wurzelkanalkrümmung und Radien.	30
Tab. 5.1.1: Mittlere präoperative Krümmungswinkel und –radien	42
Tab. 5.1.2: Prä- und postop. Krümmungswinkel und -radien der mesiobukkalen Kanäle	43
Tab.: 5.1.3: Prä- und postop. Krümmungswinkel und -radien der mesiolingualen Kanäle	43
Tab. 5.2.1.1: Statistische Ergebnisse der Gruppen des medialen Fragments	47
Tab. 5.2.1.2: Übersicht der postoperativen Querschnittsformen.....	48
Tab. 5.2.2.1: Ergebnisse des Wandkontakts prä- und postoperativer Querschnitte	50
Tab. 5.3.1: Übereinstimmung der vergebenen Scores für Debris	52
Tab. 5.3.2: Übereinstimmung der vergebenen Scores für Smear Layer	53
Tab. 5.3.1.1: Übersicht und Anzahl der Debris-Scores nach Bereichen und Systemen	53
Tab. 5.3.2.1: Übersicht der Smear Layer-Scores nach Bereichen und Systemen	56
Tab. 5.4.1: Mittlere Zeiten der prä-, intra- und postoperativen Arbeitsabschnitte.....	57
Tab. 5.4.2: Instrumentierungszeiten und benötigte Anzahl der Zyklen	58
Tab. 5.5.1: Zwischenfälle in der Übersicht	59
Tab. 5.5.2: Zwischenfälle während der Präparation der mesiobukkalen Kanäle	59
Tab. 5.5.3: Zwischenfälle während der Präparation der mesiolingualen Kanäle.....	59
Tab.: 9.3.1: Wurzelkanalbegradigung: Übersicht der statistischen Auswertung	96
Tab. 9.3.2: Wurzelkanalsauberkeit: Übersicht der statistischen Auswertung.....	96
Tab. 9.3.3: Wurzelkanalquerschnitte: Übersicht der statistischen Auswertung.....	96
Tab. 9.3.4: Wandkontakt: Übersicht der statistischen Auswertung	97
Tab. 9.3.5: Zeitaufwand: Übersicht der statistischen Auswertung.....	97

1. Einleitung

Der Erhalt des eigenen Zahnes in Funktion und Ästhetik ist das oberste Ziel der zahnärztlichen Behandlung. Die Endodontie als Teilgebiet der Zahnmedizin spielt diesbezüglich eine wichtige Rolle: 80-90% der Fälle können erfolgreich therapiert werden (DGZMK 2001). Primär gilt es, ein hohes Maß an Qualität in der Endodontie zu erbringen. Nicht ausschließlich die manuelle Geschicklichkeit des Behandlers führt zum Erfolg, auch das Wissen um die Grundlagen der Entstehung pulpalen Erkrankungen, ihre pathologischen und immunologischen Prozesse, die pharmakologischen Aspekte und die Therapieformen sowie der Materialkunde sind unentbehrlich.

Im Bereich der Endodontie werden immer neue Dental- und Medizinprodukte entwickelt und angeboten, darunter auch Feilensysteme zur Wurzelkanalpräparation. Die Eignung derartiger Systeme muss durch wissenschaftliche Vergleichsuntersuchungen belegt werden, damit sie in der Praxis sinnvoll angewendet und ihre Vorteile genutzt werden können. Die wissenschaftlichen Untersuchungen dienen dabei auch den Herstellern zur Überarbeitung und besseren Abstimmung für die klinische Anwendbarkeit.

Ein deutlicher Fortschritt der endodontischen Behandlungen erfolgte in den letzten Jahren. Besonders im Bereich der maschinellen Systeme kann die Informationslogistik kaum mit den neu erscheinenden Techniken und Feilensystemen Schritt halten. Aufgrund des zunehmenden wirtschaftlichen Drucks in der Zahnarztpraxis werden Instrumentensysteme entwickelt, die den Zeitaufwand der Wurzelkanalpräparation reduzieren sollen. Die Anforderungen an die Instrumente wachsen, und ihre Anzahl innerhalb der Systeme schrumpft. Neuartige sogenannte „Ein-Feilen-Systeme“ erscheinen seit Kurzem auf dem dentalen Markt. Sie sollen die Wurzelkanalpräparation vereinfachen, indem die Instrumentenanzahl auf ein Minimum reduziert wird. So erhält man laut Hersteller eine bessere Übersicht über die Auswahl der Instrumente, und der Zeitaufwand für die Präparation verringert sich. Damit sollen die „Ein-Feilen-Systeme“ deutlich wirtschaftlicher als herkömmliche Systeme sein. Die Hersteller empfehlen eine Ein-Patienten-Anwendung bzw. Einmal-Verwendung (VDW GMBH 2013, DENTSPLY 2013, MICRO MEGA 2013). Unter den Gesichtspunkten der Medizinprodukte-Aufbereitung ist diese Entwicklung zu begrüßen. Dentale Feilen wie die Nickel-Titan-Feilen sind bei der Aufbereitung der Klasse „Kritisch B“ zuzuordnen. Ihre komplexe Gestaltung erschwert die korrekte Aufbereitung, wie sie seit 2012 von der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut (RKI) und dem Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) empfohlen wird. Die

Mehrfachverwendung ist in vielerlei Hinsicht zu unsicher und nicht zu befürworten. AZARPAZHOOH & FILLERY (2008) belegten mögliche Übertragungswege für Prionen in der Zahnarztpraxis durch Kontaktkontamination mit der dentalen Pulpa. KOCH (2010) rät nach Erarbeitung von Dekontaminationsprotokollen ebenfalls von einer Mehrfachverwendung endodontischer Feilen ab. Bei korrekter Durchführung dieser Dekontaminationsprotokolle reduzieren sich die Schneidfrequenz und Fraktursicherheit der Nickel-Titan-Feilen.

Mit der Einführung der „Ein-Feilen-Systeme“ auf dem dentalen Markt kehrte auch die in den 1950er Jahren entwickelte reziproke Arbeitsweise zurück. Die Bewegungstechnik wurde nun zur 4. Generation der Wurzelkanalinstrumente weiterentwickelt. Modifiziertes Feilendesign und Bewegungsmuster verbessern die Eigenschaften der Feilensysteme. Verschiedene Winkel in der Rotationsbewegung haben einen positiven Einfluss auf die Ermüdung der Feilen (GAMBARINI ET AL. 2012).

Vertreter der 4. Generation der NiTi-Instrumente sind die in dieser Studie untersuchten Systeme RECIPROC® und Wave One™. Das System One Shape® ist aufgrund des asymmetrischen Feilendesigns und des vollrotierenden Antriebs bereits der 5. Generation zuzuordnen.

Die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Systeme sollen in dieser Studie genauer untersucht werden.

2. Ziele der Arbeit

In einem *In-vitro*-Versuch sollen unter standardisierten Bedingungen die maschinellen Nickel-Titan-Systeme RECIPROC® (VDW, München, Deutschland), Wave One™ (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland) und One Shape® (Micro-Mega, Besançon, Frankreich) auf ihre klinische Verwendbarkeit hin untersucht werden.

In dieser Studie werden folgende Parameter untersucht:

- Veränderungen des anatomischen Kanalverlaufs durch die Präparation, insbesondere die Begradigung gekrümmter Wurzelkanäle
- qualitative und quantitative Veränderung der Form des Wurzelquerschnittes im apikalen, medialen und koronalen Kanalanteil
- Bewertung der Reinigungsqualität an der Wurzelkanalwand in Bezug auf Smear Layer und Debris
- Arbeitssicherheit, bezogen auf Art und Häufigkeit von Zwischenfällen, wie z.B. Instrumentenfrakturen, apikale Blockaden, Perforationen und Arbeitslängenverlusten
- Zeitaufwand für die Präparation.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen mit Erkenntnissen aus vergleichbaren Studien über andere Nickel-Titan-Systeme verglichen werden.

3. Grundlagen

3.1 Wurzelkanalpräparation

In den folgenden Kapiteln werden die Grundlagen, Anforderungen und Zusammenhänge bei der Präparation des Wurzelkanals betrachtet.

3.1.2 Definition und Indikation der Wurzelkanalbehandlung

Das Fachgebiet der Endodontologie beschreibt die Europäische Gesellschaft für Endodontologie (ESE) als Teilbereich der Zahnmedizin, welcher sich mit der Anatomie, der Form und Funktion sowie der Gesundheit der Pulpa und der periradikulären Gewebe beschäftigt. Die Ätiologie und Pathogenese von Erkrankungen oder Verletzungen beider Gewebe sowie deren Prävention und Therapie sind ebenso Inhalt der Endodontie (ESE 2006).

Die ESE legt spezifische Indikationen fest. Eine Wurzelkanalbehandlung ist indiziert bei:

- Vorliegen einer irreversiblen Entzündung oder Nekrose der Pulpa, die mit oder ohne klinische und/ oder röntgenologische Befunde des periradikulären Gewebes verlaufen können
- einer geplanten intentionellen Devitalisation wie z. B. vor Verankerung eines Wurzelstiftes
- fragwürdigem Zustand der Pulpa vor restaurativen Eingriffen
- einer Fehlstellung des Zahnes mit zu erwartender Eröffnung der Pulpa durch Präparation
- geplanter Hemisektion oder geplanter Wurzelspitzenresektion.

3.2 Arbeitsschritte der Wurzelkanalpräparation

Basis für den Erfolg der endodontischen Therapie ist eine Reduktion der Mikroorganismen im Endodont, die durch die Präparation mit entsprechender Formgebung in Verbindung mit Reinigung und Desinfektion des komplexen Wurzelkanalsystems erreicht werden kann (RÖDIG 2009).

Nach HÜLSMANN ET AL. (2005) sind folgende Punkte bei der Präparation zu berücksichtigen:

- Reinigung des Hauptkanals von vitalem und nekrotischem Gewebe
- Schaffung von ausreichendem Raum für die chemische Desinfektion
- Erhalt der Kanalanatomie; insbesondere der Integrität der apikalen Morphologie
- Vermeiden iatrogenen Schädigung, Irritationen und Infektion des periradikulären Gewebes
- adäquate Gestaltung des Kanals für eine suffiziente Wurzelfüllung
- schonende Bearbeitung des Dentins für den dauerhaften Erhalt der Funktion.

3.2.1 Formgebung

Bis heute gelten im Kern die zur optimalen Formgebung bei der Wurzelkanalpräparation von SCHILDER (1974) aufgestellten Regeln:

- gleichmäßiger konusförmiger Verlauf vom koronalen Zugang bis zum apikalen Foramen
- Einhalten des originalen Kanalverlaufs während der Präparation
- Beibehalten der originalen Position des Foramen apicale
- praktikable, aber möglichst klein gehaltene apikale Öffnung.

3.2.2 Reinigung und Desinfektion

Die Reinigung und Desinfektion des Endodonts tragen grundlegend zum Erfolg der endodontischen Behandlung bei (GU ET AL. 2009). Die mechanische Bearbeitung muss durch antimikrobielle und gewebsauflösende Spülungen unterstützt werden, da ein Teil des Wurzelkanalsystems bei der mechanischen Bearbeitung nicht erreicht wird. Durch den Abtrag von Dentin verbleiben Debris und Smear Layer an den instrumentierten Anteilen der Wurzelkanalwand und obstruieren die Dentinkanälchen. Die Schmierschicht bietet gute Lebensbedingungen für Bakterienkolonien. Nur eine saubere Kanalwand, frei von Auflagerungen, ermöglicht eine dichte Wurzelkanalfüllung (GOLDBERG & ABRAMOVICH 1977).

3.2.3 Gekrümmte Wurzelkanäle

WEINE ET AL. (1976) erkannten die besonderen Ansprüche einer Wurzelkanalpräparation bei Vorliegen einer Wurzelkanalkrümmung. Das grundlegende Problem liegt in der potenziellen Verlagerung des Originalkanals. Dem damit verbundenen möglichen Misserfolg der gesamten endodontischen Behandlung kann durch Beachten einiger präventiver Maßnahmen vorgebeugt werden.

Angestrebt wird ein gleichmäßiger Abtrag des zirkumpulpalen, ggf. bakteriell infizierten, Wurzeldentins. Dieses Ziel lässt sich in Kanälen mit Krümmung nur bedingt realisieren. Der Schwierigkeitsgrad der Präparation ist abhängig von Lage und Ausmaß der Krümmung. Zur Beurteilung teilte SCHNEIDER (1971) die Krümmungen der Wurzelkanäle in drei Klassen ein:

- gerader Kanal, Krümmung $< 5^\circ$
- moderat gekrümmter Kanal, Krümmung zwischen $10-20^\circ$
- stark gekrümmter Kanal, Krümmung zwischen $25-70^\circ$.

PRUETT ET AL. (1997) und HAIKEL ET AL. (1999) erkannten den Radius des Wurzelkanals als Einflussgröße für die Ermüdung der Instrumente. Sie stellten fest, dass mit zunehmendem Radius und kleinerer Wurzelkanalkrümmung die Arbeitszeit der Instrumente bis zur Ermüdungsfraktur anstieg, wobei dem Radius bei der Präparation die wichtigste Bedeutung zukommt. PLOTINO ET AL. (2010) stellten fest, dass die Präparation des apikalen Drittels mit einem kleinen Radius schwieriger ist.

3.2.4 Präparationstechniken

Für die Wurzelkanalpräparation wurden verschiedene Techniken entwickelt. Bei der apikal-koronalen Technik wird zuerst der apikale Bereich vollständig bearbeitet, anschließend erfolgt die koronale Präparation des Kanals. Bei der koronal-apikalen Technik wird der koronale Anteil präpariert und anschließend der apikale Bereich erweitert.

Standardisierte Technik/ „Single-length-Technik“ (apikal-koronal)

Die Standardisierte Technik sieht vor, dass alle Instrumente auf Arbeitslänge in den Wurzelkanal eingebracht werden (INGLE 1961). Die Präparation erfolgt in aufsteigender ISO-Größe der Instrumente. Die Präparation ist mit Erreichen der gewünschten Größe abgeschlossen und besitzt eine leicht konische Form. Ein Nachteil der Technik ist jedoch das

Auftreten von Kanalbegradigungen bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle (HÜLSMANN 2001).

Step-back-Technik (apikal-koronal)

Der apikale Bereich wird um einige ISO-Größen aufbereitet, anschließend werden die weiteren Instrumente in ansteigender ISO-Größe mit um jeweils 1 mm verkürzter Arbeitslänge eingesetzt. Diese Präparationstechnik stellt eine Abwandlung der Standardisierten Technik dar (WEINE ET AL. 1970). Der Vorteil liegt dabei in einer ausgeprägteren Präparation der mittleren und koronalen Anteile. Die Kanalbegradigung kann durch diese Technik reduziert werden, die sich daher zur Präparation gekrümmter Wurzelkanäle eignet. Nach jedem Instrument sollte durch Rekapitulation der Arbeitslänge eine Verblockung des Kanals vermieden werden (HÜLSMANN 2001).

Step-down-Technik (koronal-apikal)

Mit der Step-down-Technik von GOERIG ET AL. (1982) wird die koronale Erweiterung vor der Instrumentierung des apikalen Bereichs zur Entfernung des nekrotischen oder infizierten Debris empfohlen. So soll vermieden werden, dass infiziertes Gewebe über den Apex transportiert wird. Erreicht wird dieses Ziel mit *Gates-Glidden*-Bohrern. Anschließend wird der apikale Anteil des Kanals erweitert. Aufgrund des anschließend geringeren Wandkontakts im koronalen Anteil werden Präparationsfehler im apikalen Bereich verringert (LEEB 1983).

Crown-down-Technik (koronal-apikal)

Die Technik geht auf MARSHALL & PAPPIN (1980) zurück und wurde von MORGAN & MONTGOMERY (1984) erneut publiziert. Analog zu der Step-down-Technik wird ein ausreichender Zugang zum Wurzelkanal geschaffen. Eine Feile der ISO-Größe 35 soll anschließend ohne Druck in den Kanal geschoben werden, bis sie auf Widerstand trifft. Nun wird das Instrument zwei Mal vollständig rotiert. Die Bewegungen geschehen drucklos. Die weitere Präparation erfolgt nun in absteigender ISO-Sequenz. Die Instrumente werden ohne Druck 1 mm tiefer als das vorherige Instrument in den Kanal geschoben und rotiert. Nach Erreichen der Arbeitslänge wird der gesamte Vorgang wiederholt. Diese Technik bietet eine geringere Belastung der Instrumente und verringert die Kanalbegradigung durch die Präparation (RÖDIG 2009).

Balanced-force-Technik

Grundlage dieser Präparationstechnik ist eine rotierende Bewegung. Um diese Technik anzuwenden, werden spezielle Instrumente mit einer nicht schneidenden Instrumentenspitze benötigt (sogenannte Batt-Spitze). 1985 stellten ROANE ET AL. diese Technik vor. Das Instrument wird in den Kanal geführt und um 90° im Uhrzeigersinn gedreht. Anschließend wird das Instrument gegen den Uhrzeigersinn gedreht und bricht dabei das gelöste Dentin von der Kanalwand. Dieser Vorgang erzeugt ein charakteristisches Klicken. Beim Entfernen des Instruments aus dem Kanal erfolgt wieder eine Rotation im Uhrzeigersinn. Dabei werden Dentin-Späne aus dem Kanal befördert. Die Vorteile der Technik liegen in einer guten Zentrierung und somit im Erhalt des natürlichen Verlaufs des Wurzelkanals (LESEBERG & MONTGOMERY 1991, BRISEÑO MARROQUIN ET AL. 1996).

3.2.5 Präparationsfehler und ihre Prävention

Während der Wurzelkanalpräparation können unerwünschte und unvorteilhafte Formveränderungen im Wurzelkanal entstehen. Abhängig vom Ausmaß und der Lage des Präparationsfehlers können eine nachfolgende chirurgische Therapie oder die Extraktion erforderlich werden. Einige Zwischenfälle können durch einfache präventive Maßnahmen vermieden werden. Ein einfaches und effektives Mittel stellt die generelle Verwendung einer K-Feile (*patency file*) der ISO-Größe 10 oder 15 dar (PETERS & PETERS 2010). Sie wird zwischen den Präparationszyklen passiv in den Kanal eingeführt und etwas über das apikale Foramen hinaus geschoben. So soll eine Anhäufung von Dentin-Spänen verhindert werden. Der Kanal sollte bei der Sondierung mit NaOCl gefüllt sein (IZU ET AL. 2004).

Häufig auftretende Fehler während der Präparation und ihre Vermeidung sollen im Folgenden kurz dargestellt werden:

Apikale Blockade

Bei unzureichender Entfernung des bereits abgetragenen Dentins entsteht eine Blockade des Wurzelkanals. Sie entsteht bei der weiteren Präparation durch apikalwärts transportierte Dentin-Späne, die dort irreversibel verdichtet werden. Die apikale Blockade des Wurzelkanals und das Überstopfen von Debris können durch häufiges Spülen und Rekapitulation mit einer K-Feile deutlich reduziert werden (HÜLSMANN 2001).

Stufenbildung und Verlust an Arbeitslänge

Weicht das Instrument vom anatomischen Kanalverlauf ab, so kann an der Außenseite der Kurvatur eine Stufe (*ledge*) entstehen (Abb. 3.2.5.1). Durch nachfolgende Instrumentierungszyklen wird die Stufe vergrößert und kann nicht mehr umgangen werden. Der weiter apikal gelegene Anteil des Kanals wird nicht mehr ausreichend gereinigt und desinfiziert. Vermeidbar ist die Stufenbildung durch das Einhalten der Instrumentensequenz, druckloses Arbeiten und durch Vorbiegen der Instrumente. Eine regelmäßige Kontrolle der Arbeitslänge mit Rekapitulation wird empfohlen (HÜLSMANN 2001).

Abb. 3.2.5.1: Stufenbildung (l) mit Perforation (r)

Apikaler Trichter und Isthmus

Die Rückstellkraft des Instruments begünstigt einen stärkeren Abrieb des Wurzeldentins an der Innenseite des mittleren Bereichs und an der Außenseite des apikalen Bereichs. Zwischen diesen Bereichen entsteht eine Einengung, der sogenannte Isthmus (*elbow*). Eine vollständige Wurzelkanalfüllung wird erschwert. Zusammen mit der Isthmusbildung wird im apikalen Bereich eine trichterförmige Ausbuchtung geschaffen. Die angestrebte konische Präparationsform wird invertiert (WEINE ET AL. 1975). Ein apikaler Trichter (*zip*) bildet sich (Abb. 3.2.5.2). Nickel-Titan-Feilen, das Einhalten der Instrumentenabfolge und die *Step-down-Technik* können hilfreich sein, dieses Problem zu vermeiden.

Abb. 3.2.5.2: Apikale Trichterbildung mit Isthmus (l) und Perforation (r)

Perforationen

Die Perforation des Wurzelkanals ist an zwei Stellen begünstigt. An der Innenseite des mittleren Anteils eines stark gekrümmten Wurzelkanals kann durch zu starken Dentin-Abtrag eine längliche Perforation erzeugt werden, eine sogenannte *strip perforation*. Durch das Vorbiegen der Instrumente und entsprechender Zugangsgestaltung mit frühzeitiger koronaler Erweiterung kann ein zu massiver Abtrag des Dentins in diesem Bereich vermieden werden. Die *strip perforation* tritt häufig bei Unterkiefermolaren auf, wenn die koronale Erweiterung übermäßig erfolgt. Die Gefahrenzone liegt 2 mm unterhalb der Furkation (BERUTTI & FEDON 1992).

Die apikale Perforation tritt vornehmlich im Bereich der Krümmung auf. Bei der apikalen Gestaltung mit größeren Instrumenten, die ein geringeres flexibles Verhalten aufweisen, können diese dem originalen Kanalverlauf nicht mehr folgen. Durch forciertes Instrumentieren kommt es auf der Außenseite der Krümmung erst zur Stufenbildung, dann zur Perforation. Die Wahl der Instrumente, z. B. mit Batt-Spitze und/ oder Nickel-Titan-Instrumente, und eine entsprechende Präparationstechnik reduzieren ebenso das Risiko der Perforation. Zur Vermeidung des Perforationsrisikos können die Step-down- oder die Step-back-Technik verwendet werden.

Instrumentenfraktur

Die Fraktur eines Instruments erfolgt meist unerwartet und verlangt eine Umorientierung der begonnenen Behandlung. Die Entfernung des Fragments ist oft zeitaufwändig und schwierig, in vielen Fällen sogar unmöglich. Der verbleibende Instrumententeil, ob Stahl- oder Nickel-Titan-Instrument, ist biokompatibel und bewirkt keine Entzündung (RYHÄNEN ET AL. 1998). Nur durch rechtzeitiges Aussortieren von Instrumenten, die Verwendung neuer Instrumente und druckloses Arbeiten können Instrumentenfrakturen vermieden werden. Auch die Wahl eines Nickel-Titan-Systems unter Verwendung eines Drehmomentantriebs reduziert Frakturen.

3.3 Die maschinelle Wurzelkanalpräparation

Im Jahre 1932 wurde der Formgedächtniseffekt von Metalllegierungen entdeckt. ÖLANDER (1932) berichtete von einem gummiartigen Verhalten seiner Gold-Cadmium-Versuchslegierung. 1965 wurde ein Patent auf eine Formgedächtnislegierung auf Nickel-Titan (NiTi) Basis erteilt (BUEHLER & WILEY 1965). Die Entwicklung dieser neuartigen Legierung

fand bereits 1958 im Naval Ordnance Laboratory (Silver Spring, Maryland, USA) statt. Die sogenannte Nitinol-Legierung fand zunächst Verwendung in der Kieferorthopädie (ANDREASEN & HILLMANN 1971), vor allem die Eigenschaft der Pseudoelastizität ermöglichte eine Korrektur von Zahnfehlstellungen auf physiologischem Kraftniveau. Diese positive Eigenschaft wurde anschließend auch in der Endodontie eingesetzt. Zunächst wurden nur Instrumente zur manuellen Wurzelkanalpräparation aus einer 60-Nitinol-Legierung (60% Nickel und 40% Titan) und 55-Nitinol-Legierung (55% Nickel und 45% Titan) hergestellt. Diese boten jedoch keine besonderen Vorteile und waren zudem mit höheren Kosten verbunden. Die Instrumente wiesen eine geringe Lebensdauer auf, weshalb sie nur eine geringe Akzeptanz erfuhren. Erst die Entwicklungen für die maschinelle Instrumentierung brachten den Durchbruch. Bis heute werden die verwendeten Legierungen immer wieder modifiziert und verbessert. Eine der neusten Entwicklungen ist das M-Wire[®]-Nickel-Titan mit 50,8% Nickel und einer speziellen thermischen Nachbehandlung. YE & GAO (2012) kommen zu dem Ergebnis, dass M-Wire[®]-Nickel-Titan verschleißfester als andere Legierungen ist.

Bei den in der Zahnmedizin verwendeten NiTi-Legierungen wird das spannungsinduzierte pseudoelastische Verformungsverhalten genutzt (THOMPSON 2000). Voraussetzung dafür ist das Vorliegen der Legierung in der Hochtemperaturphase, dem Austenit. Wird das Instrument belastet, so bildet sich der Martensit, die Niedertemperaturphase. Es kommt dabei zu einer diffusionslosen Kristallgitterumwandlung im Metall. Diese sogenannte instabile R-Phase wandelt sich bei Entlastung in die austenitische Form zurück. Dies wird auch als Shape-Memory-Effekt bezeichnet. Im Vergleich zu Feilen aus Edelstahl ist die Flexibilität um das Dreifache erhöht (*Superelastizität*). Eine irreversible Verformung des Instruments in gekrümmten Wurzelkanälen findet nicht statt. Wird jedoch das Elastizitätsmaximum überschritten, so kann es zum Bruch des Instruments kommen. Dieser Torsionsbruch kann als Folge der Einklemmung der Instrumentenspitze entstehen. Die Ursache ist eine starke Verdrillung des Instruments. Der häufige Gebrauch der Instrumente verändert die Materialeigenschaften und kann zum Ermüdungsbruch führen. Bei jeder Verformung verbleiben einige Atome in der martensitischen Form und stehen bei den folgenden Umwandlungen nicht mehr zur Verfügung, das Material ermüdet.

NiTi-Legierungen sind hervorragend korrosionsresistent, und das Allergierisiko ist als gering einzustufen. Nach einer initialen Emission erfolgt fast keine weitere Freisetzung von Nickel (CISSE´ ET AL. 2002), bzw. nur in sehr geringen Mengen (GLOGOWSKI 2009). RYHÄNEN ET AL. (1998) untersuchten die Biokompatibilität von Nickel-Titan und kamen zu einem guten Ergebnis.

Neben den metallurgischen Eigenschaften weisen die maschinellen Nickel-Titan-Instrumente auch in ihren Konstruktionsmerkmalen einige Unterschiede im Vergleich zu manuellen Instrumenten auf. Zudem hat das Instrumentendesign einen Einfluss auf die zyklische Ermüdung des Materials (SHEN ET AL. 2013). Abweichend von herkömmlichen Wurzelkanalinstrumenten weisen NiTi-Instrumente besondere Konstruktionsmerkmale auf:

Batt-Spitze

Die abgerundete, passive Instrumentenspitze ist ein wichtiges Merkmal dieser Instrumente. Ihre Aufgabe ist es, das Instrument in zentrischer Position im Wurzelkanal zu führen, so sollen Wurzelkanalbegradigung und Perforationen vermieden werden.

Taper

Die meisten Systeme verfügen über eine größere Konizität als herkömmliche ISO-Instrumente. Die vorgegebene Konizität beträgt dort 2% über 16 mm des Arbeitsanteils (ISO 3630-1:2008). Die auf dem Markt befindlichen Instrumente aus Nickel-Titan weisen Konizitäten von 2% bis hin zu 12 %, sogar 20% auf. Variierende Konizitäten innerhalb eines Instruments sind bei neueren Instrumentensystemen zu finden.

Geometrischer Querschnitt

Im Querschnitt sind grundsätzlich Schneiden und Spankammern, in der Endodontie als Spanraum bezeichnet, vorhanden. Die enorme Variationsbreite der Gestaltung führt zu unterschiedlicher Anzahl der Schneiden und damit zu unterschiedlicher Größe des Spanraums. Die geometrische Querschnittsform variiert dabei zwischen dreieckigen, rechteckigen, s-förmigen und quadratischen Modifikationen.

Nicht schneidende Instrumente verfügen über sogenannte „*radial lands*“. „*Radial lands*“ sind abgeflachte Schneidekanten und wirken als seitliche Führungsflächen für eine bessere Zentrierung im Kanal (WOLCOTT & HIMEL 1997). Gleichzeitig erhöht sich die Reibung des Instruments an der Kanalwand und führt zu einem erhöhten Frakturrisiko (SCHÄFER & FRITZENSCHAFT 1999).

3.4 Neuartige NiTi Systeme

LightSpeed

In den 1990er Jahren wurden die sogenannten LightSpeed-Instrumente entwickelt. Sie gehören in die Reihe der ersten maschinell betriebenen NiTi-Instrumente und sind unter dem Markennamen LightSpeed LS1 (LightSpeed Endodontics, USA) bekannt. Sie zeichnen sich durch das besonders kurze schneidende Arbeitsteil (0,275 bis 1,75 mm) mit einem langen dünnen Schaft und den hohen Arbeitsgeschwindigkeiten ($1500-2000 \text{ Umin}^{-1}$) aus. Das vollständige Set umfasst 26 Instrumente in den Größen 20 bis 140. Die Spitze des Instruments ist nicht schneidend und verfügt über *radial lands*.

ProFile

Das ProFile®-Feilensystem (Dentsply Maillefer, Schweiz) ist seit 1994 im Handel. Die Instrumente weisen eine nicht schneidende Instrumentenspitze mit „*radial lands*“ auf. Der Querschnitt zeigt drei u-förmige Ausbuchtungen.

Eine Weiterentwicklung der ProFile-Instrumente sind die Vortex®-Feilen (Dentsply, York, USA). Sie werden aus M-Wire®-Nickel-Titan gefertigt und sind in den ISO-Größen 15 bis 50 mit den Konizitäten .04 und .06 erhältlich. Das Frakturrisiko dieser Instrumente ist als sehr niedrig einzuschätzen (SHEN ET AL. 2012).

ProTaper Universal und ProTaper NEXT™ (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)

Die Weiterentwicklung des ProTaper-Systems besteht aus insgesamt sechs Feilen, drei „Shaping Files“ und drei „Finishing Files“. Erstere schneiden vorwiegend im koronalen und mittleren Anteil des Wurzelkanals, wohingegen die „Finishing Files“ den apikalen Bereich des Wurzelkanals bearbeiten. Erreicht wird diese Eigenschaft mit Hilfe einer Besonderheit. Sie vereinigen mehrere zunehmende oder abnehmende Konizitäten in einer Feile. Durch den dreiseitigen konvexen Querschnitt haben die Feilen drei Schneidekanten. Die Spitzen der „Finishing-Files“ sind abgerundeter. Die S1-Feile verfügt nicht über eine Batt-Spitze. Die F3-Feile grenzt sich ebenfalls ab. Durch eine konvex abgerundete Gestaltung des Instrumentenquerschnittes wird versucht, der Frakturanfälligkeit entgegen zu wirken (CALBERSON ET AL. 2004). Das ProTaper NEXT™-System umfasst fünf Feilen zur Präparation. Drei wichtige Neuerungen umfasst das Design dieser Feilen der 5. Generation. Der Feilenquerschnitt ist exzentrisch, woraus sich zwei Schneidekanten ergeben. Die Konizitäten innerhalb einer Feile sind progressiv und auch hier setzt der Hersteller auf die M-Wire®-Technologie.

Die empfohlene Umdrehungszahl liegt bei 250 Umin^{-1} .

FlexMaster (VDW, München, Deutschland)

Das FlexMaster-Feilensystem umfasst die Konizitäten .06, .04 und .02, die in absteigender Folge und Größe Anwendung finden. Für die Präparation wird die Crown-down-Technik empfohlen. Die Umdrehungszahl sollte dabei im Bereich von 150 Umin^{-1} bis 300 Umin^{-1} liegen. Nach Erreichen der Arbeitslänge erfolgt die apikale Erweiterung mit den 2%igen Feilen in aufsteigender ISO-Größe.

Der Querschnitt ist dreieckig mit scharf schneidenden Kanten, ohne *radial lands*. So besitzt das Instrument eine erhöhte Resistenz gegen Torsionskräfte, kombiniert mit guter Schneideeffektivität. Die Spitze der Feilen ist nicht schneidend. Selbst für ungeübte Anwender ist dieses System geeignet (SONNTAG ET AL. 2003a, SONNTAG ET AL. 2003b).

Revo-S (Micro-Mega, Besançon, Frankreich)

Revo-S ist der Vorgänger des in dieser Studie untersuchten Feilensystems One Shape®. Das Basis-Instrumentenset besteht aus drei Feilen, SC1 (ISO 25/ .06), SC2 (ISO 25/ .04) und SU (ISO 25/ .06). In der Crown-down-Technik wird bei einer Umdrehungszahl von 250 Umin^{-1} bis 400 Umin^{-1} präpariert. Anschließend erfolgt mit dem Erweiterungsset die apikale Gestaltung in den ISO-Größen 30 bis 40 mit 6%iger Konizität. Der asymmetrische Querschnitt erhöht die Flexibilität und erleichtert den Abtransport der Dentin-Späne. Das Design zeigt drei verschiedene Radien mit drei schneidenden Kanten. Das Instrument SC2 ist symmetrisch im Querschnitt und soll die Zentrierung im Kanal ermöglichen. Bisher liegen nur wenige Studien mit kontroversen Ergebnissen vor. BÜRKLEIN ET AL. (2014b) stellten fest, dass ein erhöhter Zeitbedarf zur Präparation und eine Kanalbegradigung bei Verwendung des Systems bestehen. HASHEM ET AL. (2012) stellten keine Begradigung des Kanals nach der Präparation mit dem System Revo-S fest.

BioRaCe (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz)

Die neueren BioRaCe-Instrumente sind Nachfolger des seit 1999 produzierten RaCe-Instrumentensatzes. Der Name steht für *Reamer with Alternating Cutting Edges*. Der Instrumentenquerschnitt ist dreieckig oder viereckig bei den ISO-Größen 15 und 20. Die Oberfläche wird elektrochemisch behandelt und ist damit unempfindlicher gegenüber zyklischer Ermüdung (LOPES ET AL. 2010). Der modifizierte und erweiterte Instrumentensatz, unter dem Namen BioRaCe, ist speziell für die Präparation der apikalen Region mit größeren

Instrumenten der Konizität .02 entwickelt. Der Basissatz besteht aus 6 Feilen der Iso-Größen 15 bis 40 mit den Konizitäten von 4% bis 8%. Das Erweiterungsset bietet eine apikale Präparation bis zur ISO-Größe 60. Bei der Anwendung ist die Single-length-Technik zu wählen. BioRaCe-Feilen sollten mit 500 Umin^{-1} bis 600 Umin^{-1} betrieben werden.

Mtwo (VDW)

Das Mehrfeilensystem der Firma VDW, Vorläufer der RECIPROC®-Instrumente, besteht aus einer Basissequenz mit den Feilengrößen 10/.04, 15/.05, 20/.06 und 25/.06. Weitere vier Feilen, zur Präparation größerer Kanäle, in den Größen 30/.05, 35/.04, 40/.04 und 25/.07 sind im Mtwo-Feilensystem enthalten. Nach Anlegen eines Gleitpfades erfolgt die Präparation in der Single-length-Technik und mit einer Umdrehungszahl von 280 Umin^{-1} bis 350 Umin^{-1} . Der Querschnitt ist s-förmig gestaltet und weist zwei aktive Schneidekanten auf. Der schmalere Instrumentenkern der größeren Instrumente erhöht die Flexibilität dieser Feilen. Der große Spanraum ermöglicht einen guten Abtransport der Dentinspäne. Die Feilen weisen eine Batt-Spitze auf.

SAF-System (ReDent-Nova, Ra'anana, Israel)

Das neuartige System wurde 2010 erstmalig vorgestellt. Die Self-Adjusting-File zeichnet sich durch ihr abweichendes Design aus. Der Aufbau ist netzartig mit Querverstreungen und weist eine raue Oberfläche auf. Gefertigt wird die SAF-Feile aus Nickel-Titan, das in Verbindung mit dem zierlichen Design eine hervorragende Anpassung an die Kanalmorphologie bietet (HOF ET AL. 2010, METZGER ET AL. 2010). Die Rückstellkraft des Materials ermöglicht einen konstanten Druck auf die gesamte Kanalwand. Während der Präparation wird der Kanal kontinuierlich mit Natriumhypochlorit (NaOCl) in 3%iger Konzentration gespült. Erste Studien zeigen eine gute Effektivität in ovalen Kanälen und in Bezug auf die Desinfektionswirkung (SIQUEIRA ET AL. 2010, NEVES ET AL. 2014). Untersuchungen des präparierten Dentins zeigen, dass die SAF-Feile keine Microcracks produziert. Auch im apikalen Dentin konnten keine Risse nachgewiesen werden (YOLDAS ET AL. 2012, KIM ET AL. 2013b, LIU ET AL. 2013).

3.5 Drehmomentbegrenzte Antriebssysteme mit reziproker Programmierung

Mit Einführung der rotierenden Nickel-Titan-Instrumente begann eine neue Ära der Wurzelkanalpräparation. Jedoch ließ diese komfortable Präparation das Risiko der

Instrumentenfraktur steigen. Es werden zwei Arten von Brüchen unterschieden. Zum einen bricht ein Instrument aufgrund der Verdrillung im Wurzelkanal. Dieser Torsionsbruch entsteht durch das Einklemmen der Instrumentenspitze im Wurzelkanal. Zum anderen kann das Instrument durch Ermüdung des Materials frakturieren. Der Torsionsbruch kann durch eine Kontrolle des Drehmoments gehandhabt werden. Zusammen mit entsprechenden Präparationstechniken soll das Risiko der Instrumentenfraktur durch Verwendung spezieller Antriebssysteme deutlich verringert werden. Der dentale Markt bietet eine Reihe drehmomentbegrenzender Antriebssysteme. Das Feilensystem One Shape[®] kann mit herkömmlichen, bereits auf dem Markt bewährten Motoren betrieben werden. Motoren mit speziellen reziproken Programmen oder frei programmierbarer Einstellungen in reziproker Arbeitsweise werden für die Systeme RECIPROC[®] und Wave One[™] benötigt.

Passend zum System RECIPROC[®] bietet der Hersteller (VDW, München, Deutschland) die entsprechenden Antriebssysteme VDW.GOLD[®] RECIPROC[®] und VDW.Silver[®] RECIPROC[®] mit reziproker Arbeitsweise. Die Feilendatenbank des Motors enthält auch die Sequenz für das System Wave One[™] und für Feilen mit kontinuierlicher Rotation. Für die Vollrotationen bietet das Gerät einen Drehmomentbereich von 0,2 bis 4,1 Ncm und einer Drehzahl bis zu 6000 Umin⁻¹.

Der Endo-Motor X-SMART[™] Plus (DENTSPLY Maillefer, Ballaigues, Schweiz) kann wahlweise mit kontinuierlicher oder reziproker Bewegung eingesetzt werden.

3.6 RECIPROC[®]

Das in dieser Studie untersuchte Feilensystem RECIPROC[®] (VDW) basiert auf dem bereits bekannten NiTi-System Mtwo (VDW) und besteht aus drei Instrumenten verschiedener Größe (R 25, R 40 und R 50). Diese stehen zur Präparation enger, mittlerer und weiter Kanäle zur Verfügung. Ihre Bezeichnungen entsprechen den ISO-Größen 25, 40 und 50, jedoch mit unterschiedlichen Konizitäten. Die R 50-Feile weist eine Konizität von 5%, die R 40-Feile eine Konizität von 6% und die in dieser Arbeit verwendete Feile R 25 eine Konizität von 8% auf. Letztere ist für die Präparation enger und gekrümmter Kanäle vorgesehen und wurde deshalb für diese Arbeit ausgewählt (Abb. 3.6.1). In der klinischen Anwendung erfolgt die Auswahl des passenden Instruments mit Hilfe präoperativer Röntgenaufnahmen und durch Sondieren des Wurzelkanals mit Handinstrumenten.

Das System besteht aus der weiterentwickelten NiTi-Legierung, dem M-Wire[®]-Nickel-Titan, und ist zur Einmalverwendung konzipiert. Die Instrumente sind in den Arbeitslängen 21, 25

und 31 mm verfügbar. Der Instrumentenschaft ist auf 11 mm verkürzt und soll den Zugang zum Wurzelkanal und die Handhabung erleichtern. Gemäß der ISO-Norm 3630-1 sind die Feilen mit Farbringen am Schaft und farbigem Gummistopper für die Größe der Instrumentenspitze kodiert. Zur besseren Erkennbarkeit der Rotationsbewegung dienen drei Spitzen am Gummistopper.

Die Feilengeometrie entspricht weitgehend derjenigen der Mtwo-Instrumente, jedoch mit entgegengesetzter Helix. Die Spitze des Instruments ist nicht-schneidend (Batt-Spitze). Der Querschnitt ist s-förmig gestaltet und besitzt zwei Schneidekanten. Der Abstand zwischen den Schneiden ist progressiv und die Konizität regressiv. Die Gestaltung des Instruments soll den Abtransport des Debris sowie die Effizienz der Schneidleistung erhöhen und ist speziell auf die reziproke Arbeitsweise abgestimmt.

Abb. 3.6.1: Die Feile R25 des RECIPROC®-Systems

Arbeitsweise und Handhabung

Die Instrumente des RECIPROC®-Systems arbeiten auf Basis der sogenannten Balanced-force-Technik (ROANE ET AL. 1985), mit der Besonderheit einer reziproken Arbeitsweise. Für die Verwendung ist ein spezieller Motor erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein VDW.Silver® RECIPROC® -Motor (VDW) verwendet. Dieser enthält einen vorprogrammierten Modus für alle RECIPROC®-Feilen. In der Programmierung betragen die Rotationswinkel 150° gegen den Uhrzeigersinn (*counter clockwise*) und 30° im Uhrzeigersinn (*clockwise*). Die Rotationsgeschwindigkeit beträgt 300 Umin⁻¹ (KIM ET AL. 2012). In Bewegung gegen den Uhrzeigersinn sind die Schneiden aktiv abtragend. Die Rotation im Uhrzeigersinn dient dagegen der Entlastung des Instruments.

Eine Gleitfaderstellung wird bei den RECIPROC®-Instrumenten nur bei sehr engen Kanälen empfohlen. Ein geradliniger Zugang zum Wurzelkanal ist obligat. Die Präparation erfolgt mit Auf- und Abwärtsbewegungen (*pecking motion*). Ein sogenannter *peck* umfasst eine Bewegung von 3-4 mm. Drei bis vier von diesen Bewegungen werden ohne Druck in einem Intervall durchgeführt. Das Instrument sollte nicht zum Apex gedrängt werden, um eine

Überinstrumentierung zu vermeiden. Dabei ist auf eine exakte Bestimmung der Arbeitslänge zu achten. Ist die Arbeitslänge erreicht, so ist die Präparation abgeschlossen. Ein wiederholtes Vorarbeiten auf die Arbeitslänge ist zu vermeiden.

Bisherige Studien

In den letzten Jahren zählte dieses System zu den am häufigsten untersuchten Feilen. Die Mehrzahl der Veröffentlichungen beschäftigt sich mit dessen Materialeigenschaften, der Belastbarkeit der Feile und den Effekten auf die Präparation. Eine Vielzahl von Arbeiten vergleichen RECIPROC mit anderen Nickel-Titan-Systemen, insbesondere mit dem Wave OneTM-System. KIM ET AL. (2012) untersuchten die Belastung durch Torsionskräfte und die zyklische Ermüdung des Materials der Systeme Wave OneTM und RECIPROC[®]. Die Ergebnisse zeigten eine signifikant bessere Ermüdungsfestigkeit des RECIPROC[®]-Systems sowie eine bessere Eignung für stark abknickende Kanäle im Vergleich zum Wave OneTM-System. Insgesamt belegt die Arbeit von KIM ET AL., dass beide Feilensysteme sehr gute Materialeigenschaften besitzen.

ARIAS ET AL. (2012) untersuchten das Ermüdungsverhalten des apikalen und koronalen Anteils und fanden im apikalen Bereich des Instruments stabilere Materialeigenschaften. Dabei wurden in 5 und 13 mm Abständen von der Instrumentenspitze entfernt gemessen.

Auch PLOTINO ET AL. (2012) kommen zu dem Ergebnis, dass die RECIPROC[®]-Feile der Wave OneTM-Feile hinsichtlich der zyklischen Ermüdung überlegen ist. Durchgeführt wurde diese Untersuchung an künstlichen Wurzelkanälen. Mit feilenabhängigen reziproken Bewegungsmustern wurden die Feilen bis zum Instrumentenbruch geführt. Der Unterschied zwischen den Systemen ist signifikant: Während bei der RECIPROC[®]-Feile die Zeit bis zur Fraktur bei 130 sec lag, kam es beim Wave OneTM-Instrument bereits nach 97 sec zur Instrumentenfraktur.

LOPES ET AL. (2013) kommen in einer Vergleichsuntersuchung mit dem Mtwo-System zu dem Ergebnis, dass die RECIPROC[®]-Feile eine signifikant bessere Ermüdungsbeständigkeit aufweist. Während der Tests auf Biegefestigkeit zeigte sich eine signifikant niedrigere Toleranz gegen Flexion des Instruments. Durch die dynamischen Tests konnte festgestellt werden, dass die reziproke Bewegung einen günstigen Einfluss auf die Flexibilität des Instruments hat.

PEDULLÀ ET AL. (2013) untersuchten die Wirkung 5%iger Natriumhypochloritlösung auf die zyklische Ermüdung der Systeme RECIPROC[®] und Wave OneTM. Es zeigte sich jedoch kein signifikanter Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit der Instrumente.

In der Arbeit von BÜRKLEIN ET AL. (2013c) wurden Dentin-Defekte nach reziproken Bewegungen und Vollrotation betrachtet. Die Kanäle wurden in 3, 6 und 9 mm Entfernung vom Apex in 25-facher Vergrößerung begutachtet. Die reziproken Systeme Wave OneTM und RECIPROC[®] produzierten mehr partielle Dentin-Risse im apikalen Bereich. Das System RECIPROC[®] verursachte dabei mehr vollständige Dentin-Risse als die vollrotierenden Systeme.

DE-DEUS ET AL. (2013) untersuchten die Erreichung der Arbeitslänge durch die R25-Feile in Abhängigkeit vom Vorliegen eines Gleitpfades. In geraden und leicht gekrümmten Kanälen wurde das Erreichen der Arbeitslänge ohne Gleitpfad untersucht. In 93 % der Fälle konnte die Feile die Arbeitslänge erreichen. In der Gruppe der gekrümmten Kanäle trat ein Nicht-erreichen der Arbeitslänge zahlreicher auf.

Auch das mehrmalige Instrumentieren bis auf Arbeitslänge mit der RECIPROC[®]-Feile wurde untersucht. JEON ET AL. (2014) stellten an simulierten Kanälen fest, dass der apikale Bereich vergrößert wird, wenn das Instrument mehrfach auf Arbeitslänge eingebracht wird. Die Präparationsvergrößerung ist dabei abhängig von der Anzahl der apikalen *pecks*.

YOO & CHO (2012) untersuchten die Kanalkrümmung nach Präparation simulierter Kanäle in Plastikblöckchen durch die Systeme RECIPROC[®], Wave OneTM, ProTaper und Profile. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die beiden Ein-Feilen-Systeme den originalen Kanalverlauf erhalten.

Die Debris-Extrusion verschiedener Systeme wurde von KOÇAK ET AL. (2013) an extrahierten Unterkieferprämolaren untersucht. Dabei wurden die Self-Adjusting-File, ProTaper, Revo-S und RECIPROC[®] verglichen. RECIPROC[®] produzierte die geringste apikal extrudierte Debris-Menge.

BÜRKLEIN & SCHÄFER (2012) untersuchten das Überpressen von Dentin bei den Systemen Mtwo, ProTaper, Wave OneTM und RECIPROC[®]. Die reziproken Feilensysteme unterschieden sich signifikant von den rotierenden Systemen. Es wurde mehr Debris überpresst.

Die Ergebnisse zeigten weiterhin einen signifikant höheren Debris-Transport durch das RECIPROC[®]-System. Zusätzlich wurde ein signifikanter Unterschied der benötigten Instrumentierungszeit mit dem System RECIPROC[®] festgestellt, die Präparation war mit dem RECIPROC[®]-System schneller abgeschlossen.

BÜRKLEIN ET AL. (2013a) zeigten in einer weiteren Arbeit zum überpressten Dentin, dass das RECIPROC[®]-System eine höhere Dentin-Extrusion aufweist. Die untersuchten Systeme waren RECIPROC[®], F360, One Shape[®] und Mtwo. Die Instrumentierungszeit der Ein-Feilen-Systeme war insgesamt signifikant schneller.

3.7 Wave One™

Das Wave One™-System (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) orientiert sich an der Form der bekannten ProTaper-Instrumente (Dentsply). Mit diesem System wird der gesamte Wurzelkanal mit nur einer Feile präpariert. Die Instrumente sind für den Einmalgebrauch entwickelt und nicht autoklavierbar. Der Hersteller bietet drei Instrumente mit variabler, abnehmender Konizität zur Auswahl an. Der Anwender erhält die Instrumente „small“ (21/.06.), „primary“ (25/.08.) und „large“ (40/.08.) in den Längen 21, 25 und 31 mm. Die Konizität der „primary-Feile“ beträgt an der Spitze 8%, in der Mitte 6,5% und am Schaft 5,5% (Abb. 3.7.1). Sie ähnelt der ProTaper F2-Feile (BERUTTI ET AL. 2012b). Analog zum RECIPROC®-System wird die Wahl des entsprechenden Instruments mit präoperativen Röntgenaufnahmen und nach Sondierungen getroffen. Nach Herstellerangaben (DENTSPLY 2013) findet die „primary-Feile“ in ca. 80% der klinischen Fälle ihre Anwendung.

Die Instrumente sind aus M-Wire®-Nickel-Titan gefertigt. Der Querschnitt der Instrumente ist ca. 13 mm von der Feilenspitze entfernt konvex triangulär, und ändert sich im Verlauf. 6 mm vor dem apikalen Ende der Feile ist der Querschnitt konkav triangulär.

Die Spitze des Instruments schneidet nicht und die Abstände der Schneidekanten vergrößern sich von apikal nach koronal. Der progressive Verlauf erleichtert den Abtransport des Debris.

Abb. 3.7.1: Die Feile „primary“ des Systems Wave One™

Arbeitsweise und Handhabung

Für dieses Instrumentensystem wird ein geeigneter Motor mit einer auf die Feilen angepassten Programmierung benötigt. Der Hersteller bietet zum Produkt einen entsprechenden Motor, den Wave One™-Motor (Dentsply) an. Die programmierten Winkel betragen für Wave One™ 170° im *counter-clockwise* und 50° im *clockwise* Modus. Die Geschwindigkeit der Bewegung ist auf 350 Umin⁻¹ programmiert (KIM ET AL. 2012). Auch bei diesem System sind die Rotationen im counter-clockwise schneidend und im clockwise entlastend.

Ein Gleitpfad wird bei der Präparation mit der Wave OneTM „primary-Feile“ empfohlen (BERUTTI ET AL. 2012a). Die Vorgehensweise während der Präparation ist analog zu der des RECIPROC[®]-Systems. Die Feile wird mit drucklosen „*pecking motions*“ im Kanal geführt. Mit Erreichen der Arbeitslänge ist die Präparation abgeschlossen.

Bisherige Studien

Die Mehrzahl der Arbeiten sind Vergleichsstudien mit dem RECIPROC[®] System.

CASTELLÓ-ESCRIVÁ ET AL. (2012) verglichen die zyklische Ermüdung der Systeme ProTaper, Wave OneTM und TF[®]-Twisted Files an künstlichen Kanälen. Das System Wave OneTM schnitt dabei als bestes getestetes Instrument ab, da sich die Feile als bruchfester erwies. PLOTINO ET AL. (2012) verglichen die Systeme Wave OneTM und RECIPROC[®] hinsichtlich ihrer zyklischen Ermüdung. Untersucht wurden die R25-Feile von RECIPROC[®]- und die „primary-Feile“ des Wave OneTM-Systems (beide 25/.08). Die Zeiten bis zur Fraktur und die Länge des Fragmentes wurden gemessen. Die „primary-Feile“ brach ca. 30 sec früher als die R25-Feile. Keinen signifikanten Unterschied ergab die Beurteilung der Fragmentlänge.

KIM ET AL. (2012) zeigten im Vergleich der Wave OneTM - und RECIPROC[®]-Systeme unter imitierten klinischen Präparationsbewegungen eine sehr hohe Torsionsfestigkeit der Wave OneTM-Feile. Der Vergleich mit dem ProTaper-System innerhalb dieser Arbeit ergab ein signifikant niedrigeres Frakturrisiko der beiden Ein-Feilen-Systeme.

In einer Mikro-CT- und REM-Untersuchung zeigten KIM ET AL. (2013a) eine bessere Festigkeit der Wave OneTM-Instrumente. Bei 10% der untersuchten Feilen zeigten sich Risse auf der Oberfläche nach der Instrumentation. Die Autoren führen dieses Ergebnis auf die Verwendung von M-Wire[®]-Nickel-Titan zurück.

Der Einfluss von 5%iger NaOCl-Lösung auf die Instrumente wurde von PEDULLÀ ET AL. (2013) untersucht. Die Instrumente wurden für eine und fünf Minuten in die Lösung gegeben und die Zeit bis zur Fraktur des Instruments in einem künstlichen Kanal gemessen. Es konnte kein Einfluss der Lösung auf die zyklische Ermüdung festgestellt werden.

BERUTTI ET AL. (2012a) zeigten eine geringere präparationsbedingte Kanaländerungen mit dem Präparationssystem Wave OneTM nach Anlegen eines präoperativen Gleitpfades. Gleichzeitig wirkt sich der Gleitpfad positiv auf die benötigten Arbeitszyklen bis zum Erreichen der Arbeitslänge aus. Die in künstlichen Kanälen erzielten Ergebnisse bezüglich der Radius- und Krümmungsveränderung unterschieden sich mit Gleitpfad signifikant. Der originale Kanalverlauf wurde respektiert. Die Ein-Feilen-Technik mit dem Wave OneTM-System erreicht laut BERUTTI ET AL. (2012a) eine adäquate Präparationsgröße und Konizität.

DIETRICH ET AL. (2012) verglichen die Systeme Wave One[™], K3 und SAF hinsichtlich der Debris-Entfernung. Die Reinigung des Isthmus wurde durch das Wave One[™]-System weniger gut erreicht. Unterschiede zwischen den Systemen konnten nicht festgestellt werden. In der Arbeit wurde jedoch das SAF-System zum Abschluss der Präparation als Spülsystem eingesetzt.

KIM ET AL. (2013a) untersuchten das Präparationsverhalten der ProTaper-Instrumente und der Wave One[™]-Feilen hinsichtlich des prä- und postoperativen Kanalvolumens. Die Auswertung der Daten aus dem Mikro-CT ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Systemen.

3.8 One Shape[®]

Seit 2012 steht ein weiteres Ein-Feilen-System zur Verfügung. Der Hersteller des One Shape[®]-Systems (Micro-Mega, Besançon, Frankreich) beschränkt sich auf eine einzelne Feile, die sowohl der 5., als auch der 4. Generation zugeordnet werden kann.

Das Instrument entspricht der ISO-Größe 25 und wird in den Längen 21, 25 und 29 mm angeboten. Derzeit ist von diesem System nur diese eine Größe auf dem dentalen Markt erhältlich (Abb. 3.8.1). Die Konizität beträgt über die gesamte Länge des Instruments 6%. Der aktive Teil umfasst 16 mm. Der Instrumentenquerschnitt ändert sich am Arbeitsteil. Die trianguläre symmetrische Form mit drei Schneiden am apikalen Ende führt über asymmetrische Übergangsformen zum symmetrischen s-förmigen Querschnitt mit zwei Schneiden. Aufgrund dieses charakteristischen Designs wird der Massenschwerpunkt des Instruments über die Arbeitslänge versetzt. Durch die Rotation des Instruments wird im Wurzelkanal eine wellenförmige Bewegung erzeugt. Diese Besonderheit soll zusammen mit dem progressiven Steigungswinkel das Einschrauben des Instruments in den Kanal minimieren (HASHEM ET AL. 2012). Die Instrumentenspitze ist inaktiv, nicht schneidend. Gefertigt wird das Instrument aus konventionellem Nickel-Titan, das mit einer speziellen Oberflächenbehandlung veredelt wurde.

Abb. 3.8.1: Die Feile One Shape®

Arbeitsweise und Handhabung

Anders als bei den zuvor beschriebenen Systemen wird das One Shape®-Instrument in einer 360°-Vollrotation betrieben. Der Instrumentenhersteller empfiehlt für die Motorprogrammierung ein Drehmoment von 4-5 Ncm (400-500 gcm) und eine Rotationsgeschwindigkeit von 300-600 Umin⁻¹. Während der Versuche wurde eine Geschwindigkeit von 400 Umin⁻¹ gewählt. Bis max. 4 Ncm Torque sollte die Feile belastet werden.

Vor Beginn der Präparation wird das Anlegen eines Gleitpfades empfohlen. Die Präparation wird analog zu den zuvor beschriebenen Systemen durchgeführt und ist mit Erreichen der Arbeitslänge beendet.

Bisherige Studien

BÜRKLEIN ET AL. (2013a) untersuchten das Überpressen von Debris der drei rotierenden NiTi-Systeme RECIPROC®, F360 und One Shape® gegenüber dem System Mtwo. Als Ergebnis zeigte sich bei allen Instrumenten ein Überpressen von Debris. Die nicht reziprok arbeitenden Instrumente, wie z. Bsp. One Shape®, zeigten eine geringere Debris-Extrusion.

In einer weiteren Arbeit von BÜRKLEIN ET AL. (2013b) wurde die Kanalverlagerung untersucht. Anhand von prä- und postoperativen Röntgenbildern konnte die Veränderung gemessen werden. Das One Shape®-Instrument zeigte gute Ergebnisse, aber auch die anderen untersuchten Systeme RECIPROC®, F360 und Mtwo veränderten den Kanalverlauf kaum. In beiden Arbeiten wird von einer deutlich geringeren Präparationszeit bei Verwendung der Ein-Feilen-Systeme berichtet.

LIU ET AL. (2013) untersuchten an simulierten Kanälen die Entstehung von Mikrorissen durch die NiTi-Systeme One Shape®, RECIPROC® und die Self-Adjusting File. Im apikalen Bereich der präparierten Kanäle konnten Microcracks festgestellt werden. Die One Shape®-Feile hinterließ, zusammen mit dem ProTaper-System, mehr Mikrorisse in der Kanalwand.

4. Material und Methoden

4.1 NiTi-Systeme

In der vorliegenden Studie wurde das Präparationsverhalten der drei neuartigen NiTi-Systeme RECIPROC[®], Wave One[™] und One Shape[®] vergleichend untersucht.

4.2 Auswahl und Vorbereitung der Zähne

Für die Untersuchungen wurden 45 extrahierte humane Unterkiefermolaren ausgewählt. Nur Zähne mit intakter Wurzelspitze und ausgeprägter Krümmung der beiden mesialen Wurzeln wurden verwendet. Die Zähne erfüllten dabei folgende Kriterien:

- Keine Resorption oder Beschädigung der mesialen Wurzeln
- Abgeschlossenes Wurzelwachstum
- Getrennte mesiale und distale Wurzeln
- Krümmungswinkel der mesialen Wurzeln zwischen 20° und 40°
- Mindestlänge von 19 mm zur Gewährleistung einer Arbeitslänge von 18 mm
- Keine Anzeichen einer begonnenen oder abgeschlossenen Wurzelkanalbehandlung
- Hinreichende Kronenhartschubstanz zum Anlegen von Kofferdam
- Kein S-förmiger Kanalverlauf.

Die Zähne wurden mit einem konischen Diamantschleifer der Größe ISO 016 (Gebr. Brasseler, Lemgo) bis zur Eröffnung der Pulpa trepaniert und die mesialen Wurzelkanaleingänge dargestellt. Verbliebene Dentin-Überhänge wurden entfernt.

Die Gängigkeit der beiden mesialen Wurzelkanäle wurde mit Reamern der Größe ISO 10 (Müller & Weygandt, Bidingen) überprüft. Das Instrument musste dabei am *Foramen apicale* durchtreten. Wurden keine zwei Wurzelkanäle gefunden oder war einer der Kanäle nicht durchgängig, so wurde der Zahn verworfen.

Die verbliebenen Zähne wurden von koronal auf eine einheitliche Länge von 19 mm gekürzt. Für jeden Wurzelkanal wurde ein reproduzierbarer Referenzpunkt festgelegt. Somit ergab sich eine einheitliche Arbeitslänge aller Wurzelkanäle von 18 mm.

Die Wurzeloberfläche wurde mit dem oben genannten Diamantbohrer gereinigt und angeraut.

4.2.1 Das Muffelsystem

Zur prä- und postoperativen Bewertung des Wurzelkanalquerschnittes und der Wurzelkanalkrümmung unter standardisierten Bedingungen sowie einer reproduzierbaren Versuchsdurchführung, wurde ein Muffelsystem verwendet. Erstmals von BRAMANTE ET AL. (1987) beschrieben, wurde es in den folgenden Jahren von CALHOUN & MONTGOMERY (1988), MCCANN ET AL. (1990) und HÜLSMANN (1998) modifiziert und verbessert.

Das System besteht aus drei miteinander verschraubbaren Messingblöcken. Quer durch alle Teile verlaufen Bohrungen für Schrauben, die so angebracht sind, dass eine exakte und reproduzierbare Reposition möglich ist. Das zusammengesetzte Muffelsystem bildet im Inneren einen Hohlraum zur Aufnahme des Versuchskörpers (Abb. 4.2.1.1).

Der mittlere Block wurde mit Querrillen versehen, die den Versuchskörper horizontal eindeutig reponieren. An den äußeren Flächen sind Bohrungen zur Aufnahme eines Röntgentubus und zur Aufnahme einer Halterung für Zahnfilme bzw. eines Röntgensensors vorhanden. Dadurch werden reproduzierbare Röntgenaufnahmen in der Rechtwinkeltechnik ermöglicht. In die Zahnfilmhalterung sind Klammerkreuze als Markierung eingelassen, die eine exakte Überlagerung der angefertigten Röntgenaufnahmen ermöglichen sollen.

Die seitlichen Anteile besitzen jeweils eine bzw. zwei Längsrillen, die zum Inneren des Systems ausgerichtet sind.

Abb. 4.2.1.1: Das Muffelsystem: links geschlossen, rechts geöffnet

4.2.2 Herstellung der Versuchskörper

Für das Einbetten der trepanierten vorausgewählten Zähne wurden die Anteile des Muffelsystems, die den Hohlraum bilden, mit handelsüblicher Vaseline isoliert. Der apikale Bereich der Zähne wurde mit Modellierwachs (Yeti Dentalprodukte, Engen) verschlossen, um ein Eindringen von flüssigem Kunststoff zu vermeiden. In die untere Ebene des Mittelblocks wurde ein Zwischenstück aus Aluminium eingeschoben und das System mit Hilfe der Querverschraubungen verschlossen.

Die Fixierung des Zahnes auf dem Zwischenstück erfolgte mit Hilfe eines Reamers der Größe ISO 15 (Müller & Weygandt, Bidingen), der durch Peripheriewachs (Heraeus-Kulzer, South Bend, USA) gehalten wurde. Es wurde darauf geachtet, dass die mesialen Wurzeln Kontakt zum Zwischenstück hatten und die bukkale Fläche des Zahnes zum Außenstück mit zwei Längsrillen zeigte.

Der Hohlraum wurde mit dem Kunststoff Paladur (Heraeus, Hanau, Deutschland) bis zur Schmelz-Zementgrenze des Zahnes aufgefüllt. Die Polymerisation erfolgte unter Druck für 15 Minuten.

Der Versuchskörper wurde anschließend mit einer Kunststofffräse bearbeitet. Nach Vergabe der Versuchsnummer und Beschriftung auf dem Kunststoff wurde der Versuchskörper in Wasser gelagert. Abb. 4.2.2.1 zeigt einen präparierten Zahn im zentralen Teil des Muffelblocks.

Abb. 4.2.2.1: Eingebetteter Zahn mit Reamer auf Röntgenlänge

4.2.3 Anfertigung der präoperativen Röntgenaufnahmen

Es wurden für jeden Zahn zwei Röntgenbilder angefertigt; eine Aufnahme des mesiobukkalen und eine Aufnahme des mesiolingualen Kanals. Der Versuchskörper wurde im mittleren Muffelblock reponiert und mit einem Reamer der Größe ISO 10 (Müller & Weygandt, Bidingen) im Wurzelkanal versehen. Der Reamer wurde auf die Röntgenlänge von 19 mm eingemessen.

Die Fixierungshilfe für den Röntgentubus und der Halter für den Sensor wurden angebracht. Die Abb. 4.2.3.1 und 4.2.3.2 zeigen den Sensorhalter und die Fixierungshilfe am mittleren Muffelblock.

Die Röntgenaufnahmen wurden in Rechtwinkeltechnik mit dem Röntgensystem Gendex expert DC (KaVo Dental, Biberach) erstellt. Die Übertragung der Daten erfolgte mit dem digitalen VISUALIX eHD Sensorsystem (KaVo Dental, Biberach) der Größe 1 (37,5 x 25,5 mm, Pixelmatrix 1590 x 1024). Die Belichtungszeit betrug bei allen Aufnahmen 0,08 sec bei einer festen Röhrenspannung von 65 kV und Anodenstrom 0,7 mA. Die Aufnahmen wurden im JPG-Format gespeichert.

Abb. 4.2.3.1: Sensorhalter mit Klammerkreuzen (l), Fixierungshilfe für Röntgentubus (r).

Abb. 4.2.3.2: Einstellung zur Röntgenaufnahme mit Versuchskörper

4.2.4 Bestimmung des präoperativen Krümmungswinkels

Die Messung des Krümmungswinkels (α) erfolgte nach SCHNEIDER (1971) wie folgt: Es wird eine Gerade (I) durch den koronalen Anteil des Wurzelkanals gezogen. Eine zweite Gerade (II) verläuft von der Wurzelspitze zu dem Punkt (P), an dem die erste Gerade aus dem Wurzelkanal abweicht. Der Winkel zwischen den Geraden I und II bildet den Krümmungswinkel nach apikal (Abb. 4.2.4.1).

Mit einem Graphikprogramm (Paint, Version 5.1. Microsoft Corporation, Redmond, USA) wurden die Geraden I und II in die digitalen Röntgenbilder eingezeichnet und gespeichert. Anschließend wurden die Winkel in den Röntgenbildern mit der Software ImageJ (Wayne Rasband, National Institutes of Health, Maryland, USA) gemessen.

Ausschließlich Zähne mit einem Krümmungswinkel der mesialen Kanäle zwischen 20 und 40 Grad wurden in die Arbeit einbezogen.

Abb. 4.2.4.1: Bestimmung des Krümmungswinkels nach SCHNEIDER (1971),
(verändert aus SCHÄFER ET AL. 2002, Mit freundlicher Genehmigung des Autors)

4.2.5 Bestimmung des präoperativen Krümmungsradius

Zur Beurteilung des Erfolges der operativen Maßnahme muss die Veränderung des Radius (r) prä- und postoperativ festgestellt werden. Der Krümmungswinkel (alpha) kann nach der Methode von SCHNEIDER (1971) bestimmt werden. Dabei wird von einem hypothetischen Kreis und einem gleichschenkligen Dreieck ausgegangen. Zwei leicht zu identifizierenden Punkte A und P dienen als Kreissehne (s) (SCHÄFER ET AL. 2002, ZHANG & HU 2010). Der Punkt A befindet sich an der Instrumentenspitze im Röntgenbild und die Stelle an der die Gerade I den Wurzelkanal verlässt bezeichnet den Punkt P (Abb. 4.2.5.1). Die Berechnung des Krümmungsradius wurde nach mathematischer Umstellung mit folgender Formel durchgeführt:

$$r = \frac{s}{2 \sin \alpha}$$

Abb. 4.2.5.1: Bestimmung des Radius,
(verändert aus SCHÄFER ET AL. 2002, Mit freundlicher Genehmigung des Autors)

4.2.6 Einteilung in die Versuchsgruppen

Die Versuchskörper wurden in drei Gruppen eingeteilt. Die Verteilung erfolgte randomisiert. Anschließend wurden die Mittelwerte der Parameter Wurzelkanalkrümmung und -radius für die bukkalen und lingualen Wurzelkanäle bestimmt. Durch den Tausch einzelner Versuchskörper erfolgte eine Annäherung der Mittelwerte für alle Versuchsgruppen. In der Tab. 4.2.6.1 sind die präoperativen Werte dargestellt.

Tab. 4.2.6.1: Präoperative Wurzelkanalkrümmung und Radien.

	Kreissehne (prä)	Winkel α (prä)	Radius (prä)
	S [mm]	[°]	[mm]
RECIPROC®	5.6	27,6	6.2
Wave One™	5.4	27,3	6.0
One Shape®	5.5	27,7	6.1

4.3 Versuchsdurchführung

Die Wurzelkanalpräparation wurde an insgesamt 45 Unterkiefermolaren durchgeführt. Auf jede Gruppe entfielen somit 15 Zähne bzw. 30 Wurzelkanäle. Die Wurzelkanäle wurden den Herstellervorgaben entsprechend mit den Systemen RECIPROC®, Wave One™ und One

Shape® präpariert. Die Präparation wurde auf Basis standardisierter Arbeitsabläufe durchgeführt (Abb. 4.3.1). Für alle Versuchsgruppen konnte der Motor VDW.Silver® RECIPROC® (VDW, München, Deutschland) verwendet werden. Die Abb. 4.3.1 zeigt die Arbeitsabläufe am Beispiel der R 25-Feile des RECIPROC®-Systems. Die Abläufe erfolgten bei allen drei Versuchsgruppen identisch. Angepasst wurden die Programmwahl und das Instrument.

Abb. 4.3.1: Arbeitsabläufe am Beispiel der R25-Feile des RECIPROC®-Systems

4.3.1 Präparation des mesiobukkalen Wurzelkanals

Die Präparation des mesiobukkalen Wurzelkanals erfolgte entsprechend den Empfehlungen der Hersteller nach der Crown-Down-Technik mit jeweils einer Feile. Je Feile wurde nur ein Zahn präpariert, sodass jede Feile insgesamt für zwei Wurzelkanäle Verwendung fand.

Vor Versuchsbeginn wurden für die mesiobukkalen und mesiolingualen Kanäle sowie für jedes System Arbeitsprotokolle erstellt (s. Anhang). Erfasst wurden die benötigten Zeiten der Einzelschritte und die Dauer der Spülungen. Die Spülungen erfolgten ausschließlich per Hand. Zwischenfälle wie Stufenbildung, apikale Blockade, Perforationen der Wurzel, Fraktur des Instruments und Verlust der Arbeitslänge wurden ebenfalls notiert.

Die mesiobukkalen Wurzelkanäle dienten zur Untersuchung der folgenden Parameter:

- Änderung der Wurzelkanalkrümmung und des Radius
- Messung der Arbeitszeit und Dauer der Spülzeiten
- Sauberkeit der Wurzelkanalwände nach der Präparation durch Beurteilung von Smear Layer und Debris
- Zwischenfälle.

4.3.2 Präparation mit dem System RECIPROC®

Vor jeder Präparation wurde das vorinstallierte Programm „Reciproc all“ am Motor eingestellt. Anschließend erfolgt eine Spülung mit Natriumhypochlorit in 3%iger Lösung. Nach Sondierung des Kanals und Sicherstellung des Gleitpfades mit einem Handinstrument der Größe ISO 10 wurde mit der Präparation begonnen. Für alle Kanäle wurde das kleinste Instrument der RECIPROC®-Reihe verwendet. Das Instrument R25 besitzt die ISO-Größe 25 mit einer Konizität von 8% an der Instrumentenspitze.

Die Präparation erfolgte ohne Druck mit bürstenden Auf- und Abbewegungen. War ein Widerstand spürbar, so wurde das Instrument zurückgezogen. Nach drei Wiederholungen war ein Präparationszyklus beendet. Es erfolgte die Reinigung des Instruments im Clean Stand. Um eine erneute Verschmutzung und die Gefahr der Verblockung zu verringern, wurden die verbliebenen Dentin-Späne entfernt. Nach gründlicher Spülung mit 2 ml NaOCl 3% wurde der Wurzelkanal mit einem Handinstrument der Größe ISO 10 und einer Arbeitslänge von 19 mm rekapituliert. Die Präparationszyklen wiederholten sich bis zum Erreichen der Arbeitslänge von 18 mm. Nach der Fertigstellung der Präparation erfolgte die erneute Rekapitulation des Kanals und die Abschlussspülung mit 5 ml EDTA 5%.

Von den präparierten Kanälen wurden postoperative Röntgenaufnahmen angefertigt. In den Wurzelkanal wurde für die spätere Auswertung ein Reamer der ISO-Größe 15 auf die präparierte Arbeitslänge von 18 mm eingebracht.

4.3.3 Präparation mit dem System Wave One™

Die Präparation mit dem System Wave One™ erfolgt analog der oben beschriebenen Weise. Nach Wahl des Programms „Wave One all“ erfolgt die Präparation entsprechend des festgelegten Arbeitsprotokolls. Hier fand die Feile „primary“ für alle Kanäle der Versuchs-

gruppe Verwendung. Das Instrument entspricht der ISO-Größe 25 mit einer Konizität an der Instrumentenspitze von 8%.

Nach Beendigung der Präparation erfolgten die Abschlussspülung und die Anfertigung der postoperativen Röntgenaufnahmen mit einem Reamer der ISO-Größe 15 auf der präparierten Arbeitslänge von 18 mm.

4.3.4 Präparation mit dem System One Shape®

Im Gegensatz zu den beiden bereits beschriebenen Systemen arbeitet One Shape® in einer 360°-Vollrotation. Es gab keine speziell für dieses System vorgegebene Programmwahl am Versuchsmotor. Am Gerät wurde entsprechend der Herstellerempfehlung eine feste Programmierung vorgenommen (400 gcm/400 rpm). Auch hier wurde die Präparation entsprechend den im Protokoll standardisierten Arbeitsschritten vorgenommen.

Die Feile im Versuch entsprach der ISO-Größe 25 mit einer Konizität von 6%. Nach Erreichen der Arbeitslänge wurde die Präparation beendet und es erfolgten die Abschlussspülung, Rekapitulation mit einem Reamer der ISO-Größe 10 und die postoperative Röntgenaufnahme.

4.3.5 Anfertigung der postoperativen Röntgenaufnahmen

Die postoperativen Röntgenaufnahmen sollten mit exakt gleichem Strahlengang angefertigt werden. Die Positionierung des Röntgentubus und -sensors erfolgte entsprechend der präoperativen Röntgeneinstellung. Die Bohrungen im Muffelsystem gaben diese exakte Position vor.

Für die Auswertung der Röntgenaufnahmen wurde auch hier ein Handinstrument (Reamer ISO-Größe 15) auf die Arbeitslänge von 18 mm in den Kanal eingebracht.

4.3.6 Vorbereitung der Querschnittsanalyse

Dieser Schritt erfolgte vor der Präparation des mesiolingualen Wurzelkanals. Die Präparation und die postoperativen Röntgenaufnahmen des mesiobukkalen Kanals waren zu diesem Zeitpunkt bereits durchgeführt.

Die Versuchskörper wurden mit einem Präzisionstrennsystem in horizontale Sägeschnitte geteilt (Abb. 4.3.6.1). Vom apikalen Ende beginnend wurden jeweils drei Sägeschnitte mit einer Stärke von jeweils drei Millimetern abgetrennt und markiert.

Anschließend wurden die Querschnitte unter einem Auflichtmikroskop (Motic SMZ 168, Motic, Hong Kong, China) bei 40facher Vergrößerung fotografiert (Lumix DMC-TZ7, Panasonic Corporation, Osaka, Japan). Als Größenreferenz für die spätere Auswertung diente ein kieferorthopädischer Draht (0,10 Biostarter, Forestadent Bernhard Förster GmbH, Pforzheim), der in die Aufnahme integriert wurde.

Eine weitere Aufnahme der Querschnitte erfolgte nach der Präparation des mesiolingualen Kanals. Die postoperativen Fotografien erfolgten entsprechend der präoperativen Einstellung am Mikroskop.

Abb. 4.3.6.1: Herstellung der horizontalen Sägeschnitte

4.3.7 Präparation des mesiolingualen Kanals

Die vier Segmente konnten für die mesiolinguale Wurzelkanalpräparation anhand der Querrillen des Muffelsystems exakt repositioniert werden. Die Bearbeitung des mesiolingualen Kanals erfolgte analog der Präparation des mesiobukkalen Kanals.

An den mesiolingualen Wurzelkanälen wurden folgenden Parameter untersucht:

- Änderung der Wurzelkanalkrümmung und des Radius
- Messung der Arbeitszeit und Dauer der Spülzeiten
- Veränderung des Wurzelkanalquerschnittes in Qualität und Quantität
- Zwischenfälle

4.3.8 Herstellung der Proben für das Rasterelektronenmikroskop

Wegen der unzureichenden Effektivität der Spüllösungen im gesägten mesiolingualen Kanal wurden diese nicht zur rasterelektronenmikroskopischen Beurteilung herangezogen. Lediglich in den mesiobukkalen Kanälen konnte die Spüllösung den Anforderungen entsprechend angewendet werden. Je Versuchskörper wurden drei Proben vorbereitet, jeweils eine Probe des apikalen, medialen und koronalen Kanalanteils. Mit einer diamantierten Trennscheibe (Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo) wurde bis zum Kanallumen gesägt, ohne dieses zu eröffnen. Anschließend konnte diese Sollbruchstelle leicht mit Hilfe eines Heidemannspatels gebrochen werden. Die Fragmente wurden nun mit dem Kanallumen nach oben auf Aluminiumnieten (DIN 661, 3,0 mm x 12,0 mm) aufgebracht. Zu beachten war, dass eine ungehinderte Aufsicht auf die Kanalwand möglich ist. Als Befestigungsmaterial diente handelsüblicher Sekundenkleber (UHU, Bühl). Um eine Beeinflussung während der Bewertung der Proben auszuschließen, erfolgte eine erneute Codierung. Im Anschluss wurden alle 135 Proben bis zur rasterelektronenmikroskopischen Beurteilung im Exsikkator (W. Kranich, Göttingen) gelagert. Nach der Trocknung konnten die Proben im Sputter-Coater (SC 51, Fissons Instruments, Uckfield, Großbritannien) mit einer Goldschicht bedampft und anschließend ausgewertet werden.

4.4 Auswertung und statistische Verfahren

Es wurden die drei maschinellen Nickel-Titan-Systeme RECIPROC[®], Wave One[™] und One Shape[®] untersucht. Dabei wurde geprüft, ob Unterschiede hinsichtlich der zu untersuchenden Parameter (s. Kap. 4.3.1 und 4.3.7) zwischen den Systemen bestehen.

Bei Vergleich von mehr als zwei Gruppen wird die statistische Auswertung der Instrumentengruppen mit dem Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass keine Unterschiede der untersuchten Instrumente vorliegen. Damit ergibt sich die folgende Nullhypothese (H_0):

$$H_0: \text{Gruppe A} = \text{Gruppe B} = \text{Gruppe C}$$

Zur Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese werden der H-Wert und die χ^2 -Verteilung errechnet und wie folgt verglichen:

H-Wert > χ^2 -Wert: Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Gruppen sind unterschiedlich.

H-Wert < χ^2 -Wert: Die Nullhypothese H_0 wird angenommen. Die Gruppen sind gleich.

Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $p = 0,05$ festgelegt. Unterhalb dieses Grenzniveaus wurden die Werte als signifikant angesehen und die Nullhypothese verworfen. In diesen Fällen wurde ein Post-Hoc-Test durchgeführt und die Gruppen gegeneinander getestet. Hierfür wurde der Mann-Whitney-U-Test als statistisches Verfahren verwendet.

Die gesamte statistische Analyse erfolgte mit dem Software SPSS 17 (IBM, New York, USA).

4.4.1 Untersuchung der Wurzelkanalbegradigung

Die Untersuchung der Wurzelkanalbegradigung fand durch Auswertung der prä- und postoperativen Röntgenaufnahmen statt. Für diesen Vergleich müssen die Röntgenaufnahmen genau übereinander gelegt werden können. Dazu ist es notwendig, die Bilder einander anzugleichen. Die präoperative Aufnahme gilt als Referenz, auf die die postoperative Aufnahme angepasst wird. Um innerhalb der Bilder Flächen exakt messen zu können, muss ein Objekt mit bekannter Größe im Bild vorhanden sein. Die Klammerkreuze in den Röntgenbildern haben eine Breite von 1,175 mm. Im Bild wurde nun mit der Software QGIS (qgis.org) die Anzahl der Pixel gemessen, die der Breite der Klammerkreuze entsprechen. Somit konnte anschließend die Größe eines Pixels bestimmt werden (0.168 mm). Dem Referenzfoto konnte nun ein kartesisches Koordinatensystem mit definierter Pixelgröße zugewiesen werden. Damit wurde das Referenzbild vermessbar. Das Zielbild (postoperative Aufnahme) konnte nun an das Referenzbild angepasst werden (Abb. 4.4.1.1). Bei der sogenannten Georeferenzierung wird anhand von Passpunkten eine Bildtransformation gerechnet, die dem Zielbild die neue Lage und Koordinaten zuweist (RICHARDS 2006). Mit der Software qgis wurden korrespondierende Passpunkte im Referenz- und Zielbild gesucht, und die Georeferenzierung durchgeführt. Als Passpunkte wurden markante Punkte in den Bildern ausgewählt, die auf beiden Aufnahmen deutlich erkennbar waren. Hilfreiche markante Punkte sind z. B. Füllungsrän­der, Konkrement­e im Wurzelbereich, Fissuren, Höckerspitzen, Schmelz-Zement-Grenzen und Kalzifizierungen.

Der an den präoperativen Aufnahmen festgelegte Winkel und die zugehörigen Geraden I und II wurden mit der Software qgis digitalisiert.

Die Winkel der postoperativen Aufnahmen wurden anschließend bestimmt und ebenfalls digitalisiert. Damit können die Veränderungen später in der postoperativen Aufnahme visualisiert werden. Damit sind die Geraden aus den präoperativen Aufnahmen auf der postoperativen Aufnahme deutlich erkennbar und die Anforderungen an die Auswertung (NORDMEYER ET AL. 2011) wurden erfüllt.

Analog zur präoperativen Berechnung des Krümmungsradius erfolgte die Bestimmung des postoperativen Radius.

Abb. 4.4.1.1: Koordinatensysteme mit definierten Passpunkten im Referenz- und Zielbild, (verändert aus Richards 2006, Mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlags)

4.4.2 Auswertung des Wurzelkanalquerschnittes

Die Wurzelkanalquerschnitte wurden anhand der Querschnittsform und der Diskrepanz zwischen prä- und postoperativer Überlagerung nach LOUSHINE ET AL. (1989) bewertet. Dabei wird die Querschnittsform in drei Kategorien unterteilt:

Kategorie 1: annähernd runder Querschnitt

Kategorie 2: Annähernd ovaler Querschnitt

Kategorie 3: unregelmäßige Querschnittsform.

Querschnitte, die postoperativ eine runde oder ovale Form zeigten, konnten als akzeptabel eingeteilt werden. Alle unregelmäßigen Formen gelten als inakzeptabel.

Die Einteilung der Diskrepanz zwischen prä- und postoperativer Kanalzirkumferenz erfolgte in fünf Kategorien:

- Kategorie 1: 0% Wandkontakt zwischen prä- und postoperativem Kanal
- Kategorie 2: < 25% Wandkontakt zwischen prä- und postoperativem Kanal
- Kategorie 3: > 25% Wandkontakt zwischen prä- und postoperativem Kanal
- Kategorie 4: < 50% Wandkontakt zwischen prä- und postoperativem Kanal
- Kategorie 5: < 75% Wandkontakt zwischen prä- und postoperativem Kanal.

Alle Fragmente, die der Kategorie 1 oder 2 zugeordnet wurden, werden akzeptiert, jede Einteilung mit einem Wandkontakt > 25% wurde als inakzeptabel bewertet (Abb. 4.4.2.1).

Für die Auswertung wurden die prä- und postoperativen Fotografien überlagert. Die postoperativen Fotografien waren, bedingt durch die Aufnahmetechnik, nicht im exakt gleichen Winkel fotografiert worden. Durch die Georeferenzierung konnten diese Fehler jedoch korrigiert werden (Abb. 4.4.2.2). Der integrierte kieferorthopädische Draht wurde zur Größenreferenz verwendet, um die tatsächliche Pixelgröße zu bestimmen. Ein Pixel entsprach dabei 0,003 mm. Als Passpunkte wurden markante Punkte in beiden Aufnahmen, wie Maserung des Dentins, Reste des blauen Peripheriewachses und Konkremente verwendet.

Abb. 4.4.2.1: Beispielbilder eines Querschnittes,
[ohne Wandkontakt(l), mit Wandkontakt <25% (r)]

Abb. 4.4.2.2: Beispielbild eines Sägeschnittes mit zwei exemplarischen Passpunkten,
[präoperatives (l) und postoperatives Bild (r)]

4.4.3 Bewertung der Proben für das Rasterelektronenmikroskop

Zur Bewertung des verbliebenen Smear Layers und Debris wurden die vorbereiteten Proben für das Rasterelektronenmikroskop verblindet. Zwei unabhängige Observer bewerteten die Proben nach entsprechender Kalibrierung. Die Kalibrierung wurde anhand von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von Debris und Smear Layer vor der Bewertung durchgeführt.

Die beiden Parameter Debris und Smear Layer wurden gesondert betrachtet und bewertet. Das offizielle endodontologische Lexikon der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung bezeichnet Debris als Überbleibsel, Rückstände und abgestorbene Zellen im Wurzelkanal (HEIDEMANN 2001). Sie liegen der Wurzelkanalwand locker auf. Der Smear Layer, auch Schmierschicht, ist ein oberflächlicher Debrisfilm, der nach instrumenteller Bearbeitung des Dentins verbleibt. Er beinhaltet Dentinpartikel, Reste von Pulpagewebe, bakterielle Anteile und zurückgebliebene Spüllösungen. Die Wurzelkanalwand ist bedeckt und die Dentintubuli verstopft.

Für diese Arbeit wurden die Ergebnisse der Bewerter in Scores für den jeweiligen Parameter übertragen. Dabei fanden Fotografien der fünf Scores nach HÜLSMANN (1998) als Referenz Verwendung. Die Vergrößerung zur Beurteilung des Debris lag bei 200x.

Die Scores nach HÜLSMANN (1998) lauten:

Score 1: Saubere, glatte Kanalwand oder nur vereinzelte kleine Auflagerungen

Score 2: Wenige kleine Debrisinseln

Score 3: Zahlreiche Debrisinseln, < 50% der Kanalwand von Debris bedeckt

Score 4: > 50% der Kanalwand von Debris bedeckt

Score 5: Gesamte oder fast gesamte Kanalwand von Debrissschicht bedeckt.

Der Smear Layer wurde bei 1000facher Vergrößerung begutachtet und nach folgenden fünf Scores eingeteilt:

Score1: Keine oder fast keine Schmierschicht an der gesamten Wand, Dentintubuli überwiegend offen

Score2: Dünne, homogene, aber gleichmäßige Schmierschicht an der gesamten Wand, nur vereinzelt offene Dentintubuli

Score3: Gesamte Kanalwand von einer inhomogenen Schmierschicht bedeckt

Score4: Inhomogene Schmierschicht mit großen Debrisinseln an der gesamten Kanalwand

Score5: Kanalwand nicht bearbeitet, dichte, inhomogene Schmierschicht.

4.4.4 Bewertung der Arbeitszeit

In dieser Arbeit wurde die Arbeitszeit in drei Abschnitte unterteilt:

- Präoperative Arbeitszeit

Sie beinhaltet die benötigten Zeiten für die Programmwahl, für die Spülung vor der Präparation, für die Gleitpfadprüfung und für das Einspannen des Instruments.

- Intraoperative Arbeitszeit

Dieser Bereich setzt sich aus den Arbeitszyklen zusammen. Ein Arbeitszyklus besteht aus der Instrumentierung des Kanals mit den untersuchten Feilen und der gegebenenfalls erforderlichen Zwischenreinigung, wiederum bestehend aus der Reinigung des Instruments selbst, einer Zwischenspülung und des Rekapitulierens mit einem Handinstrument.

- Postoperative Arbeitszeit

Nach Erreichen der Arbeitslänge wurden die Zeiten der Abschlusspülungen und des Rekapitulierens notiert.

Die Einteilung erfolgt aufgrund der Anwendungsempfehlung der untersuchten Systeme. Die Anzahl der Arbeitszyklen hängt vom Erreichen der Arbeitslänge ab. In Abhängigkeit der Zyklen steigen oder sinken die durchgeführte intraoperative Spülzeit und die intraoperative Arbeitszeit.

Statistisch wurde für die Auswertungen der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Bei Abweichungen (Verwerfen der Nullhypothese) erfolgte im Anschluss die Prüfung der Gruppen mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests gegeneinander.

4.4.5 Bewertung der Arbeitssicherheit

Zur Bewertung der Arbeitssicherheit wurden Zwischenfälle notiert. Auf den Arbeitsbögen konnten Frakturen, Längenverluste, Verblockungen und Perforationen dokumentiert werden.

5. Ergebnisse

5.1 Wurzelkanalbegradigung und Veränderung des Radius

Präoperativ wurden die Krümmungswinkel und -radien zur Beurteilung der Veränderungen des Wurzelkanals vermessen. Anhand der Mittelwerte konnte die homogene Verteilung vor Versuchsbeginn bestätigt werden. In allen Gruppen ergaben sich annähernd gleiche Mittelwerte der gemessenen präoperativen Krümmungswinkel (RECIPROC® 27,6°, Wave One™ 27,3°, One Shape® 27,7°). Gleichmaßen homogen zeigten sich auch die Mittelwerte der präoperativen Radien (RECIPROC® 6,2 mm, Wave One™ 6,0 mm, One Shape® 6,1 mm). Eine Übersicht der präoperativen Werte für die Untersuchungsgruppen beinhaltet die Tab. 4.2.6.1.

Ebenfalls vor Versuchsbeginn wurden die Mittelwerte für die mesiobukkalen und mesiolingualen Wurzelkanäle gesondert betrachtet. Auch hier lag eine gleichmäßige Verteilung zwischen den Gruppen vor (Tab. 5.1.1).

Tab. 5.1.1: Mittlere präoperative Krümmungswinkel und -radien

	Kreissehne (mb prä)	Winkel (mb prä)	Radius (mb prä)	Kreissehne (ml prä)	Winkel (ml prä)	Radius (ml prä)
	S [mm]	[°]	[mm]	S [mm]	[°]	[mm]
RECIPROC®	5,7	28,7	6,1	5,4	26,6	6,3
Wave One™	5,3	27,6	5,8	5,5	27,0	6,2
One Shape®	5,4	27,8	6,0	5,6	27,5	6,2

In die Bewertung der Wurzelkanalbegradigung konnten die mesiobukkalen Kanäle vollständig einbezogen werden. In der Gruppe der mesiolingualen Kanäle mussten zwei Zähne aus der Wertung ausgeschlossen werden. Ein Zahn konnte im Muffelblock nicht repositioniert werden. Bei einem anderen Zahn frakturierte das Instrument im apikalen Bereich. Entsprechend wurden 43 mesiolinguale und 45 mesiobukkale Kanäle bewertet.

Die nicht nach Kanälen differenzierten Gruppen wurden statistisch gegeneinander getestet. Die Prüfung der Veränderung der Krümmungswinkel aller Kanäle ergab die Gleichheit der drei Gruppen ($p=0,957$). In der Gruppe One Shape® änderte sich der Winkel im Mittel um 1,28°, in der Gruppe RECIPROC® um 1,26° und in der Gruppe Wave One™ um 1,20°.

Die mesiobukkalen und mesiolingualen Wurzelkanäle wurden zudem separat statistisch getestet. Zwischen den Gruppen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der

Winkeldifferenz ($p_{mb}=0,731$, $p_{ml}=0,481$). Die Ergebnisse zeigen eine Änderung für die Gruppe RECIPROC® von 1,48°/1,00° (mb/ml), für Gruppe One Shape® von 1,08°/1,51° (mb/ml) und für die Gruppe Wave One™ von 0,80°/1,60° (mb/ml). In den Tab. 5.1.2 und 5.1.3 sind die prä- und postoperativen Winkel in der Übersicht angegeben.

Die maximale Begradigung der Krümmung liegt für die Gruppe One Shape® bei 7,12°, in der Gruppe Wave One™ bei 6,16° und in der Gruppe RECIPROC® bei 5,79°. In den Abb. 5.1.1 bis 5.1.6 werden positive und negative Präparationsergebnisse der untersuchten Präparationssysteme demonstriert.

Tab. 5.1.2: Prä- und postop. Krümmungswinkel und -radien der mesiobukkalen Kanäle

	Kreissehne (mb prä)	Winkel (mb prä)	Radius (mb prä)	Kreissehne (mb post)	Winkel (mb post)	Radius (mb post)
	S [mm]	[°]	[mm]	S [mm]	[°]	[mm]
RECIPROC®	5,7	28,7	6,1	5,6	27,2	6,3
Wave One™	5,3	27,6	5,8	5,3	26,8	5,9
One Shape®	5,4	27,8	6,0	5,5	27,7	6,3

Tab.: 5.1.3: Prä- und postop. Krümmungswinkel und -radien der mesiolingualen Kanäle

	Kreissehne (ml prä)	Winkel (ml prä)	Radius (ml prä)	Kreissehne (ml post)	Winkel (ml post)	Radius (ml post)
	S [mm]	[°]	[mm]	S [mm]	[°]	[mm]
RECIPROC®	5,4	26,6	6,3	5,4	24,6	6,7
Wave One™	5,5	27,0	6,2	5,6	25,4	6,6
One Shape®	5,6	27,5	6,2	5,7	26,00	6,7

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei der Analyse der Radiusänderung: Die durchschnittlichen Veränderungen der Gruppen sind annähernd gleich. Eine geringere Radiusveränderung zeigte sich bei der Bewertung der mesiobukkalen Kanäle. Alle Gruppen weisen eine durchschnittliche Radiusveränderung von rund 0,3 mm und weniger auf.

Die Wave One™-Gruppe zeigt eine durchschnittliche Änderung von 0,3 mm mit einem Maximalwert von 1,85 mm. Die Gruppe RECIPROC® weist einen Maximalwert von 2,41 mm mit einem Durchschnittswert von 0,29 mm auf. Der höchste Mittelwert findet sich bei der Gruppe One Shape®. Er beträgt 0,37 mm mit einem Maximum von 2,22 mm.

Abb. 5.1.1: Positives Präparationsergebnis mit dem System RECIPROC[®],
(präop. Rö (l, blau), postop. Rö (m, rot) und überlagerte Winkel (r))

Abb. 5.1.2: Negatives Präparationsergebnis mit dem System RECIPROC[®],
(präop. Rö (l, blau), postop. Rö (m, rot) und überlagerte Winkel (r))

Abb. 5.1.3: Positives Präparationsergebnis mit dem System Wave One[™],
(präop. Rö (l, blau), postop. Rö (m, rot) und überlagerte Winkel (r))

Abb. 5.1.4: Negatives Präparationsergebnis mit dem System Wave One[™],
(präop. Rö (l, blau), postop. Rö (m, rot) und überlagerte Winkel (r))

Abb. 5.1.5: Positives Präparationsergebnis mit dem System One Shape[®],
(präop. Rö (l, blau), postop. Rö (m, rot) und überlagerte Winkel (r))

Abb. 5.1.6: Negatives Präparationsergebnis mit dem System One Shape[®],
(präop. Rö (l, blau), postop. Rö (m, rot) und überlagerte Winkel (r))

Die statistische Auswertung bestätigte bei allen Tests die Nullhypothese ($p_{\text{gesamt}} = 0,944$, $p_{\text{mb}} = 0,782$ und $p_{\text{ml}} = 0,794$). Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Systemen hinsichtlich der Wurzelkanalbegradigung und der Veränderung der Radien.

Zur visuellen Darstellung der Versuchsergebnisse sind die Winkelveränderungen in den Abb. 5.1.7 und 5.1.8 in Boxplot-Diagrammen veranschaulicht. Im Diagramm zeigt sich eine deutliche Verlängerung zu den oberen Extremwerten. Weiterhin fällt auf, dass die mesio-bukkalen Mediane der Gruppen RECIPROC[®] und One Shape[®] stark von den mesio-bukkalen Mittelwerten abweichen (RECIPROC[®]: Median=0,32° und Mittelwert=1,48°, One Shape[®]: Median=0,47° und Mittelwert=1,08°). Diese Abweichung tritt bei den mesiolingualen Kanälen deutlicher hervor. Sie betrifft dort alle untersuchten Systeme. Für das RECIPROC[®]-System liegt der Median bei 0,261°, der Mittelwert jedoch ist 1,00°, das System Wave One[™] zeigt einen Median von 0,80° mit einem Mittelwert von 1,60°. Auch das System One Shape[®] weist eine Abweichung zwischen den Werten auf (Median=0,49° und Mittelwert=1,51°).

Abb. 5.1.7: Winkeldifferenz der mesiobukkalen Kanäle

Abb. 5.1.8: Winkeldifferenz der mesiolingualen Kanäle

5.2 Veränderungen des Wurzelkanalquerschnittes

Die prä- und postoperativen Querschnittsfotografien wurden digital übereinander gelagert und verglichen. Die Beurteilung erfolgte nach qualitativen und quantitativen Gesichtspunkten sowie getrennt nach apikalen, medialen und koronalen Wurzelanteilen.

5.2.1 Qualitative Bewertung der Kanalquerschnittsform

Die qualitative Bewertung beschreibt die postoperative Form des Wurzelkanalquerschnittes. Die präparierte Querschnittsform wurde in drei Kategorien unterteilt, rund, oval und unregelmäßig. Rund oder oval präparierte Querschnitte wurden als akzeptabel bewertet, unregelmäßig geformte Querschnitte entsprechen einer inakzeptablen Form.

Die präoperative Querschnittsform wurde statistisch auf die Verteilung in den Gruppen getestet. Es konnte für diese Verteilung kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p_{\text{apikal}}=0,714$, $p_{\text{medial}}=0,314$ und $p_{\text{koronal}}=0,787$).

Die statistische Kontrolle der postoperativen Querschnittsformen zeigte Unterschiede zwischen den Gruppen. In den apikalen und koronalen Anteilen können statistisch keine signifikanten Unterschiede der Gruppen festgestellt werden ($p_{\text{apikal}}=0,378$ und $p_{\text{koronal}}=0,937$).

Die medialen Schnitte dagegen weisen einen Unterschied auf ($p_{\text{medial}}=0,012$). Folglich unterscheiden sich die medialen Bereiche der Gruppen statistisch signifikant und die Nullhypothese wurde verworfen. Der Mann-Whitney-U-Test lässt eine Abweichung der Gruppe One Shape[®] erkennen. Das Testen der One Shape[®]-Gruppe ergab einen signifikanten Unterschied den anderen Gruppen gegenüber. In der Tab. 5.2.1.1 sind die Gruppenprüfungen mit ihren jeweiligen p-Werten angegeben.

Tab. 5.2.1.1: Statistische Ergebnisse der Gruppen des medialen Fragments,
(Gegentest: Mann-Whitney-U-Test)

	p-Wert	Annahme H0	Gruppen sind
RECIPROC [®] / Wave One [™]	0,556	ja	=
RECIPROC [®] / One Shape [®]	0,035	nein	≠
Wave One [™] / One Shape [®]	0,008	nein	≠

Die Übersicht der akzeptablen und inakzeptablen postoperativen Querschnitte ist in der Tab. 5.2.1.2 und der Abb. 5.2.1.1 dargestellt. Durch den Ausschluss zweier Zähne ergeben sich abweichende Gesamtzahlen der einzelnen Gruppen (Gruppe RECIPROC[®] n=39, Gruppe Wave One[™] n= 45, Gruppe One Shape[®] n=45). In der Gruppe RECIPROC[®] wurden zwei Zähne ausgeschlossen (1x keine Rekonstruktion der Fragmente und 1x Instrumentenfraktur).

Eine Übereinstimmung der Gruppen RECIPROC[®] und Wave One[™] mit 10 akzeptablen Präparationsformen zeigt sich im apikalen Bereich. In beiden Gruppen präsentiert sich eine ähnliche Zusammensetzung aus runden und ovalen Formen. Die RECIPROC[®]-Gruppe bein-

hält 5 runde und 5 ovale Querschnitte. Bei der Wave OneTM-Gruppe werden 6 runde und 4 ovale Formen gezählt. Drei apikale akzeptable Formen weniger enthält die Gruppe One Shape[®] mit 4 runden und 3 ovalen Zuordnungen.

Im medialen Bereich sticht die Gruppe der Wave OneTM-Instrumente hervor. Mit 13 runden Querschnitten und nur 2 unregelmäßigen Formen zeigt sich ein gutes Ergebnis. Die Gruppe RECIPROC[®] schließt sich mit 11 akzeptablen Formen dem guten Ergebnis an. Die akzeptablen Formen setzen sich aus 10 runden und 1 ovalen Querschnitt zusammen. Die dritte Gruppe, One Shape[®], zeigt eine Akzeptanz von 9 medialen Querschnitten, bestehend aus 5 runden und 4 ovalen Formen.

Im koronalen Anteil stehen die Gruppen Wave OneTM und One Shape[®] mit jeweils 11 akzeptablen, aus 9 runden und 2 ovalen Querschnittsformen zusammengesetzt, vor der RECIPROC[®]-Gruppe. Hier konnten 9 akzeptable Formen notiert werden, 7 runde und 2 ovale Präparationen.

Die Gruppe One Shape[®] weicht im medialen Bereich deutlich ab; 9 akzeptable Querschnitte und 6 inakzeptablen Querschnitte (60,0%) stehen den guten Ergebnissen der Gruppen RECIPROC[®] (84,6%) und Wave OneTM (86,7%) gegenüber.

Tab. 5.2.1.2: Übersicht der postoperativen Querschnittsformen

Bereich	Querschnittsform (Anzahl)	RECIPROC [®]	WaveOne TM	One Shape [®]
apikal	Rund	5	6	4
	Oval	5	4	3
	akzeptabel	10	10	7
	Unregelmäßig	3	5	8
medial	Rund	10	13	5
	Oval	1	0	4
	akzeptabel	11	13	9
	Unregelmäßig	2	2	6
koronal	Rund	7	9	9
	Oval	2	2	2
	akzeptabel	9	11	11
	Unregelmäßig	4	4	4
	Gesamt (n)	39	45	45
Gesamt	akzeptabel	30	34	27

Abb. 5.2.1.1: Verteilung der postoperativen Querschnittsformen der untersuchten Gruppen

5.2.2 Quantitative Bewertung des Kanalquerschnittes

Die quantitative Beurteilung beschreibt den Wandkontakt der Kanalaußenfläche anhand der prä- und postoperativen Querschnittsfotografien. Der Kontaktbereich beider Kanalwände der übereinander projizierten Aufnahmen wird evaluiert. Je geringer der Wandkontakt beider Querschnitte bewertet werden konnte, desto mehr bearbeitete Kanalwand ist zu verzeichnen. Im Idealfall liegt die präoperative Kanalaußenwand innerhalb der postoperativen Kanalaußenfläche. Die Bewertung entspricht in diesem Fall 0% Wandkontakt. Mit zunehmendem Kontakt beider Kanalwände sinkt der Anteil der bearbeiteten Areale.

Die Ergebnisse der drei Versuchsgruppen sind in der Tab. 5.2.2.1 und Abb. 5.2.2.1 aufgeführt. In den apikalen und koronalen Anteilen konnten in allen Gruppen 6 bis 9 Kanäle als akzeptabel eingestuft werden. Auffallend sind die medialen Bereiche aller Versuchsgruppen, die einen hohen Anteil von akzeptablen Zuordnungen aufweisen (Gruppe RECIPROC® aW=12, Gruppe Wave One™ aW= 13, Gruppe One Shape® aW=11).

Positive und negative Beispiele der Präparationsergebnisse sind in den Abb. 5.2.2.2 bis 5.2.2.4 dargestellt.

Tab. 5.2.2.1: Ergebnisse des Wandkontakts prä- und postoperativer Querschnitte,
(Anzahl der Präparate)

	RECIPROC®			WaveOne™			OneShape®		
	apikal	medial	koronal	apikal	medial	koronal	apikal	medial	koronal
0	3	4	2	4	8	6	4	3	5
<25%	4	8	4	3	5	3	3	8	2
>25%	2	0	4	4	1	5	7	4	5
>50%	3	0	2	1	1	0	0	0	2
>75%	1	1	1	3	0	1	1	0	1
Gesamt (n)	13	13	13	15	15	15	15	15	15
Kanäle									
<25%	7	12	6	7	13	9	7	11	7
(aW)									

aW-akzeptabler Wandkontakt

Abb. 5.2.2.1: Verteilung des Wandkontakts

Abb. 5.2.2.2: Präparationsergebnisse mit dem System RECIPROC®,
[positives Ergebnis (l) und negatives Ergebnis (r)]

Abb. 5.2.2.3: Präparationsergebnisse mit dem System Wave One™,
[positives Ergebnis (l) und negatives Ergebnis (r)]

Abb. 5.2.2.4: Präparationsergebnisse mit dem System One Shape®,
[positives Ergebnis (l) und negatives Ergebnis (r)]

5.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Wurzelkanalwand

Die Beurteilung der verbliebenen Präparationsrückstände auf der Kanalwand erfolgte durch die rasterelektronenmikroskopische Begutachtung zweier Observer. Lediglich die mesio-bukkalen Kanäle wurden in der Bewertung berücksichtigt. Die apikalen, medialen und koronalen Bereiche des Kanals wurden getrennt betrachtet. Vor der Sichtung erfolgte eine zufällige Reihung und Verblindung der Präparate. Beiden Observern waren Kanalbereich und die Gruppenzugehörigkeit während der Begutachtung unbekannt. Die Bewertung der 135 Probenkörper erfolgte anhand einer Einteilung in 5 Scores (s. Kap. 4.4.3.).

Ergänzend wurde die Übereinstimmung der beiden Observer geprüft. Um ein Maß der Kongruenz der Observer und ihrer zufälligen Übereinstimmungen bei der Probenbeurteilung zu erlangen, wurde der Cohen´s Kappa-Wert (COHEN 1960) errechnet. Der Kappa-Koeffizient eignet sich sehr gut zur Bewertung der Übereinstimmung bei kategoriellen Datenerfassungen (GROUVEN ET AL. 2007).

Nach COHEN ergaben sich die ungewichteten Werte von 0,93 für die Bewertung des Debris und von 0,96 für die Smear Layer-Bewertung. Werden die Werte gewichtet, erhält man den Wert 0,98 für die Debris-Bewertung und 0,99 für die Begutachtung des Smear Layers. Die Abweichungen der Observer betragen maximal 1 Score. Die vergebene Anzahl der Scores durch die Observer und ihre Abweichungen sind in den Tab. 5.3.1 und 5.3.2 dargestellt. Die Inter-Coder-Reliabilität der beiden Observer kann für Debris und Smear Layer als ausgezeichnet bezeichnet werden (LANDIS & KOCH 1977).

Tab. 5.3.1: Übereinstimmung der vergebenen Scores für Debris

Bewerter 1	Bewerter2					
	1	2	3	4	5	Summe
1	74	4				78
2		13	2			15
3		3	17			20
4				6		6
5				1	15	16
Summe	74	20	19	7	15	135

Tab. 5.3.2: Übereinstimmung der vergebenen Scores für Smear Layer

Bewerter 1	Bewerter2					
	1	2	3	4	5	
1	83	1				84
2		16	1			17
3			7			7
4			1	9	1	11
5				2	14	16
	83	17	9	11	15	135

5.3.1 Entfernung von Debris

Die drei Systeme weisen gute Ergebnisse für die Entfernung von Debris auf. Besonders in den medialen und koronalen Kanalanteilen präsentieren sich gute Ergebnisse. Die als akzeptabel bewerteten Proben betragen 10 bis 15 für die medialen und koronalen Bereiche. Besonders herausragend ist die Anzahl der akzeptierten Proben der Gruppe Wave One™ mit 14 Score 1-Bewertungen und einer Bewertung mit Score 2. Die vollständige Verteilung der Scores zeigen die Tab. 5.3.1.1 und die Abb. 5.3.1.1.

Tab. 5.3.1.1: Übersicht und Anzahl der Debris-Scores nach Bereichen und Systemen

	RECIPROC®			WaveOne™			OneShape®		
	apikal	medial	koronal	apikal	medial	koronal	Apikal	medial	koronal
Score 1	3	10	11	4	10	14	4	10	10
Score 2	2	1	1	4	3	1	1	0	3
Score 3	4	2	0	4	2	0	5	2	2
Score 4	3	0	1	1	0	0	1	1	0
Score 5	3	2	2	2	0	0	4	2	0
Gesamt (n)	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Scores 1+2	5	11	12	8	13	15	5	10	13

Abb. 5.3.1.1: Häufigkeit der Debris-Scores

In Bezug auf die Debrisbewertung fällt auf, dass die Gruppe Wave One™ gute Ergebnisse erzielt. Insgesamt jedoch zeigt sich eine auffallend negativere Bewertung der apikalen Abschnitte aller Gruppen. Ein apikales Beispiel der Gruppe Wave One™ zeigt die Abb. 5.3.1.2. Derselbe Zahn im koronalen Anteil ist in der Abb. 5.3.1.3 dargestellt.

Abb. 5.3.1.2: Vollständig bedeckte apikale Kanalwand, Debris,
(Beispiel der Gruppe Wave One™)

Abb. 5.3.1.3: Saubere koronale Kanalwand,
(Beispiel der Gruppe Wave One™)

5.3.2 Entfernung des Smear Layers

Analog zu den Ergebnissen aus Kapitel 5.3.1. können bei der Entfernung des Smear Layers gute Ergebnisse nachgewiesen werden. In den medialen und koronalen Bereichen zeigen sich überwiegend hohe Anzahlen von akzeptierbaren Ergebnissen. Von den 15 bewerteten Kanälen liegt die akzeptable Anzahl zwischen 12 bis 15. Die Gruppe Wave One™ zeigt signifikant bessere Resultate als die beiden übrigen Gruppen.

Die medialen Anteile waren wie folgt verteilt: Das System Wave One™ weist 14 akzeptable Kanäle auf, die Systeme RECIPROC® und One Shape® folgen mit 12 akzeptablen Kanälen. Noch bessere Ergebnisse lassen sich bei den koronalen Anteilen erkennen. Hier ist die Anzahl der akzeptablen Kanäle beim System Wave One™ mit 15 Vergaben des Score 1 hervorragend. Die Systeme RECIPROC® und One Shape® erreichten mit 12 und 13 akzeptablen Kanälen eine gute Reinigung. Eine geringere Anzahl der akzeptablen Vergaben zeigt sich im apikalen Bereich. Für die Wave One™-Gruppe konnten nur 6 Kanäle akzeptiert werden, beim One Shape®-System sind es 7 Kanäle. Die Gruppe RECIPROC® zeigt das bessere Ergebnis mit 9 akzeptablen Kanälen im apikalen Kanalanteil. Die gesamte Übersicht der Bewertung des verbliebenen Smear Layers ist in der Tab. 5.3.2.1 angegeben. In der Abbildung 5.3.2.1 ist die Vergabe grafisch dargestellt.

Tab. 5.3.2.1: Übersicht der Smear Layer-Scores nach Bereichen und Systemen

	RECIPROC®			WaveOne™			OneShape®		
	apikal	medial	koronal	Apikal	medial	koronal	apikal	medial	koronal
Score 1	6	10	10	4	14	15	5	9	10
Score 2	3	2	2	2	0	0	2	3	3
Score 3	2	1	1	2	0	0	1	1	0
Score 4	0	0	1	5	1	0	1	1	1
Score 5	4	2	1	2	0	0	6	1	1
Gesamt (n)	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Score 1+2	9	12	12	6	14	15	7	12	13

Abb. 5.3.2.1: Häufigkeit der vergebenen Smear Layer-Scores

5.4 Arbeitszeit

Der Zeitaufwand wurde für diese Studie in prä-, intra- und postoperative Abschnitte unterteilt. Die statistische Auswertung der Gesamtarbeitszeiten ergab keinen Unterschied zwischen den Gruppen. Gleichmaßen verhält es sich mit den prä- und postoperativen Zeiten ($p_{\text{prä}} = 0,761$ und $p_{\text{post}} = 0,489$). Die durchschnittlichen Zeiten der Systeme sind in Tab. 5.4.1 zusammengefasst.

Die Gruppen unterscheiden sich jedoch im Bereich der intraoperativen Zeiten signifikant (Kruskal-Wallis-Test, $p_{\text{intra}} = 0,000$). Dieser Bereich umfasst die benötigten Arbeitszyklen und die Präparationszeiten der Instrumente. Die Gruppen wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test gegeneinander getestet. RECIPROC[®] zu Wave One[™] unterscheiden sich nicht. Bei den Prüfungen der One Shape[®]-Gruppe gegen die anderen Gruppen ergaben sich signifikante Unterschiede (One Shape[®] zu RECIPROC[®] $p = 0,000$ und Wave One[™] zu One Shape[®] $p = 0,000$). Die durchschnittlichen Zeiten zeigt die Abgrenzung des Systems One Shape[®] zu den anderen Systemen. Es wurde mit dem One Shape-System weniger Zeit zur Präparation benötigt.

Angeichts der durchgeführten Zyklen fällt auf, dass in der Wave One[™]-Gruppe 54 Zyklen und bei den anderen Gruppen jeweils 48 Zyklen zur Präparation benötigt wurden. Zwei Kanäle der Gruppe RECIPROC[®] wurden aus der Bewertung ausgeschlossen. Bei einem Zahn frakturierte das Instrument und ein anderer Zahn konnte im Muffelblock nicht repositioniert werden.

Die statistische Analyse der benötigten Zyklen ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ($p = 0,612$).

Weiterhin wurden die durchschnittlichen Instrumentierungszeiten betrachtet. Die Instrumentierungszeit entspricht der reinen Arbeitszeit des Instruments im Wurzelkanal (Tab. 5.4.2). Alle Instrumente liegen in einem Bereich von 40 Sekunden (RECIPROC[®] 44,2 sec, Wave One[™] 41,8 sec und One Shape[®] 36,3 sec). Auffallend ist, dass die reine Instrumentierungszeit nicht der Normalverteilung entspricht (Abb. 5.4.1). Besonders das System RECIPROC[®] zeigt eine höhere Konzentration der mittleren Hälfte der Instrumentierungszeiten unterhalb des Medians.

Tab. 5.4.1: Mittlere Zeiten der prä-, intra- und postoperativen Arbeitsabschnitte

Zeit	RECIPROC [®]	Wave One [™]	One Shape [®]
prä	70,5	69,6	68,6
intra	91,9	88,7	70,1
post	141,5	142,2	140,5
gesamt	101,3	100,2	93,1

Tab. 5.4.2: Instrumentierungszeiten und benötigte Anzahl der Zyklen

	RECIPROC®	Wave One™	One Shape®
Instrumentierungszeit (sec)	45,6	41,8	36,3
Zyklen (n)	48	54	48
Kanäle (n)	28	30	30

Abb. 5.4.1: Durchschnittliche Instrumentierungszeit der drei untersuchten Systeme

5.5 Arbeitssicherheit

Zur Arbeitssicherheit zählen Zwischenfälle wie Perforation, Verblockung, Stufenbildung, Arbeitslängenverlust und Instrumentenfraktur.

In dieser Arbeit wurden 90 Wurzelkanäle präpariert, davon 83 ohne Zwischenfälle. Die entspricht einem komplikationslosen Einsatz der Instrumente in 74,7% der bearbeiteten Wurzelkanäle.

Bei der Anwendung des RECIPROC®-Systems kam es zu einer Instrumentenfraktur und einem Verlust an Arbeitslänge. Das Instrument frakturierte in einem gesägten Wurzelkanal mit einem Krümmungswinkel von 30,9°. Beim Öffnen des Muffelblocks fiel auf, dass die Instrumentenspitze zwischen das apikale und mittlere Fragment geraten war. Bei Präparation mit dem Wave One™-System mussten 5 Zwischenfälle notiert werden. Es gab drei Längenverluste, bei denen zwei der Zwischenfälle jeweils mit einer Blockade des Wurzelkanals kombiniert waren. Eine apikale Perforation und zwei Stufen traten bei der Präparation mit dem One Shape®-System auf. Den Tab. 5.5.1 bis 5.5.3 können die Zwischenfälle entnommen werden.

Tab. 5.5.1: Zwischenfälle in der Übersicht

	Stufe	Perforation	Fraktur	Längenverlust	Verblockung
RECIPROC®	0	0	1	1	0
Wave One™	0	0	0	3	2
One Shape®	2	1	0	0	0

Tab. 5.5.2: Zwischenfälle während der Präparation der mesiobukkalen Kanäle

	Stufe	Perforation	Fraktur	Längenverlust	Verblockung
RECIPROC®	0	0	0	1	0
Wave One™	0	0	0	1	
One Shape®	0	1	0	0	0

Tab. 5.5.3: Zwischenfälle während der Präparation der mesiolingualen Kanäle

	Stufe	Perforation	Fraktur	Längenverlust	Verblockung
RECIPROC®	0	0	1	0	0
Wave•One™	0	0	0	2	2
One Shape®	2	0	0	0	0

6. Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung der drei maschinellen Nickel-Titan-Systeme RECIPROC[®], Wave One[™] und One Shape[®] auf ihre klinische Verwendbarkeit. Um diese Arbeit unter standardisierten Bedingungen durchführen und anschließend mit Ergebnissen verwandter Studien vergleichen zu können, wurde der modifizierte Versuchsaufbau nach BRAMANTE ET AL. (1987) gewählt. Durch die Veränderungen des ursprünglichen Versuchsmodells durch CALHOUN & MONTGOMERY (1988), MCCANN ET AL. (1990) und HÜLSMANN (1998) ist es möglich, mehrere Parameter parallel zu untersuchen. Die Kanalmorphologie kann prä- und postoperativ analysiert werden.

6.1 Diskussion von Material und Methoden

6.1.1 Herstellung der Versuchskörper

Zum Vergleich der untersuchten Systeme wurden 45 humane Unterkiefermolaren ausgewählt und in 3 Gruppen unterteilt. Die Beschränkung auf Unterkiefermolaren liegt darin begründet, dass die mesialen Wurzelkanäle immer eine Krümmung aufweisen (CUNNINGHAM & SENIA 1992, KARTAL & CIMILLI 1997). Zum Vergleich unterschiedlicher Instrumentensysteme werden standardisierte Versuchsbedingungen empfohlen (EBELESEDER ET AL. 1995, HÜLSMANN 1998). Bei der Verwendung natürlicher Zähne hingegen beeinflusst die variable Anatomie der Wurzeln die Standardisierung der Untersuchungsmethode. Um dennoch eine annähernd einheitliche Verteilung der Durchschnittswerte von Wurzelkanalkrümmung und -radius zu erhalten, wurden die randomisierten Gruppen durch den Tausch einzelner Zähne angeglichen. Humane Zähne erlauben eine Studie unter möglichst realen Bedingungen (DEPLAZES ET AL. 2001, HÜLSMANN ET AL. 2003, HÜBSCHER ET AL. 2003, WEIGER ET AL. 2003).

Andere Autoren empfehlen simulierte Wurzelkanäle in Kunststoffblöcken. So soll gewährleistet werden, dass jedem Instrument die gleichen Anfangsbedingungen vorgegeben werden (CAMPOS & DEL RIO 1990). Eine Beurteilung der Reinigungswirkung ist bei künstlichen Wurzelkanälen nicht möglich. Auch die unterschiedliche Beschaffenheit von Dentin und Kunststoff werden diskutiert. Die abweichende Mikrohärte beider Materialien bedingt unterschiedliche Abrasionsverhalten (KAZEMI ET AL. 1996, MISERENDINO ET AL.

1988, LIM & WEBBER 1985). Die Bewertung der Feilensysteme in Bezug auf klinische Verwendbarkeit ist daher bei Verwendung von Kunststoffblöcken kritisch zu sehen (MORGENTAL ET AL. 2013).

6.1.2 Messung der Wurzelkanalbegradigung und Veränderung des Radius

Das Einpolymerisieren der Zähne in das Muffelsystem beeinflusst die Messung der Wurzelkanalkrümmung. Abhängig von der Position, in der sich der Zahn beim Einbetten befindet, wird der Winkel des Strahlengangs beim präoperativen Röntgen festgelegt. So mussten Zähne, die bei der Voruntersuchung als tauglich befunden wurden, nach dem Einbetten aus der Studie ausgeschlossen werden, da der Krümmungswinkel nicht mehr im Toleranzbereich von 20° bis 40° lag. Die Studie stützt sich bei der Radius- und Winkelbestimmung auf ein rein zweidimensionales Verfahren und ist somit vom Winkel des Strahlengangs abhängig. Ein einmal festgelegter Strahlengang bleibt jedoch während des gesamten Versuchsablaufs bestehen. Denkbar wäre eine weitere Modifizierung oder Erweiterung der hier angewendeten Bramante-Studie mit Hilfe der Mikrocomputertomografie (Mikro-CT). Die dreidimensionale Darstellung der Wurzelkanäle kann zusätzliche Aufschlüsse über das Verhalten der Instrumente in doppelt gekrümmten Kanälen geben. Einige Autoren nutzen bereits die Mikro-CT-Darstellung in vergleichenden Studien (KIM ET AL. 2013a). Eine Möglichkeit zur detaillierten Darstellung der Kanalmorphologie für endodontische Forschungszwecke wird durch die Kombination des Mikro-CT's und der 2D MinIP-Technik (Minimum intensity projection) empfohlen (LEE ET AL. 2014).

Die Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung dieser Studie entstammt der Publikation von SCHNEIDER aus dem Jahr 1971. Anhand von reproduzierbaren digitalen Röntgenbildern konnten für diese Studie die prä- und postoperativen Winkel bestimmt werden. Der Krümmungswinkel allein kann keine Aussage über den Schwierigkeitsgrad der Präparation geben. Deshalb wurde, wie von SCHÄFER ET AL. (2002) beschrieben, zusätzlich der Radius des Kanals berücksichtigt. Trotz der sorgfältigen Planung und der präzisen Festlegung der Orientierungspunkte zur Bestimmung der prä- und postoperativen Winkel und Radien fielen Differenzen auf. Durch die digitale Bildverarbeitung sind enorme Vergrößerungen möglich und somit auch kleinste Veränderungen der Parameter messbar. Andererseits bewirken geringste Abweichungen beim Setzen der Passpunkte Unstimmigkeiten.

6.1.3 Auswertung der Querschnittsfotografien

Nachdem die Daten für die prä- und postoperative Wurzelkanalkrümmung des mesiobukkalen Kanals erfasst und dokumentiert waren, erfolgte die Herstellung der horizontalen Sägeschnitte zur Bewertung der Querschnittsveränderung. Die prä- und postoperativen Fotografien der Querschnitte wurden digital übereinander gelagert. In früheren Studien erfolgte dies mit Diapositiven und mit Hilfe von Durchzeichnungen (HÜLSMANN ET AL. 2003, NORDMEYER ET AL. 2011). In dieser Arbeit wurde zusätzlich zur digitalen Bildverarbeitung die aus dem Fachgebiet der Geographie stammende Georeferenzierung herangezogen. Auf diese Weise konnten aufnahmebedingte Unterschiede ausgeglichen werden. Ungleiche Rotationswinkel und Vergrößerungen wurden digital verarbeitet und unter Beibehaltung der Dimensionen angepasst. Die Auswahl der Referenzpunkte erfolgte innerhalb der Zahnhartsubstanz. Auf diese Weise konnten andere Einflussgrößen ausgeschlossen werden.

Ein weiterer Nutzen liegt in der Wiederholbarkeit der exakten Überlagerung und damit auch einer genaueren Messbarkeit von Winkeln und Flächen. Bisher liegen noch keine zahnmedizinischen Arbeiten vor, in denen diese Methode Anwendung fand. In der Geographie ist die Georeferenzierung eine bewährte Methode zur Überlagerung von Satelliten- und Luftbildaufnahmen.

Die Bewertung der Sägeschnitte lässt keine Beurteilung über die gesamte Länge des Wurzelkanals zu. Es werden nur die Anteile in 3 mm, 6 mm und 9 mm im Abstand vom Apex evaluiert. Denkbar wäre der Einsatz eines Mikro-CT's in zukünftigen Studien.

6.1.4 Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung

Die Methode zur Probengewinnung bietet die Möglichkeit, die präparierte Kanalwand direkt zu betrachten. Die Bewertung von Debris und Smear Layer kann in derselben Sitzung durch Änderung der Vergrößerung erfolgen.

Durch Einbringen von Kerben ließen sich die Wurzelkanäle längs aufspalten und anschließend zur Bewertung im Rasterelektronenmikroskop vorbereiten. Apikale, mediale und koronale Anteile der Versuchskanäle wurden beurteilt. Durch Randomisierung und Verblindung wurde die Beeinflussung der Observer vermieden.

Kritisch zu sehen ist eine mögliche Verunreinigung der Segmente beim Auftrennen und Sägen. Staubpartikel können die Oberfläche der Kanalwand verschmutzen und somit die Bewertung beeinflussen.

6.1.5 Bewertung des Zeitaufwandes

Es ist sinnvoll, nicht nur die reine Instrumentierungszeit der Feile zu berücksichtigen, sondern auch die Zeiten für Spülungen, Instrumentenreinigung und die Programmwahl einzubeziehen. Letztendlich sind diese Arbeitsschritte in Bezug auf die untersuchten Instrumentensysteme und deren klinische Anwendung ebenso notwendig und benötigen Arbeitszeit. In dieser Studie wurde die benötigte Zeit in prä-, intra- und postoperative Bereiche unterteilt. Die Bereiche wurden klar definiert und die entsprechenden Arbeitsschritte festgelegt. Die präoperative Zeit umfasst die Programmwahl, die Spülung vor der Präparation, die Gleitpfadprüfung und das Einspannen des Instruments. Die postoperative Arbeitszeit bildet sich aus den Schritten nach Erreichen der Arbeitslänge. Es wurden die Zeiten der Abschluss-Spülungen und des Rekapitulierens notiert. Diese wiederkehrenden Arbeitsschritte können in der benötigten Zeit mit verschiedenen Durchführenden sehr variable Ergebnisse aufweisen. Somit ist es wichtig, dass alle Präparationen durch einen Behandler erfolgen und eine kontinuierliche Spülzeit eingehalten wird. Die Spülungen erfolgten anhand eines auf diese Studie abgestimmten Protokolls, das auf Basis eines allgemein wissenschaftlich anerkannten Spülprotokolls basiert.

Die intraoperative Arbeitszeit ist von der Anzahl der benötigten Arbeitszyklen abhängig. Zusammengesetzt aus den Arbeitszyklen und der gegebenenfalls erforderlichen Zwischenreinigung, Reinigung des Instruments, Zwischenspülung und Rekapitulation verlängert sich dieser Bereich durch Einhalten des Spülprotokolls. Nach jedem Zyklus erfolgte eine Zwischenspülung. HÜLSMANN schrieb 1998 den unterschiedlichen Techniken und der unterschiedlichen Instrumentenanzahl einen Einfluss auf abweichende Resultate hinsichtlich der Arbeitszeit zu. Im intraoperativen Bereich ist die Instrumentierungszeit enthalten und wurde gesondert dokumentiert.

Bereits frühere Studien zeigen signifikant kürzere Präparationszeiten von Nickel-Titan-Instrumenten im Vergleich zur manuellen Präparation (SCHÄFER & FRITZENSCHAFT 1999, KUM ET AL. 2000). Es ist jedoch zu beachten, dass kürzere Arbeitszeiten auch geringere Einwirkzeiten der Spülflüssigkeiten zur Folge haben. Denkbar wäre ein Zusammenhang zwischen Anzahl der Zyklen, d.h. entsprechend längerer Spülmittelkontakte der Kanäle und

der Sauberkeit der Kanalwand in Bezug auf Debris und Smear Layer. Dieser Zusammenhang sollte in Folgestudien untersucht werden.

6.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

6.2.1 Begradigung der Wurzelkanalkrümmung und Veränderung des Radius

Durch die Verwendung von nur einer Feile zur Präparation des gesamten Wurzelkanals wurde eine geringe Begradigung erwartet.

Im Vergleich unterscheiden sich die Krümmungswerte der drei untersuchten Systeme nur gering (RECIPROC® 1,26°, Wave One™ 1,2° One Shape® 1,28°). Zwischen den untersuchten Systemen konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die Werte liegen im akzeptablen Bereich und bestätigen die Vermutung der geringen Kanalbegradigung. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen die Resultate der Studie von YOO UND CHO (2012). Auch in ihrer Studie bewahrten die Ein-Feilen-Systeme den originalen Kanalverlauf. SABER ET AL. (2014) ermittelten in ihren Versuchen abweichende Werte. Die Änderung der Kanalkrümmung lag in ihren Versuchen für RECIPROC® bei 1,6°, für Wave One™ bei 1,8° und für One Shape® sogar bei 2,8°. Der Vergleich von RECIPROC® und Wave One™ mit Mtwo und ProTaper durch BÜRKLEIN ET AL. (2012) ergibt beachtlichere Begradigungen von 3,15° für RECIPROC® und 3,0° für Wave One™. ProTaper liegt in dieser Studie bei 3,1° und Mtwo bei 2,0°.

Bei der Betrachtung der Resultate in der Boxplot-Grafik fällt die Verlängerung zu den oberen Extremwerten aller Gruppen auf (Abb. 5.1.7 und 5.1.8). Auffällig sind die extremen Ausreißer in allen Untersuchungsgruppen. Die Werte der Gruppe One Shape® liegen bei den mesiobukkalen Kanälen symmetrisch im Interquartilsabstand verteilt. Dies spricht für eine gleichmäßige Verteilung der mittleren 50% der mesiobukkalen Werte des Systems One Shape® um den Medianwert. Werden die Einzelwerte hinzugezogen und mit der Grafik verglichen, so lässt sich erkennen, dass der obere Whisker lediglich durch einen Ausreißer, den Maximalwert von 7,12°, entstanden ist. Ausnahmslos weisen alle anderen Boxen eine Asymmetrie auf. Die mittleren 50%-Werte sind nicht gleichmäßig verteilt. Jede Box zeigt eine Verlagerung zum oberen Quartil und ist somit nach links schief. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Mehrheit der Werte unterhalb des Medians befindet.

Folglich ist der Großteil der gemessenen Werte mit einer geringeren Begradigung des Kanalverlaufs verbunden und positiv zu bewerten.

Eine Abweichung des Mittelwerts vom Medianwert tritt bei allen mesiobukkalen Gruppen auf (RECIPROC[®]: Median=0,32° und Mittelwert=1,48°, Wave One[™]: Median=0,17° und Mittelwert=0,8°, One Shape[®]: Median=0,47° und Mittelwert=1,08°). Ein deutlicheres Abweichen zeigt sich bei den mesiolingualen Kanälen. Bei der Gruppe RECIPROC[®] liegt der Median bei 0,261°, der Mittelwert wurde mit 1,00° bestimmt. Das System Wave One[™] weist einen Median von 0,804° mit einem Mittelwert von 1,6° auf. In der One Shape[®]-Gruppe liegen die Werte für den Median bei 0,492° und für den Mittelwert bei 1,51°. Auch hier spiegelt sich die Linksverschiebung der Werte zu geringeren Begradigungen wider.

Bei einigen Kanälen lässt sich eine sehr geringe Erhöhung der Kanalkrümmung messen. Aufgrund des allgemeinen Materialverhaltens der Nickel-Titan-Legierung sind diese möglichen Fehlmessungen nicht zwingend den Feilen zuzuschreiben. Differenzen bei der Repositionierung des Versuchskörpers im Muffelblock, geringe Abweichung des Strahlengangs beim prä- und postoperativen Röntgen oder eine Fehlmessung sind denkbar. Die Werte sind sehr gering, was auf einen Messfehler hindeutet. Der Maximalwert für Wave One[™] liegt bei -0,55° und bei -0,02° für One Shape[®]. Bei der Versuchsgruppe RECIPROC[®] gab es keine Ergebnisse dieser Art.

Im Vergleich zu Ergebnissen aus Studien anderer Nickel-Titan-Systeme liegen die gering erhöhten Werte dieser Untersuchung im akzeptablen Bereich. HÜLSMANN ET AL. (2003) ermittelten Werte einer mittleren Krümmungsänderung von 0,6° beim FlexMaster-Feilensystem. Eine geringere Änderung durch das gleiche System wurde in der vergleichenden Studie von NORDMEYER ET AL. (2011) gemessen, hier waren es nur 0,3°. Mit 4,1° zeigt sich eine deutlich höhere Abweichung vom Originalverlauf mit dem Endo-Eze AET (Ultradent, USA).

Zusammenfassend lässt sich bei den drei untersuchten Systemen ein guter Erhalt der originalen Wurzelkanalkrümmung feststellen. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen.

6.2.2 Qualitative Bewertung des Wurzelkanalquerschnittes

Im Idealfall resultiert nach der Präparation mit maschinell betriebenen Nickel-Titan-Feilen eine runde Präparationsform. Anhand der Querschnittsuntersuchung kann eine Überprüfung

eines gleichmäßigen Abtrags des Kanalwanddentins erfolgen. Erstrebenswert ist immer ein gleichmäßiger Abtrag des potenziell infizierten Dentins (LIM UND WEBER 1985).

Aus der Tab. 5.2.1.2 wird ersichtlich, dass die Mehrheit der postoperativen Querschnittsformen als akzeptabel eingestuft werden konnte. So zeigt sich bei der Gruppe RECIPROC® eine Akzeptanz in 76,9% der bewerteten Kanäle. Mit 75,5% liegt die Wave One™-Versuchsgruppe in der Nähe der Ergebnisse des RECIPROC®-Systems. Das One Shape®-System weist einen Anteil von 60% akzeptabel bewerteter Kanalquerschnitte auf.

In vergleichbaren Studien erreicht das FlexMaster-System 84% (NORDMEYER ET AL. 2011) und 70,8% (HÜLSMANN ET AL. 2003) akzeptabler Querschnittsformen. Weniger gute Ergebnisse erhalten PAQUE´ ET AL. (2005), nur die Hälfte der untersuchten Querschnitte wird in der Form akzeptiert (ProTaper 50%). Eine andere Untersuchung der Systeme Mtwo und ProTaper Universal weisen ähnliche Ergebnisse dieser Studie auf. 77,8% werden beim System Mtwo und 78,9% bei ProTaper als akzeptabel eingestuft (LINBEN 2013).

Die qualitative Beurteilung zeigt einen signifikanten Unterschied der Gruppen im Bereich des medialen Kanalanteils. Dort unterscheidet sich die Versuchsgruppe One Shape® signifikant von den Ergebnissen der anderen Gruppen. Die apikalen und koronalen Bereiche weisen keinen Unterschied der Gruppen auf. Gründe dafür können in der abweichenden Konizität der untersuchten Feilen liegen. Die Feilen der Systeme RECIPROC® und Wave One™ besitzen über die Länge der ersten 3 mm eine Konizität von 8%, die sich im Verlauf auf 4,3% und 5,5% reduziert. Das System One Shape® hingegen verfügt nur über eine Konizität von 6% über die gesamte Länge des Instruments. Die Unterschiede in den Präparationsformen können hier begründet liegen. Im apikalen Bereich weichen die Systeme nicht voneinander ab, weisen keinen signifikanten Unterschied auf. Die Instrumentenspitze entspricht bei allen Feilen der ISO-Größe 25. In der Höhe des ersten Sägeschnittes weichen die Querschnittsgrößen noch nicht sehr voneinander ab. Das führt zu ähnlichen Ergebnissen in diesem Bereich. Im koronalen Anteil wurde in dieser Studie mit *Gates-Glidden*-Bohrern gearbeitet. Der Kanaleingang an allen Versuchskörpern wurde vor der Präparation erweitert. Denkbar ist, dass dieser Kanalanteil anschließend nicht mehr stark durch die drei verschiedenen Feilensysteme verändert wurde.

6.2.3 Quantitative Bewertung des Querschnittes

Die quantitative Bewertung des Querschnittes zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei Systemen. Es gibt zwei auffallende Ergebnisbereiche in diesem Unter-

suchungsgebiet. Aus der Tab. 5.2.2.1 wird deutlich, dass die Ergebnisse der medialen Anteile positiv herausragen.

Der apikale Bereich fällt bei allen Systemen mit geringeren positiven Ergebnissen auf. So können 53,8% der apikalen Querschnitte des Systems RECIPROC® als akzeptabel bewertet werden. Die anderen Systeme, Wave One™ und One Shape®, ergeben 46,6% akzeptable Wandkontakte im apikalen Bereich. Vorstellbar wäre hier eine unzureichende Größe der Instrumente zur Präparation im apikalen Bereich. In Anlehnung an die Studie FORNARI ET AL. (2010) und BOUTSIUKIS ET AL. (2010) sollten die Ergebnisse dieser apikalen Analyse mit dem Ergebnis der rasterelektronischen Auswertung korrelieren. Sie stellten einen Zusammenhang zwischen der apikalen Präparationsgröße, unbearbeiteter Anteile der Kanalwand und verbliebenem Debris fest.

In den medialen Anteilen sind gute Ergebnisse dokumentiert. An der Spitze liegt das System RECIPROC® mit 92,3% akzeptablem Wandkontakt, gefolgt von der Gruppe Wave One™ mit 86,6% und einem ebenfalls guten Ergebnis schließt One Shape® mit 73,3% an.

Die koronalen Anteile sind den Ergebnissen des apikalen Bereichs ähnlich (46,2% RECIPROC®, 60% Wave One™ und 56,6% One Shape®). Eine zu geringe Präparationsänderung durch die drei Instrumentensysteme, nach vorangegangener Erweiterung mit *Gates-Glidden*-Bohrern, könnte hier zu diesem falsch negativen Ergebnis geführt haben.

Zu 64% konnte bei den Systemen RECIPROC® und Wave One™ der Materialabtrag als akzeptabel bewertet werden. Das System One Shape® liegt mit 56% in der Bewertung hinter den beiden anderen Systemen. Die Autoren vergleichbarer Studien berichten von geringeren Anteilen unbearbeiteter Kanalwand. Der Anteil der als akzeptabel bewerteten Proben liegt bei den Mehrfeilensystemen FlexMaster, Endo-Eze AET, Mtwo, ProTaper und S5 zwischen 70% und 90% (NORDMEYER ET AL. 2010, LINßEN 2013).

6.2.4 Reinigung der Wurzelkanalwand

Die Bewertungsübereinstimmung bei der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung zeigen die Tab. 5.3.1 und 5.3.2. Nach LANDIS UND KOCH (1977) ist die Kongruenz der beiden Observer als ausgezeichnet zu bewerten.

Die Entfernung von Auflagerungen auf der Kanalwand resultiert aus der apikalen Instrumentation und der Spülung der apikalen Region. Ein wichtiger Einflussfaktor sind die Größe und die Konizität des Instruments sowie die Wahl der Spülnadel (FORNARI ET AL. 2010, PARK ET AL. 2013). Die Wirkung der Spülflüssigkeit ist somit abhängig von der Größe

der apikalen Präparation, welche größer als ISO 25 sein sollte (BOUTSIOUKIS ET AL. 2010). Die Ergebnisse in Hinsicht auf die Debris-Entfernung in dieser Studie bestätigen diesen Zusammenhang. Die Abb. 5.3.1.1 zeigt die deutlich geringere Vergabe des Scores 1 in den apikalen Bereichen. In der Tab. 5.3.1.1 sind die sehr guten Ergebnisse in den medialen und koronalen Anteilen ersichtlich. Die beste Reinigung in Hinsicht auf die Debris-Entfernung war beim System Wave OneTM zu verzeichnen. Mit der Vergabe der Scores 1 und 2 von 86,6% im medialen und 100% im koronalen Anteil wurde ein sehr gutes Ergebnis erzielt. Die anderen Systeme weisen mit 73,3% (medial) und 80% (koronal) für RECIPROC[®] sowie 66,6% (medial) und 86,6% (koronal) für One Shape[®] gute bis annehmbare Ergebnisse auf. Die koronalen Ergebnisse könnten auf der Erweiterung der Zugangskavität durch die *Gates-Glidden*-Bohrer beruhen.

In Bezug auf die Entfernung des Smear Layers ähneln die Ergebnisse denen der Debris-Entfernung. Auch hier zeigt sich eine schlechtere Reinigung der apikalen Kanalanteile. Das System RECIPROC[®] reinigt mit 46,6% (Score 1) etwas besser im apikalen Bereich.

Die medialen und koronalen Anteile sind gut gereinigt. Die Vergabe der Scores 1 und 2, die einem akzeptierten Reinigungsergebnis entsprechen, konnten für RECIPROC[®] mit 80% (medial und koronal), für Wave OneTM mit 93,3% und 100% (medial/ koronal) sowie für One Shape[®] mit 80% und 86,6% (medial/ koronal) erfolgen. Es besteht ein signifikanter Unterschied für die Gruppe Wave OneTM aufgrund des sehr guten koronalen Ergebnisses.

Vorangegangene Studien mit gleicher Methode zur Bewertung der Reinigung zeigen Ergebnisse der Mehrfeilensysteme mit 70% und 80% für das FlexMaster-System (HÜLSMANN ET AL. 2003, NORDMEYER ET AL. 2011) sowie 73% für das Mtwo-System und 78% für das ProTaper Universal-System (LINBEN 2013). Bei Betrachtung und Vergleich mit den Ergebnissen dieser Studie zeigt sich, dass die drei untersuchten Systeme hinsichtlich ihrer Reinigung geeignet sind.

Da zum Zeitpunkt dieser Studie noch keine vergleichbaren Studien zur Debris-Entfernung und verbliebenen Smear Layer vorliegen, können keine Gegenüberstellungen erfolgen.

Einen nicht zu unterschätzenden Einfluss haben die Spülzeiten und –mittel bei der Reinigung der Kanalwand. Da bei der Versuchsdurchführung die Spülzeiten bei allen Gruppen annähernd gleich eingehalten wurden, kann dieser Einflussfaktor ausgeschlossen werden. Die wiederholte unzureichende apikale Sauberkeit lässt darauf schließen, dass die Spülflüssigkeit nicht hinreichend bis in den apikalen Bereich vordringen konnte.

Im Anschluss an die Präparation mit den geprüften Single-File-Systemen könnte eine stärkere apikale Erweiterung erfolgen. Die zusätzliche Anwendung einer weiteren maschinellen Feile mit größerer Instrumentenspitze wäre denkbar. Die Spülmittelwirkung im apikalen Bereich würde somit verbessert. Auch ein mehrmaliges Erreichen der Arbeitslänge vergrößert die apikale Präparation (JEON ET AL. 2014). Ein nicht uninteressanter Weg in diesem Zusammenhang, den DIETRICH ET AL. (2012) schon aufzeigten, ist ein Finishing der Präparation mit der SAF-Feile.

Zwei Grundsätze sollten jedoch beachtet werden: Trotz der enormen Zeitersparnis durch die Single-File-Systeme sollte die benötigte Zeit für die Spülmittelwirkung gesichert werden. Je weniger Zyklen zur Präparation benötigt werden, desto geringer fallen die Desinfektion und Reinigung durch die Spülmittel aus.

6.2.5 Zeitaufwand

Die durchschnittliche Instrumentierungszeit pro Kanal liegt bei allen Systemen unter einer Minute (RECIPROC® 44,2 sec, Wave One™ 41,8 sec und One Shape® 36,3 sec). Es liegen zwischen den Systemen keine signifikanten Unterschiede vor. Signifikante Unterschiede finden sich im intraoperativen Zeitbedarf. Dieser umfasst die Arbeitsschritte aller Zyklen bis zum Erreichen der Arbeitslänge. Die Gruppe One Shape® benötigt signifikant weniger Zeit als die anderen Systeme (RECIPROC® 91,9 sec, Wave One™ 88,7 sec und One Shape® 70,1 sec). Das Ergebnis lässt sich ebenfalls in der Grafik 5.4 1 ablesen. Das erste und dritte Quartil liegen dicht am Medianwert. Folglich konzentriert sich die mittlere Hälfte der Zeiterfassung um den Median.

Die gemessenen prä- und postoperativen Bereiche dienten zur Kontrolle der zeitlichen Koordination der Versuchsdurchführenden. Sie können keinen Beitrag zur Bewertung der Instrumente beitragen. In beiden Bereichen gab es keine signifikanten Unterschiede. Das bedeutet, dass der Anwender in dieser Arbeit mit annähernd gleichem Zeitbedarf der unterschiedlichen Arbeitsschritte arbeitete.

Die Ergebnisse der Studien, die den Ein-Feilen-Systemen eine schnellere Präparationszeit zusprachen, konnten in dieser Arbeit bestätigt werden (BÜRKLEIN & SCHÄFER 2012, BÜRKLEIN ET AL. 2013a). In der Studie von BÜRKLEIN ET AL. (2014a) wurden 109,3 sec zur Präparation mit dem Mtwo-System benötigt. Die Präparationszeiten für das RECIPROC®-System lagen bei 45,1 sec und für das One Shape®-System bei 43,2 sec. Damit liegen die in dieser Studie gemessenen Präparationszeiten ebenfalls in diesem Bereich. Die Arbeit von

BÜRKLEIN & SCHÄFER (2012) wies einen anderen Zeitbedarf auf. RECIPROC® lag bei 73,3 sec und Wave One™ bei 88,4 sec. Auch die Gruppe SABER ET AL. (2014) stellte eine geringere Präparationszeit durch die Ein-Feilen-Systeme fest. Hier wurden folgende Präparationszeiten gemessen: RECIPROC® 81 sec, Wave One™ 115 sec und One Shape® 57 sec.

Der Vergleich anderer Studien zeigt einen deutlich höheren Zeitaufwand mit Mehrfeilensystemen. PAQUE ET AL. (2005) benötigten mit dem ProTaper-System 90,9 sec. Ebenfalls in diesem Bereich liegt das FlexMaster-System mit 94 sec (NORDMEYER ET AL. 2011).

Insgesamt lässt sich eine deutliche Reduzierung der Präparationszeit feststellen. Das System mit der kürzesten Präparationszeit dieser Studie ist das One Shape®-System.

6.2.6 Arbeitssicherheit

Der Arbeitssicherheit kommt im Rahmen der klinischen Anwendung eine entscheidende Bedeutung zu. Da es sich bei den untersuchten Systemen um Single-File-Systeme handelt, lastet die gesamte Arbeit, die im Wurzelkanal erbracht werden muss, auf einer Feile allein. Die Hersteller produzieren die Instrumente unter anderem aus diesem Grund für den einmaligen Gebrauch.

Innerhalb dieser Arbeit kam es zu einem Torsionsbruch eines Instruments. Beim RECIPROC®-System brach das Instrument durch das Einklemmen der Instrumentenspitze zwischen dem apikalen und medialen Sägefragment. Infolgedessen ist die Fraktur der verwendeten Studienmethode zuzuordnen und nicht klinisch relevant.

Die zwei Längenverluste in den mesiobukkalen Kanälen der beiden Systeme RECIPROC® und Wave One™ fielen erst bei der Anfertigung der Röntgenaufnahme auf. Der Reamer der Größe ISO 10 ließ sich nicht mehr auf die präparierte Arbeitslänge bewegen.

Das System One Shape® weist als Einziges der untersuchten Systeme eine apikale Perforation auf. Während der Präparation schraubte sich das Instrument in den Wurzelkanal und über den Apex hinaus. Im klinischen Alltag würde dieser Zwischenfall eine erhebliche Irritation des periradikulären Gewebes zur Folge haben.

Mit sieben Zwischenfällen grenzt sich die Präparation der mesiolingualen Kanäle deutlich von den drei Komplikationen der mesiobukkalen Kanäle ab. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Probleme der Methode handelt. Die mesiolingualen Kanäle wurden nach dem Sägen als Fragmente im Muffelblock repositioniert. Dabei können die Teile des Wurzelkanals

in ihrer Lage verschoben worden sein, ebenso können Instrumente an den Kanten der drei repositionierten Segmente abgelenkt worden sein.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen ein stabiles RECIPROC®-System (ARIAS ET AL. 2012, KIM ET AL. 2012). Eine bessere Stabilität der RECIPROC®-Instrumente im Vergleich zum Wave One™-System kann hier nicht angegeben werden, wie es PLOTINO ET AL. (2012) und PEDULLÀ ET AL. (2013) in ihren Studien berichteten.

In 74,7 % der Wurzelkanäle konnte die Präparation ohne Komplikationen beendet werden. Der größere Anteil der Komplikationen erfolgte während der Präparation der mesiolingualen Kanäle und ist wiederum der Methode zuzuordnen. Das deutlich niedrigere Vorkommen von Zwischenfällen an den mesiobukkalen Kanälen, zusammen mit den zuvor genannten Erklärungen lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Instrumente als sicher einzustufen sind. Die verwendeten Instrumente sollten jedoch auf den einmaligen Einsatz beschränkt bleiben, denn der klinische Gebrauch von M-Wire®-Feilen verringert deren Beständigkeit gegen zyklische Ermüdung (ARIAS ET AL. 2014). Hinzu kommen hygienische Gesichtspunkte und die aufwendige Aufbereitung der Feilen entsprechend der RKI-Richtlinien (2012).

Im Vergleich zu anderen Untersuchungen von endodontischen Feilensystemen ist die Komplikationsrate als niedrig einzustufen. ARENS ET AL. (2003) ermittelten eine Frakturnrate von 0,9% bei der einmaligen Verwendung.

Ohne Zweifel gilt für alle maschinellen Präparationssysteme, dass eine zusätzliche Handinstrumentierung zur Schaffung eines Gleitpfades erforderlich ist. Das Bestehen eines Gleitpfades beeinflusst die Krafteinwirkung auf die Feile (HA & PARK 2012) und wirkt sich positiv auf die Prävention von Präparationsfehlern, wie Kanalverlagerung und Ledgebildung aus (BERUTTI ET AL. 2012a). Nach hinreichender Gleitpfadgestaltung verfolgt die Feile, zumindest in der Theorie, den vorgegebenen Weg.

Weitere Studien müssen diese Theorien und auch die Ergebnisse dieser Studie belegen.

Abschließende Wertung

Alle drei Single-File-Systeme bieten einen guten Ansatzpunkt für die klinische Anwendung. Die Präparation stark gekrümmter Kanäle ist unter Einhaltung des originalen Kanalverlaufs möglich. Die Zeitersparnis ist enorm.

Ein Gleitpfad mit entsprechendem koronalen Flaring ist zu empfehlen. Die Instrumente arbeiten stark abrasiv und erzeugen reichlich Dentin-Späne. Nach ein wenig Übung ist die Anwendung einfach und durch die geringe Anzahl der Feilen überschaubar.

Defizite der apikalen Reinigung liegen vor und sollten bei Anwendung der Systeme durch entsprechende apikale Erweiterungen und ausreichendes Spülen ausgeglichen werden.

In Anbetracht des aufwändigen Aufbereitens von Medizinprodukten stellen die Ein-Feilen-Systeme und ihre Einmal-Verwendung eine gute Alternative dar.

7. Zusammenfassung

Eine effektive Reinigung und die Formung des Wurzelkanals sind wesentliche Faktoren der Wurzelkanalbehandlung. In den Jahren seit Entwicklung der maschinellen Präparation der Wurzelkanäle wurden viele verschiedene Techniken und Instrumente entwickelt. Die Techniken sollten die Handhabung erleichtern und die Instrumente - durch ihr Design und Material - eine sichere und effiziente Präparation ermöglichen. Die ständige Weiter- und Neuentwicklung machen standardisierte Untersuchungsmethoden zum Vergleich der Instrumente notwendig.

In dieser Arbeit wurden folgende Parameter untersucht:

- Veränderungen des anatomischen Kanalverlaufs durch die Präparation, insbesondere Begradigung gekrümmter Wurzelkanäle
- qualitative und quantitative Veränderung der Form des Wurzelquerschnittes im apikalen, medialen und koronalen Kanalanteil
- Bewertung der Reinigungsqualität an der Wurzelkanalwand in Bezug auf Smear Layer und Debris
- Arbeitssicherheit, bezogen auf Art und Häufigkeit von Zwischenfällen, wie z.B. Instrumentenfrakturen, apikale Blockaden, Perforationen und Arbeitslängenverlusten
- Zeitaufwand der Arbeitsschritte

Der nach HÜLSMANN (1998) entwickelte standardisierte Versuchsaufbau gewährleistete die simultane Analyse dieser Präparationsparameter.

An 45 Unterkiefermolaren mit einem Krümmungswinkel zwischen 20° und 40° wurden die mesialen Wurzelkanäle mit den Single-File-Systemen RECIPROC[®], Wave One[™] und One Shape[®] aufbereitet und untersucht.

Auch eine Anwendung in stark gekrümmten Wurzelkanälen führt nur zu einer geringen Wurzelkanalbegradigung. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen festgestellt werden. Die mittleren Werte der Begradigung sind bei allen Systemen als gering einzustufen. Sie lagen zwischen $1,20^\circ$ und $1,28^\circ$. Die Systeme RECIPROC[®] und Wave One[™] zeigen im Vergleich zu One Shape[®] kleinere Werte bei der Kanalbegradigung. Die drei Systeme respektieren den originalen Kanalverlauf sehr gut.

Die Konizität des One Shape[®]-Systems scheint bei der qualitativen Präparationsform nachteilig zu sein. Es lässt sich ein signifikanter Unterschied im medialen Kanalbereich feststellen.

Die quantitative Querschnittsanalyse zeigt Mängel im apikalen Bereich. Es wurden vermehrt unbearbeitete Anteile der Kanalwand dokumentiert. Die Systeme unterscheiden sich jedoch nicht.

Die Sauberkeit der Kanalwand nach der Präparation lässt bei allen Systemen ein Defizit im apikalen Bereich erkennen. Sowohl beim Debris und auch beim Smear Layer ist die Reinigung in ca. 50% der Wurzelkanäle nicht ausreichend.

Der Zeitbedarf für die reine Präparation ist deutlich reduziert. Die reinen Instrumentierungszeiten lagen konzentriert bei weniger als 40 sec pro Kanal. Das System One Shape® unterscheidet sich signifikant. Mit einer Präparationszeit von 36,3 sec ist es das schnellere der drei untersuchten Systeme.

Alle Systeme sind als sicher einzustufen. Die Zwischenfälle waren gering und zum größten Teil der verwendeten Methode der Studie zuzuschreiben. Die Fraktur des RECIPROC®-Instruments wurde durch den Spalt zwischen den Sägefragmenten verursacht.

Die Untersuchung der drei neuen Single-File-Systeme RECIPROC®, Wave One™ und One Shape® zeigt, dass eine adäquate Präparation des Wurzelkanals mit einer Feile möglich ist. Hinsichtlich der Verschleppung von Keimen in sterile Bereiche der Pulpa und der nicht vertretbaren Kreuzkontamination mit Prionen und anderen Erregern sind die Single-File-Systeme eine ernsthafte Alternative zu Multi-Use-Systemen.

8. Literatur

Andreasen GF, Hillmann TB (1971):

An evaluation of 55-cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics.

J Am Dent Assoc 82, 1373-1375

Arens FC, Hoen MM, Steiman HR, Dietz GC (2003):

Evaluation of single-use rotary nickel-titanium instruments.

J Endod 29, 664-666

Arias A, Perez-Higueras JJ, de la Macorra JC (2012):

Differences in cyclic fatigue resistance at apical and coronal levels of Reciproc and WaveOne new files.

J Endod 38, 1244-1248

Arias A, Perez-Higueras JJ, de la Macorra JC (2014):

Influence of clinical usage of GT and GTX files on cyclic fatigue resistance.

Int Endod J 47, 257-263

Azarpazhooh A, Fillery ED (2008):

Prion disease: the implications for dentistry.

J Endod 34, 1158-1166

Berutti E, Fedon G (1992):

Thickness of cementum/dentin in mesial roots of mandibular first molars.

J Endod 18, 545-548

Berutti E, Paolino DS, Chiandussi G, Alovise M, Cantatore G, Castellucci A, Pasqualini D (2012a):

Root canal anatomy preservation of Wave one reciprocation files with or without glide path.

J Endod 38, 101-104

Berutti E, Chiandussi G, Paolino DS, Scotti N, Cantatore G, Castellucci A, Pasqualini D (2012b):

Canal shaping with Wave one Primary reciprocating files and ProTaper system: a comparative study.

J Endod 38, 505-509

Boutsoukis C, Gogos C, Verhaagen B (2010):

The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals evaluated using an unsteady computational fluid dynamics model.

Int Endod J 43, 874-881

Bramante CM, Berbert A, Borges RP (1987):
A methodology for evaluation of root canal instrumentation.
J Endod 13, 243-245.

Briseño Marroquin B, Pistorius A, Willershausen-Zönnchen B (1996):
Canal transportation caused by a new instrumentation technique and three standard techniques.
J Endod 22, 406-409

Buehler WJ, Wiley RC (1965):
Nickel-Base Alloys
United States Patent, US3174851

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, Hinschitza 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 (2013a):
Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo.
Int Endod J 47, 405-409

Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2013b):
Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth.
Int Endod J 46, 590-597

Bürklein S, Tsotsis P, Schäfer E (2013c):
Incidence of dentinal defects after root canal preparation: reciprocating versus rotary instrumentation.
J Endod 39, 501-504

Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2014a):
Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo.
Int Endod J 47, 405-409

Bürklein S, Börjes L, Schäfer E (2014b):

Comparison of preparation of curved root canals with Hyflex CM and Revo-S rotary nickel-titanium instruments.

Int Endod J 47, 470-476

Calberson FL, Deroose CA, Hommez GM, De Moor RJ (2004):

Shaping ability of Pro Taper nickel-titanium files in simulated resin root canals.

Int Endod J 37, 613-623

Calhoun G, Montgomery S (1988):

The effects of four instrumentation techniques on root canal shape.

J Endod 14, 273-277

Campos JM, Del Rio CE (1990):

Comparison of mechanical and standard hand instrumentation techniques in curved root canals.

J Endod 16, 230-234

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

Cissé O, Savadogo O, Wu M, Yahia L (2002):

Effect of surface treatment of NiTi alloy on its corrosion behavior in Hank's solution.

J Biomed Mater Res 61, 339-345

Cohen J (1960):

A coefficient of agreement for nominal scales.

Educ Psychol Meas 20, 37-46

Cunningham CJ, Senia ES (1992):

A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars.

J Endod 18, 294-300

De-Deus G, Arruda TE, Souza EM, Neves A, Magalhães K, Thuanne E, Fidel RA (2013):

The ability of the Reciproc R25 instrument to reach the full root canal working length without a glide path.

Int Endod J 46, 993-998

Dentsply DeTrey GmbH (2013):
Anwendungsbroschüre des Wave One-Systems

DGZMK und DGZ (2001):
Stellungnahme: Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen.
Dtsch Zahnärztl Z 56, 1-4

Deplazes P, Peters O, Barbakow F (2001):
Comparing apical preparations of root canals shaped by nickel-titanium rotary instruments and nickel-titanium hand instruments.
J Endod 27, 196-202

Dietrich MA, Kirkpatrick TC, Yaccino JM (2012):
In vitro canal and isthmus debris removal of the self-adjusting file, K3, and WaveOne files in the mesial root of human mandibular molars.
J Endod 38, 1140-1144

Ebeleseder KA, Glockner K, Städtler P (1995):
Eine Klassifikation von Untersuchungen zur Wurzelkanalpräparation. Vortrag
In 2. Endodontischer Weltkongress der I.F.E.U., Rom 1995
Zusammenfassung der Autorenreferate , o. Hrsg., o. Verl., o. O. 1995 1-4

European Society of Endodontology (2006):
Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology.
Int Endod J 39, 921-930

Fornari VJ, Silva-Sousa YT, Vanni JR, Pécora JD, Versiani MA, Sousa-Neto MD (2010):
Histological evaluation of the effectiveness of increased apical enlargement for cleaning the apical third of curved canals.
Int Endod J 43, 988-994

Gambarini G, Rubini AG, Al Sudani D, Gergi R, Culla A, De Angelis F, Di Carlo S, Pompa G, Osta N, Testarelli L (2012):
Influence of different angles of reciprocation on the cyclic fatigue of nickel-titanium endodontic instruments.
J Endod 38, 1408-1411

Glogowski S:

Oberflächenreaktionen an Nickel-Titan-Formgedächtnis-Legierungen: Adhäsionsverschleißschutz und zyklisch-dynamische Nickelfreisetzung.

Ing. Diss. Bochum 2009

Goerig AC, Michelich RJ, Schultz HH (1982):

Instrumentation of root canals in molar using the step-down technique.

J Endod 8, 550-554

Goldberg F, Abramovich A (1977):

Analysis of the effect of EDTAC on the dentinal walls of the root canal.

J Endod 3, 101-105

Grouven U, Bender R, Ziegler A, Lange S (2007):

Der Kappa-Koeffizient.

Dtsch Med Wochenschr 132, e65-e68

Gu LS, Kim JR, Ling J, Choi KK, Pashley DH, Tay FR (2009):

Review of contemporary irrigant agitation techniques and devices.

J Endod 35, 791-804

Ha JH, Park SS (2012):

Influence of glide path on the screw-in effect and torque of nickel-titanium rotary files in simulated resin root canals.

Restor Dent Endod 37, 215-219

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

Hashem AA, Ghoneim AG, Lutfy RA (2012):

Geometric analysis of root canals prepared by four rotary NiTi shaping systems.

J Endod 38, 996-1000

Heidemann D:

Offizielles endodontologisches Lexikon.

In: Praxis der Zahnheilkunde Endodontie

Elsevier, München 2001, 277-294

Hof R, Perevalov V, Eltanani M, Zary R, Metzger Z (2010):
The self-adjusting file (SAF). Part 2: mechanical analysis.
J Endod 36, 691-696

Hübscher W, Barbakow F, Peters OA (2003):
Root canal preparation with Flexmaster: canal shapes analysed by micro-computed tomography.
Int Endod J 36, 740-747

Hülsmann M (1998):
Entwicklung einer Methode zur standardisierten Überprüfung verschiedener Aufbereitungsparameter und vergleichende In-vitro-Untersuchung unterschiedlicher Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung.
Med. Habil.-Schr. Göttingen 1998

Hülsmann M:
Die Aufbereitung des Wurzelkanals.
In: Heidemann D: Praxis der Zahnheilkunde Endodontie
Elsevier, München 2001 Seite 79-122

Hülsmann M, Gressmann G, Schäfer F (2003):
A comparative study of root canal preparation using Flexmaster and HERO 642 rotary Ni-Ti instruments.
Int Endod J 36, 358-366

Hülsmann M, Peters OA, Dummer P (2005):
Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means.
Endod Topics 10, 30-76

Ingle JI (1961):
A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 14, 83-91

ISO 3630-1 (2008):
Dentistry - Root canal instruments - Part 1: General requirements and test methods

Izu KH, Thomas SJ, Zhang P, Izu AE, Michalek S (2004):
Effectiveness of sodium hypochlorite in preventing inoculation of periapical tissues with contaminated patency files.
J Endod 30, 92-94

Jeon HJ, Paranjpe A, Ha JH, Kim E, Lee W, Kim HC (2014):

Apical enlargement according to different pecking times at working length using reciprocating files.

J Endod 40, 281-284

Kartal N, Cimilli HK (1997):

The degrees and configurations of mesial canal curvatures of mandibular first molars.

J Endod 23, 358-362

Kazemi RB, Stenman E, Spångberg LSW (1996):

Machining efficiency and wear resistance of nickel-titanium endodontic files.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 81, 596-602

Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, 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

Kim HC, Hwang YJ, Jung DW, You SY, Kim HC, Lee W (2013a):

Micro-computed tomography and scanning electron microscopy comparisons of two nickel-titanium rotary root canal instruments used with reciprocating motion.

Scanning 35, 112-118

Kim HC, Sung SY, Ha JH, Solomonov M, Lee JM, Lee CJ, Kim BM (2013b):

Stress generation during self-adjusting file movement: minimally invasive instrumentation.

J Endod. 39, 1572-1575

Koçak S, Koçak MM, Sağlam BC, Türker SA, Sağsen B, Er Ö (2013):

Apical extrusion of debris using self-adjusting file, reciprocating single-file, and 2 rotary instrumentation systems.

J Endod 39, 1278-1280

Koch A:

Einfluss von Prionen Dekontaminationsprotokollen auf die Schneidleistung und Fraktursicherheit von endodontischen Nickel-Titan Instrumenten des ProTaper Systems.

Med. Diss. Marburg 2010

Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut (RKI) und des Bundesinstitutes für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) (2012):

Anforderungen an die Hygiene bei der Aufbereitung von Medizinprodukten.

Bundesgesundheitsbl 55, 1244–1310

Kum KY, Spångberg L, Cha BY et al. (2000):

Shaping ability of three ProFile rotary instrumentation techniques in simulated resin root canals.

J Endod 26, 719-723

Landis JR, Koch GG (1977):

The measurement of observer agreement for categorical data.

Biometrics 33, 159-174

Lee KW, Kim Y, Perinpanayagam H (2014):

Comparison of alternative image reformatting techniques in micro-computed tomography and tooth clearing for detailed canal morphology.

J Endod 40, 417-422

Leeb J (1983):

Canal orifice enlargement as related to biomechanical preparation.

J Endod 9, 463-470

Leseberg DA, Montgomery S (1991):

The effects of Canal Master, Flex-R, and K-Flex instrumentation on root canal configuration.

J Endod 17, 59-65

Lim KC, Webber J (1985):

The effect of root canal preparation on the shape of the curved root canal.

Int Endod J 18, 233-239

Linßen F:

Eine vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen Wurzelkanalpräparation mit den Nickel-Titan-Systemen S5, Mtwo und ProTaper Universal.

Med. Diss. Göttingen 2013

Liu R, Hou BX, Wesselink PR (2013):

The incidence of root microcracks caused by 3 different single-file systems versus the ProTaper system.

J Endod 39, 1054-1060

Lopes HP, Elias CN, Vieira VT (2010):

Effects of electropolishing surface treatment on the cyclic fatigue resistance of BioRace nickel-titanium rotary instruments.

J Endod 36, 1653-1657

Lopes HP, Elias CN, Vieira MV, Siqueira JF Jr, Mangelli M, Lopes WS, Vieira VT, Alves FR, Oliveira JC, Soares TG (2013):

Fatigue Life of Reciproc and Mtwo instruments subjected to static and dynamic tests.

J Endod 39, 693-696

Loushine RJ, Weller RN, Hartwell GR (1989):

Stereomicroscopic evaluation of canal shape following hand, sonic, and ultrasonic instrumentation.

J Endod 15, 417-421

Marshall FJ, Pappin JB (1980):

A crown-down pressureless preparation root canal enlargement technique. Technique Manual.

Portland, Oregon: Dept of Endodontics Oregon Health Sciences University; 1980

McCann JT, Keller D, LaBounty GL (1990):

A modification of the muffle model system to study root canal morphology.

J Endod 16, 114-115

Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R (2010):

The self-adjusting file (SAF). Part 1: respecting the root canal anatomy--a new concept of endodontic files and its implementation.

J Endod 36, 679-690

Micro-Mega (2013):

Anwendungsbroschüre des One Shape[®]-Systems

Miserendino LJ, Miserendino CA, Moser JB, Heuer MA, Osetek EM (1988):

Cutting efficiency of endodontic instruments. Part 3: Comparison of sonic and ultrasonic instrument systems.

J Endod 10, 24-30

Morgan LF, Montgomery S (1984):

An evaluation of the crown-down pressureless technique.

J Endod 10, 491-498

Morgental RD, Vier-Pelisser FV, Kopper PM, de Figueiredo JA, Peters OA (2013):

Cutting efficiency of conventional and martensitic nickel-titanium instruments for coronal flaring.

J Endod 39, 1634-1638

Neves MA, Rôças IN, Siqueira JF Jr (2014):

Clinical antibacterial effectiveness of the self-adjusting file system.

Int Endod J 47, 356-365

Nordmeyer S, Schnell V, Hülsmann M (2011):

Comparison of root canal preparation using Flex Master Ni-Ti and Endo-Eze AET stainless steel instruments.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 111, 251-259

Ölander A (1932):

An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys.

J Am Chem Soc 54, 3819-3833.

Paqué F, Musch U, Hülsmann M (2005):

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

Int Endod J 38, 8-16

Park E, Shen Y, Khakpour M, Haapasalo M (2013):

Apical pressure and extent of irrigant flow beyond the needle tip during positive-pressure irrigation in an in vitro root canal model.

J Endod 39, 511-515

Pedullà E, Grande NM, Plotino G et al. (2013):

Cyclic fatigue resistance of two reciprocating nickel-titanium instruments after immersion in sodium hypochlorite.

Int Endod J 46, 155-159

Peters OA, Peters CI (2010):

Cleaning and Shaping of the Root Canal System.

In: Hargreaves KM, Cohen S. Cohen's Pathways of the Pulp.

Mosby Elsevier, St. Louis 2010, 283-348

Plotino G, Grande NM, Melo MC, Bahia MG, Testarelli L, Gambarini G (2010):

Cyclic fatigue of NiTi rotary instruments in a simulated apical abrupt curvature.

Int Endod J 43, 226-230

Plotino G, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G (2012):

Cyclic fatigue of Reciproc and WaveOne reciprocating instruments.

Int Endod J 45, 614-618

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

Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments.

J Endod 23, 77-85

Richards JA: Correction of Geometric Distortion.

In: Richards JA Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction.

Second, Revised and Enlarged Edition

Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006 Seite 46-59

Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG Jr. (1985):

The "balanced forced" concept for instrumentation of curved canals.

J Endod 11, 203-211

Rödig T: Die Wurzelkanalpräparation.

In: Rödig T, Hülsmann M, Nordmeyer S, Drebenstedt S: Grundlagen der modernen Endodontie.

Spitta Verlag, Balingen 2009 Seite 123-174

Ryhänen J, Kallioinen M, Tuukkanen J (1998):

In vivo biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy: muscle and perineural tissue responses and capsule membrane thickness.

J Biomed Mater Res 41, 481-488

Saber SE, Nagy MM, Schäfer E (2014):

Comparative evaluation of the shaping ability of WaveOne, Reciproc and OneShape single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth.

(Int Endod J, im Druck)

Schäfer E, Fritzenschaft B (1999):

Vergleichende Untersuchung zweier permanentrotierender Wurzelkanalaufbereitungssysteme auf Nickel-Titan-Basis.

Endodontie 8, 213-222

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

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

J Endod 28, 211-216

Schilder H (1974):

Cleaning and shaping the root canal.

Dent Clin North Am 18, 269-296

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, Coil JM, Zhou HM, Tam E, Zheng YF, Haapasalo M (2012):

ProFile Vortex instruments after clinical use: a metallurgical properties study.

J Endod 38, 1613-1617

Shen Y, Zhou HM, Zheng YF, Peng B, Haapasalo M (2013):

Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments.

J Endod 39, 163-172

Siqueira JF Jr, Alves FR, Almeida BM, de Oliveira JC, Rôças IN (2010):

Ability of chemomechanical preparation with either rotary instruments or self-adjusting file to disinfect oval-shaped root canals.

J Endod 36, 1860-1865

Sonntag D, Delschen S, Stachniss V (2003a):

Root-canal shaping with manual and rotary Ni-Ti files performed by students.

Int Endod J 36, 715-723

Sonntag D, Guntermann A, Kim SK, Stachniss V (2003b):

Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students.

Int Endod J 36, 245-255

Thompson SA (2000):

An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry.

Int Endod J 33: 297-310.

VDW GmbH (2013):

Anwendungsbroschüre des RECIPROC®-System

Weiger R, Brückner M, El Ayouti A, Löst C (2003):

Preparation of curved root canals with rotary FlexMaster instruments compared to Lightspeed instruments and Ni-Ti hand files.

Int Endod J 36, 483-490

Weine FS, Healey HJ, Gerstein H, Evanson L (1970):

Pre-curved files and incremental instrumentation for root canal enlargement.

J Can Dent Assoc 36, 155-157

Weine FS, Kelly RF, Lio PJ (1975):

The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape.

J Endod 1, 255-262

Weine FS, Kelly RF, Bray KE (1976):

Effect of preparation with endodontic handpieces on original canal shape.

J Endod 2, 298-303

Wolcott J, Himel T (1997):

Torsional Properties of Nickel-Titanium versus Stainless Steel Endodontic Files.

J Endod 23, 217-220

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

Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z (2012):

Dentinal microcrack formation during root canal preparations by different NiTi rotary instruments and the self-adjusting file.

J Endod 38, 232-235

Yoo YS, Cho YB (2012):

A comparison of the shaping ability of reciprocating NiTi instruments in simulated curved canals.

Restor Dent Endod 37, 220-227

Zhang R, Hu T (2010):

Root canal curvature.

Int Endod J 43, 616-618

9. Anhang

9.1 Verwendete Materialien und Geräte

Aluminiumnieten	Din 661, Gesipa, Waldorf
Bildanalysesoftware	Quantum GIS (QGIS) 1.8.0-Lisboa, Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)
Bildbearbeitungssoftware a)	Paint version 5.1., Microsoft Corporation, Redmond, USA
Bildbearbeitungssoftware b)	ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA
Diamantinstrument (konisch)	Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo
Diamant-Trennscheibe	Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo
EDTA	Calcinase EDTA-Lösung, lege artis Pharma GmbH & Co.KG, Dettenhausen
Endo Cleaner	DiaDent Europe, Almere, Niederlande
Endo Messsystem	M+W Dental, Müller und Weygandt, Bidingen

Endomotor	VDW.SILVER RECIPROC [®] , VDW GmbH, München
Exsikkator	Exsikkator novus, Fa. W. Kranich, Göttingen
Kamera	Lumix DMC-TZ7, Panasonic Corporation, Osaka, Japan
Kunststoff	Paladur Autopolymerisat, Heraeus Kulzer GmbH, Hanau
Küvettensystem	Wissenschaftliche Werkstätten der Universitätsmedizin, Göttingen
Lackmarker	Edding 780 paint marker, Edding Vertrieb GmbH, Wunstorf
Natriumhypochlorit	NaOCl 3%, Apotheke des Universitätsklinikums Göttingen
One Shape [®] -System	Micro-Mega, Besançon, Frankreich
Papierspitzen	M+W Dental, Müller und Weygandt, Büdingen
Peripheriewachs	Heraeus Kulzer GmbH, Hanau
Permanentmarker	Edding 404 permanent marker, Edding Vertrieb GmbH, Wunstorf

Präzisions-Trennschleifsystem	Exakt Apparatebau GmbH & Co. KG, Norderstedt
Rasterelektronenmikroskop	Digital Scanning Microscope DSM 960, Fa. Zeiss, Oberkochen
Reamer	M+W Dental, Müller und Weygandt, Bidingen
RECIPROC®-System	VDW GmbH, München
Referenzobjekt	0.12 Biostarter Arches, FORESTADENT Bernhard Förster GmbH, Pforzheim
Röntgengerät	Gendex Expert DC, KaVo Dental GmbH, Biberach
Röntgensensor	VISUALIX eHD Sensorsystem, KaVo Dental GmbH, Biberach
Rosenbohrer	Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo
Sekundenkleber	ORBIS Dental GmbH, Münster
Spülkanüle	VMK-EndoNeedle, Dilbeek, Belgien

Sputter Coater	SC 51, Fissons Instruments, Uckfield, Großbritannien
Statistiksoftware	SPSS International Business Machines Corp., New York, USA
Stereomikroskop (Auflicht)	Motic SMZ 168, Motic, Hong Kong, China
Trockengranulat	Silica Gel Orange, Carl Roth GmbH & Co, KG, Karlsruhe
Vaseline	Vaselinum album, FAVODENT Karl Huber GmbH, Karlsruhe
Wave One™-System	Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz
Winkelstück	6:1, VDW GmbH, München

9.2 Arbeitsbögen

9.2.1 Arbeitsbogen RECIPROC®

Arbeitsprotokoll RECIPROC®: Zahn: Kanal: Gruppe:

Arbeitsschritt	Material/ Instrument	Einstellung/Menge	Arbeitsschritt erfolgt	Zeit in sec
1. Programm wählen	Motor VDW silver	Reciproc all		
2. Spülung	NaOCl 3%	2 ml		
3. Gleitpfad prüfen	Reamer ISO 10	AL 19 mm		
4. Instrument einspannen	RECIPROC® R25	AL 18 mm		
5. Arbeitszyklus Instrument im Kanal, bis Treffen auf Widerstand (max. 3x)	RECIPROC® R25	Anzahl bis Erreichen der AL 19 mm	Anzahl:	s. u.
6. Zwischenreinigung, wenn AL nicht erreicht 6.1. Instrumentenreinigung 6.2. Spülung 6.3. Rekapitulieren	Clean-Stand NaOCl 3% Reamer ISO 10	2 ml AL 19 mm	Anzahl:	s. u.
7. Spülung	NaOCl 3%	2 ml		
8. Rekapitulieren	Reamer ISO 10	AL 19 mm		
9. Abschlusspülung	EDTA	5 ml		

Instrumentierung R25	in sec	
Spülungen (prä-, post-, AZ)	in sec	
Arbeitszyklen	Anzahl	
Perforation	Anzahl/ Zeitpunkt	
Fraktur	Anzahl/ Zeitpunkt	
Längenverlust	Anzahl/ Zeitpunkt	
Verblockung	Anzahl/ Zeitpunkt	
Gesamtarbeitszeit	in sec	

Arbeitszyklus & Zwischenreinigung

Instrumentierung in sec	Arbeitslänge erreicht	Sondierung			Fraktur	Perforation
		Blockade	Stufe	AL- Verlust		
Instrumentenreinigung in sec		Spülung	Rekapitulieren	Anmerkungen		

9.2.2 Arbeitsbogen Wave One™

Arbeitsprotokoll Wave One™ : Zahn: Kanal: Gruppe:

Arbeitsschritt	Material/ Instrument	Einstellung/ Menge	Arbeitsschritt erfolgt	Zeit in sec
1. Programm wählen	Motor VDW silver	Wave one all		
2. Spülung	NaOCl 3%	2 ml		
3. Gleitpfad prüfen	Reamer ISO 10	AL 19 mm		
4. Instrument einspannen	Wave one Primary	AL 18 mm		
5. Arbeitszyklus Instrument im Kanal, bis Treffen auf Widerstand (max. 3x)	Wave one Primary	Anzahl bis Erreichen der AL 19 mm	Anzahl:	s. u.
6. Zwischenreinigung, wenn AL nicht erreicht 6.1. Instrumentenreinigung 6.2. Spülung 6.3. Rekapitulieren	Clean-Stand NaOCl 3% Reamer ISO 10	2 ml AL 19 mm	Anzahl:	s. u.
7. Spülung	NaOCl 3%	2 ml		
8. Rekapitulieren	Reamer ISO 10	AL 19 mm		
9. Abschlusspülung	EDTA	5 ml		

Instrumentierung „primary“	in sec	
Spülungen (prä-, post-, AZ)	in sec	
Arbeitszyklen	Anzahl	
Perforation	Anzahl/ Zeitpunkt	
Fraktur	Anzahl/ Zeitpunkt	
Längenverlust	Anzahl/ Zeitpunkt	
Verblockung	Anzahl/ Zeitpunkt	
Gesamtarbeitszeit	in sec	

Arbeitszyklus & Zwischenreinigung

Instrumentierung in sec	Arbeitslänge erreicht	Sondierung			Fraktur	Perforation
		Blockade	Stufe	AL- Verlust		
Instrumentenreinigung in sec		Spülung		Rekapitulieren	Anmerkungen	

9.2.3 Arbeitsbogen One Shape®

Arbeitsprotokoll One Shape®: Zahn: Kanal: Gruppe:

Arbeitsschritt	Material/ Instrument	Einstellung/ Menge	Arbeitsschritt erfolgt	Zeit in sec
1. Programm wählen	Motor VDW silver	Dr. 's Choice F1(400gcm/400rpm)		
2. Spülung	NaOCl 3%	2 ml		
3. Gleitpfad prüfen	Reamer ISO 10	AL 19 mm		
4. Instrument einspannen	One Shape®	AL 18 mm		
5. Arbeitszyklus Instrument im Kanal, bis Treffen auf Widerstand (max. 3x)	One Shape®	Anzahl bis Erreichen der AL 19 mm	Anzahl:	s. u.
6. Zwischenreinigung, wenn AL nicht erreicht 6.1. Instrumentenreinigung 6.2. Spülung 6.3. Rekapitulieren	Clean-Stand NaOCl 3% Reamer ISO 10	2 ml AL 19 mm	Anzahl:	s. u.
7. Spülung	NaOCl 3%	2 ml		
8. Rekapitulieren	Reamer ISO 10	AL 19 mm		
9. Abschlusspülung	EDTA	5 ml		

Instrumentierung One Shape®	in sec	
Spülungen (prä-, post-, AZ)	in sec	
Arbeitszyklen	Anzahl	
Perforation	Anzahl/ Zeitpunkt	
Fraktur	Anzahl/ Zeitpunkt	
Längenverlust	Anzahl/ Zeitpunkt	
Verblockung	Anzahl/ Zeitpunkt	
Gesamtarbeitszeit	in sec	

Arbeitszyklus & Zwischenreinigung

Instrumentierung in sec	Arbeitslänge erreicht	Sondierung			Fraktur	Perforation
		Blockade	Stufe	AL- Verlust		
Instrumentenreinigung in sec		Spülung		Rekapitulieren	Anmerkungen	

9.2.3 Bewertungsbogen Rasterelektronenmikroskop

Nr. (cod.):	Zahn:	Kanal:	Gruppe:
<p>Protokoll Wurzelkanalpräparation- Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung</p>			
	Bewertungsbereich	Bereich	Bewertung
Debris	Score 1-5	apical : medial : koronal:	
Smear Layer	Score 1-5	apical : medial : koronal:	
Ergebnis			

9.3 Statistische Auswertung

Tab.: 9.3.1: Wurzelkanalbegradigung: Übersicht der statistischen Auswertung

Parameter	Chi ² -Wert	(df)	p	p> 0,05	H0-Hypothese	Gruppen sind
Winkel-Differenz	0,088	2	0,957	Ja	annehmen	=
Radius-Differenz	0,116	2	0,944	Ja	annehmen	=
Mesiobukkale Winkel-Differenz	0,627	2	0,731	Ja	annehmen	=
Mesiobukkale Radius-Differenz	0,492	2	0,782	Ja	annehmen	=
Mesiolinguale Winkel-Differenz	1,465	2	0,481	Ja	annehmen	=
Mesiolinguale Radius-Differenz	0,461	2	0,794	Ja	annehmen	=

Tab. 9.3.2: Wurzelkanalsauberkeit: Übersicht der statistischen Auswertung,
(REM-Untersuchung)

Parameter	Chi ² -Wert	(df)	p	p> 0,05	H0-Hypothese	Gruppen sind
Debris apikal	1,262	2	0,532	ja	annehmen	=
Debris medial	0,273	2	0,872	ja	annehmen	=
Debris koronal	3,350	2	0,187	ja	annehmen	=
Smear Layer apikal	0,708	2	0,702	ja	annehmen	=
Smear Layer medial	4,204	2	0,122	ja	annehmen	=
Smear Layer koronal	6,177	2	0,046	nein	ablehnen	≠

Tab. 9.3.3: Wurzelkanalquerschnitte: Übersicht der statistischen Auswertung

Parameter	Chi ² -Wert	(df)	p	p> 0,05	H0-Hypothese	Gruppen sind
Querschnitt präoperativ apikal	0,674	2	0,714	ja	annehmen	=
Querschnitt präoperativ medial	2,316	2	0,314	ja	annehmen	=
Querschnitt präoperativ koronal	0,480	2	0,787	ja	annehmen	=
Querschnitt postoperativ apikal	1,947	2	0,378	ja	annehmen	=
Querschnitt postoperativ medial	8,886	2	0,012	nein	ablehnen	≠
Querschnitt postoperativ koronal	0,129	2	0,937	ja	annehmen	=

Tab. 9.3.4: Wandkontakt: Übersicht der statistischen Auswertung

Parameter	Chi ² -Wert	(df)	p	p> 0,05	H0-Hypothese	Gruppen sind
Wandkontakt apikal	0,282	2	0,868	ja	annehmen	=
Wandkontakt medial	3,222	2	0,200	ja	annehmen	=
Wandkontakt koronal	1,648	2	0,439	ja	annehmen	=

Tab. 9.3.5: Zeitaufwand: Übersicht der statistischen Auswertung

Parameter	Chi ² -Wert	(df)	p	p> 0,05	H0-Hypothese	Gruppen sind
Zeit präoperativ	0,364	2	0,834	ja	annehmen	=
Zeit intraoperativ	29,277	2	0,000	nein	ablehnen	≠
Zeit postoperativ	0,715	2	0,700	ja	annehmen	=
Zeit gesamt	0,545	2	0,762	ja	annehmen	=

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Hülsmann für die Möglichkeit des Verfassens meiner Dissertation und das Überlassen des Themas.

Für die freundliche Unterstützung bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung danke ich Herrn Dr. Christian Holscher und Herrn Hans-Georg Sydow.

Herrn Dr. Holger Lilienthal danke ich für die Unterstützung bei der Datenerfassung sowie der statistischen Auswertung. Ich danke ihm für die Motivation, seine Geduld und sein Engagement durch wissenschaftliche Anregungen.