

Aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie

(Prof. Dr. med. dent. A. Wiegand)

der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Qualität der Single-Cone-
Wurzelkanalobturation nach
Wurzelkanalpräparation mit
Single-File- oder Multiple-Files-Technik**

Eine Mikro-CT-Studie

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

für Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät der

Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Kai Steffen Siegel

aus

Kassel

Göttingen 2021

Dekan: Prof. Dr.med. W. Brück

Betreuungsausschuss

Betreuer: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Ko-Betreuer: PD Dr. med. dent. S. Rinke

Prüfungskommission

Referent: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Ko-Referent: PD Dr. med. dent. S. Rinke

Drittreferent/in: Prof. Dr. hum. biol. Margarete Schön

Datum der mündlichen Prüfung: 10.11.2021

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel „Qualität der Single-Cone-Wurzelkanalobturation nach Wurzelkanalpräparation mit Single-File- oder Multiple-Files-Technik – Eine Mikro-CT-Studie“ eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den

.....

(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Wurzelkanalbehandlung.....	2
1.2 Wurzelkanalpräparation	2
1.3 Maschinelle Wurzelkanalpräparation	2
1.3.1 Reciproc.....	4
1.3.2 F6 SkyTaper	5
1.3.3 Mtwo	6
1.4 Wurzelkanalobturation.....	6
1.4.1 Guttapercha	6
1.4.2 Wurzelfüllpasten	8
1.5 Kalte Wurzelkanalobturation	8
1.5.1 Laterale Kompaktion	8
1.5.2 Single-Cone	9
1.5.3 Trägerbasierte Systeme	15
1.6 Computertomographie.....	16
1.7 Mikro-Computertomographie	16
1.8 Mikro-Computertomographie in der Zahnmedizin	17
1.9 Ziel der Studie	19
2 Material und Methoden	20
2.1 Versuchsablauf.....	20
2.2 Zahnauswahl	21
2.3 Präparation	23
2.3.1 Reciproc 25/.08 und Reciproc 40/.06.....	23
2.3.2 Mtwo 25/.06 und Mtwo 40/.04	24
2.3.3 F6 SkyTaper 25/.06	26
2.4 Wurzelkanalfüllung	27
2.5 Mikro-CT-Scan	28
2.6 Scananalyse	30
2.7 Statistische Auswertung	36
3 Ergebnisse.....	38
3.1.1 Vergleich Gruppe 1 vs. Gruppe 3.....	38
3.1.2 Vergleich Gruppe 2 vs. Gruppe 3.....	42
3.1.3 Vergleich Gruppe 4 vs. Gruppe 5.....	45

4	Diskussion	48
4.1	Diskussion der Methode	48
4.1.1	Zahnauswahl und Gruppeneinteilung	49
4.1.2	Wurzelkanalpräparation und -obturation	51
4.1.3	Mikro-CT	52
4.2	Diskussion der Ergebnisse	56
5	Zusammenfassung	61
6	Anhang	62
7	Literaturverzeichnis	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Doppel-S-Querschnitt der Reciproc-Instrumente	5
Abbildung 2: Versuchsablauf	20
Abbildung 3: Ermittlung der Präparationsgrößen	22
Abbildung 4: Reciproc-System	24
Abbildung 5: Mtwo-System	26
Abbildung 6: F6 SkyTaper-System.....	27
Abbildung 7: Mikro-CT-Arbeitsplatz.....	28
Abbildung 8: Zahn in Schaumstoff eingebettet	29
Abbildung 9: Mikro-CT-Aufnahme	30
Abbildung 10: Außenansicht Schnittebenen	32
Abbildung 11: Drei Schnittebenen im Mikro-CT	33
Abbildung 12: Binäre Darstellung: Guttaperchastift.....	34
Abbildung 13: Binäre Darstellung: Schnittebene	35
Abbildung 14: Nahaufnahme Mikro-CT	35
Abbildung 15: Q-Q-Diagramm	36
Abbildung 16: Boxplot-Diagramm: Vergleich Gruppe 1 vs. Gruppe 3.....	40
Abbildung 17: Boxplot-Diagramm: Vergleich Gruppe 2 vs. Gruppe 3.....	43
Abbildung 18: Boxplot-Diagramm: Vergleich Gruppe 4 vs. Gruppe 5.....	46
Abbildung 19: Apikales Delta.....	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gruppeneinteilung Präparationsgröße ISO 25	23
Tabelle 2: Gruppeneinteilung Präparationsgröße ISO 40	23
Tabelle 3: Abfolge der Instrumente Mtwo bis 25/06	25
Tabelle 4: Abfolge der Instrumente Mtwo bis 40/04	25
Tabelle 5: Einstellung des Mikro-CTs.....	29
Tabelle 6: Einstellung NRecon	31
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Gruppen.....	37
Tabelle 8: Mann-Whitney-U-Test: Gruppe 1 vs. Gruppe 3.....	38
Tabelle 9: Gegenüberstellung: Gruppe 1 vs. Gruppe 3.....	41
Tabelle 10: Mann-Whitney-U-Test: Gruppe 2 vs. Gruppe 3.....	42
Tabelle 11: Gegenüberstellung: Gruppe 2 vs. Gruppe 3.....	44
Tabelle 12: Mann-Whitney-U-Test: Gruppe 4 vs. Gruppe 5.....	45
Tabelle 13: Gegenüberstellung: Gruppe 4 vs. Gruppe 5.....	47

Abkürzungsverzeichnis

AL	Arbeitslänge
CT	Computertomograph
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
ISO	Internationale Organisation für Normung
MAF	Apikale Meister-Feile
MF	Mehrfeilen-System, <i>Multiple-Files</i>
NiTi	Nickel-Titan-Legierung
Q-Q-Diagramm	Quantil-Quantil-Diagramm
SF	Einfleilen-System, <i>Single-File</i>

1 Einleitung

Die Endodontologie ist der Teilbereich der Zahnheilkunde, der sich mit der Anatomie, der Physiologie und Pathologie der Pulpa sowie der periapikalen Gewebe beschäftigt. Physiologisch sind die Pulpa und das periapikale Gewebe steril (Larsen und Fiehn 2017). Die Pulpa kann durch Bakterien bzw. deren Abbauprodukte gereizt werden, woraus sich in der Folge Pulpitiden und periapikale Erkrankungen entwickeln können (Ferraz et al. 2001).

Aus einer reversiblen Pulpitis kann sich eine irreversible Pulpitis entwickeln, die wiederum zu einer Pulpanekrose führen und in einer *Parodontitis apicalis*, einer Entzündung des periapikalen Gewebes, enden kann (Taschieri et al. 2014).

Eine Wurzelkanalbehandlung wird unter anderem notwendig, wenn eine irreversible Entzündung, eine Nekrose oder ein zweifelhafter Zustand der Pulpa vor Restauration vorliegt (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2004). Um die Entzündung des Zahns zu heilen, ist eine Reduktion der Bakterien und Mikroorganismen unabdingbar (Nair 2004). Das Abheilen des periapikalen Gewebes gelingt nach Gründling et al. (2011) durch die effektive Reduktion von Mikroorganismen im Wurzelkanal. Eine Grundanforderung an eine Wurzelkanalbehandlung ist die möglichst vollständige Elimination von Bakterien und nekrotischem sowie vitalem Gewebe (Hülsmann et al. 2005; Versiani et al. 2016).

Die Elimination aller Mikroorganismen im Wurzelkanal wird durch die teils sehr komplexen Wurzelkanalgeometrien erschwert. Der zusätzliche Einsatz chemisch aktiver Spüllösungen zeigt sich hilfreich bei der Desinfektion des Wurzelkanals. Die Spülflüssigkeit ist in der Lage, auch in schwer zugängliche Bereiche des Kanalsystems zu gelangen. Zusätzlich zur möglichst vollständigen Desinfektion des Wurzelkanals und der optimal präparierten Wurzelkanalgeometrie ist ein dichter Verschluss des Wurzelkanalsystems anzustreben (Paqué et al. 2012).

Zur Wurzelkanalobturation stehen verschiedene Techniken und Materialien zur Verfügung. Traditionelle Verfahren wie die kalte laterale Kompaktion mit Guttapercha werden verwendet, aber auch neue Systeme und Wurzelfüllpasten werden von den Dentalherstellern entwickelt und vermarktet.

Die *Single-Cone*-Technik, im deutschen Sprachgebrauch auch Einstift- oder Zentralstift-Technik, zeichnet sich durch ihre einfache und zeitsparende Anwendung aus.

1.1 Wurzelkanalbehandlung

Die Wurzelkanalbehandlung ist ein wesentlicher Teil der zahnmedizinischen Tätigkeit, deren grundlegendes Ziel es ist, den betroffenen Zahn des Patienten zu heilen und langfristig zu erhalten.

Folgende Anforderungen werden an eine Wurzelkanalpräparation gestellt: Sie soll das Pulpagewebe vollständig aus dem Wurzelkanal entfernen, Mikroorganismen eliminieren, die Wurzelkanalgeometrie so gestalten, dass eine chemische Desinfektion, eine Medikation und eine optimale Obturation erfolgen können, ohne dabei den Wurzelkanal zu begradigen oder iatrogen zu schädigen (Hülsmann et al. 2005).

Die moderne Wurzelkanalbehandlung erfolgt sowohl mechanisch durch Präparationsinstrumente als auch durch chemisch aktive Spüllösungen (Ferreira et al. 2004) und nennt sich chemo-mechanische Präparation. Siqueira et al. (2013) schreiben dieser eine zentrale Rolle in der Wurzelkanalbehandlung zu.

Eine rein mechanische Bearbeitung des Wurzelkanalsystems ohne Spüllösungen ist nicht in der Lage, eine effektive Reduktion der Mikroorganismen zu erreichen (Ørstavik et al. 1991). Das Verbleiben von Mikroorganismen im Wurzelkanalsystem verhindert jedoch das Abklingen der Infektion und mindert die Erfolgsprognose der Behandlung (Nair 2004).

1.2 Wurzelkanalpräparation

Ein grundlegender Bestandteil der Wurzelkanalbehandlung ist die Wurzelkanalpräparation. Ziel ist es, eine Präparationsform zu generieren, die eine möglichst optimale Wurzelkanal desinfektion mit anschließender Wurzelkanalfüllung ermöglicht (Hülsmann et al. 2005).

Vitales sowie nekrotisches Pulpagewebe, Mikroorganismen und infiziertes Wurzelkollagen sollen entfernt, die Zahnwurzel nicht unnötig geschwächt und der Wurzelkanalverlauf beibehalten werden. Weiterhin sollen der Wurzelkanal von apikal nach koronal konisch verlaufen und die vorher bestimmte Arbeitslänge strikt eingehalten werden (Hülsmann et al. 2005).

1.3 Maschinelle Wurzelkanalpräparation

Seit der Jahrtausendwende wurde die maschinelle Wurzelkanalpräparation populärer. Der geringere Kraftaufwand sowie der reduzierte Zeitaufwand

(Schäfer et al. 2004) überzeugten viele Zahnärzte (Walia et al. 1988). Die maschinelle Wurzelkanalpräparation setzte für die moderne Endodontologie wesentliche Maßstäbe und ist heute weit verbreitet.

Nickel-Titan-Instrumente (NiTi) zeichnen sich durch ihre besonderen Materialeigenschaften aus. Sie besitzen einen deutlich geringeren Elastizitätsmodul als herkömmliche Stahlinstrumente (Viana et al. 2010) und können sich folglich sehr flexibel verformen sowie in ihre ursprüngliche Form zurückkehren. Dieser sogenannte *memory effect* ermöglicht es dem Zahnarzt, auch gekrümmte Wurzelkanäle erfolgreich zu präparieren (Capar et al. 2014).

Die maschinelle Wurzelkanalpräparation lässt sich in die vollrotierend-maschinelle und in die reziprok-maschinelle Bewegung unterteilen. Bei der vollrotierend-maschinellen Präparation bewegt sich das Präparationsinstrument mit einer kontinuierlichen 360°-Bewegung. Im Gegensatz dazu setzt sich die reziprok-maschinelle Präparation aus Bewegungen mit dem und gegen den Uhrzeigersinn zusammen.

Um mit Hilfe der Einstifttechnik eine dichte Wurzelkanalfüllung zu erzielen, ist eine möglichst hohe Formkongruenz zwischen Präparationsinstrumenten, Wurzelkanallumen und Füllstiften Voraussetzung. Die Dimensionen der Instrumente (u. a. Durchmesser und Konizität) und die maximalen Fertigungstoleranzen sind durch die DIN EN ISO-Norm 3630 vorgegeben, werden aber nicht immer ausreichend eingehalten.

Lask et al. (2006) untersuchten vier NiTi-Systeme in Bezug auf die Abweichung der Konizität und des Durchmessers an der Instrumentenspitze. Es wurden jeweils Instrumente der Größe 30/.04 untersucht, die dazu tendierten, einen größeren Durchmesser zu haben als vom Hersteller angegeben. Zwischen den Systemen verschiedener Hersteller wurden signifikante Unterschiede des Durchmessers, aber keine in Bezug auf die Konizität gefunden.

Hatch et al. (2008) untersuchten drei NiTi-Systeme der Größen 35/.06, 40/.06 und 45/.06 auf Abweichungen. Durchmesser sowie Konizität waren tendenziell kleiner als angegeben.

Einfilen-Systeme (*Single-File*) zeichnen sich dadurch aus, dass für die gesamte Wurzelkanalpräparation nur ein einziges Präparationsinstrument verwendet wird. Dies ist zum einen zeitsparend (Bürklein et al. 2013), zum anderen auch weniger fehleranfällig bei der Behandlung. Oft sind Einfilen-Systeme nur für den

Einmalgebrauch (*single-use*) zugelassen. Klare Vorteile des Einmalgebrauchs sind verbesserte Hygienebedingungen durch Vermeidung von Kreuzkontaminationen, eine verminderte Gefahr der Instrumentenfraktur und geringere Kosten durch den Wegfall der Nachbereitung der Instrumente (Yared 2008). Sonntag und Peters (2007) zeigten, dass die vollständige Reinigung von NiTi-Instrumenten nicht möglich ist, und empfahlen Einmal-Instrumente.

1.3.1 Reciproc

Das Reciproc-System der Firma VDW (VDW, München, Deutschland) ist ein *Single-File-System* (SF), das sich durch seine zyklische Arbeitsweise auszeichnet. Die reziproke Bewegung beginnt mit einer schneidenden 150°-Drehung gegen den Uhrzeigersinn. Es folgt eine entgegengesetzte Bewegung um 30°, die Verklemmungen des Instruments im Wurzelkanal vermeiden und abgetragene Dentinspäne nach koronal fördern soll. Abbildung 1 zeigt den Querschnitt des Reciproc-Instruments. Durch die Entlastungsrotation sollen die Materialermüdung sowie das Risiko einer Instrumentenfraktur sinken (Kim et al. 2012). Das Instrument wird mit sehr geringem Druck in pickenden Bewegungen in den Wurzelkanal eingebracht. Nach Herstellerangaben soll das Instrument nach drei pickenden Bewegungen von Dentinspänen gereinigt und auf Beschädigungen untersucht werden. Die Wurzelkanalpräparation ist dann abgeschlossen, wenn die vorher bestimmte Arbeitslänge erreicht wird.

Die Firma VDW bietet Reciproc-Instrumente in drei verschiedenen Größen an: R25, R40 und R50. R25 hat einen Durchmesser von 0,25 mm an der Instrumentenspitze und eine Konizität von 8% über die apikalen 3 mm. Die zweite Größe R40 hat einen Durchmesser von 0,40 mm an der Instrumentenspitze und eine Konizität von 6% über die apikalen 3 mm. Das größte Instrument ist R50 mit einem apikalen Durchmesser von 0,50 mm und einer Konizität von 5% über die apikalen 3 mm. Bei allen drei Größen beträgt die Konizität 4% nach den apikalen 3 mm.

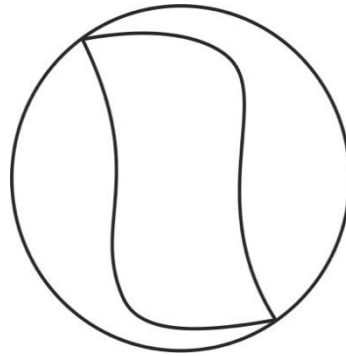


Abbildung 1: Doppel-S-Querschnitt der Reciproc-Instrumente

Die Instrumente haben einen Doppel-S-förmigen Querschnitt mit zwei Schneidekanten. Die Spitze der Reciproc-Instrumente ist nicht schneidend. Hergestellt werden die Instrumente aus *M-wire*, einer speziell thermisch behandelten Nickel-Titan-Legierung. *M-wire* erhöht die Flexibilität und die Fraktursicherheit im Gegensatz zu herkömmlichen NiTi-Legierungen (Bürklein et al. 2013).

Bei dem Reciproc-Instrument handelt es sich um ein *single-use*-Produkt, das ohne Instrumentenwechsel so lange verwendet wird, bis es die Arbeitslänge erreicht hat. Da nur ein Instrument pro Präparation benötigt wird, ist die Handhabung zeitsparend und praktisch. Die dazugehörigen formkongruenten Guttaperchastifte können für die Wurzelkanalobturation genutzt werden.

1.3.2 F6 SkyTaper

Das Präparationssystem F6 SkyTaper (Brasseler, Lemgo, Deutschland) ist ein *Single-File-System* (SF) und für den Einmalgebrauch vorgesehen. Im Gegensatz zum Reciproc-System arbeitet F6 SkyTaper mit einer vollrotierenden 360°-Bewegung. Der Instrumentenquerschnitt ist ebenfalls doppel-S-förmig mit zwei aktiven Schneidekanten, die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. Die Größen 20, 25, 30, 35 und 40 sind jeweils mit einer gleichbleibenden Konizität von 6% in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Die F6 SkyTaper-Instrumente werden ohne Instrumentenwechsel bis auf die zuvor bestimmte Arbeitslänge gebracht. Dabei sollen laut Hersteller kleine pickende Bewegungen durchgeführt werden. Die anschließende Wurzelkanalspülung ist unerlässlich – wie bei allen anderen Feilen-Systemen auch.

1.3.3 Mtwo

Die Mtwo-Instrumente (VDW, München, Deutschland) sind ein Mehrfeilen-System. Dieses *Multiple-Files*-System (MF) zeichnet sich durch eine 360°-Vollrotation aus. Es weist wie die beiden anderen Systeme einen doppelt S-förmigen Querschnitt auf, hat zwei aktive Schneidekanten und einen progressiven Schneidenabstand, was bedeutet, dass der Abstand der Schneiden sich von der Instrumentenspitze zum Instrumentenschaft hin vergrößert. Dies soll für einen besseren Dentinabtransport und für weniger Verklemmungen im Wurzelkanal sorgen. Die Instrumente werden in den Größen 10/.04, 15/.05, 20/.06, 25/.06, 30/.05, 35/.04, 40/.04, 45/.04, 50/.04 und 60/.04 angeboten.

1.4 Wurzelkanalobturation

Die Wurzelkanalfüllung stellt den abschließenden Teil der Behandlung dar. Nach gründlicher Wurzelkanalpräparation und -desinfektion muss der Wurzelkanal möglichst vollständig und bakteriendicht gefüllt werden. Das Ziel ist es, einen bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanals zu erreichen, sodass eine apikale Entzündung abheilen und keine Reinfektion stattfinden kann.

Eine komplette Wurzelkanalfüllung ist jedoch schwierig zu realisieren, da der Wurzelkanal verschiedenste geometrische Formen und anatomische Besonderheiten aufweisen kann. Stark gekrümmte Wurzelkanäle, mehrere Apices oder Isthmen stellen sowohl an den Zahnarzt als auch an das Material hohe Anforderungen.

1.4.1 Guttapercha

Der Werkstoff Guttapercha ist ein thermoplastisches Material und wird in der Alpha- und der Beta-Konfiguration hergestellt. Die Unterschiede zwischen der Alpha- und Beta-Konfiguration liegen im Schmelz- und somit auch im Anwendungsbereich. Die Beta-Guttapercha wird vornehmlich bei der kalten, die Alpha-Guttapercha bei der warmen Obturation verwendet. Die Guttaperchastifte, die in der Zahnmedizin benutzt werden, bestehen nicht gänzlich aus dem Naturprodukt Guttapercha. Sie enthalten zusätzlich noch Zinkoxid als Füllstoff, Wachse für die Plastizität und Metallsulfate für die Röntgenopazität (Friedman et al. 1975).

Mit seinen für die Zahnmedizin vorteilhaften Eigenschaften überzeugt Guttapercha, da es u. a. biokompatibel, dimensionsstabil, plastisch verformbar, kompaktierbar und im Falle einer Revisionsbehandlung leicht zu entfernen ist (Shanahan und Duncan 2011).

Guttaperchastifte werden maschinell im Gussverfahren hergestellt oder manuell gerollt und können herstellungsbedingt Fertigungstoleranzen aufweisen. Diese dürfen für Guttaperchastifte der Größen ISO 10 – 25 jeweils $\pm 0,05$ mm betragen. Ab der Größe ISO 25 darf die Fertigungstoleranz $\pm 0,07$ mm betragen. Diese Vorgaben sind in der DIN EN ISO-Norm 6877 festgelegt. Das bedeutet, dass in einem Wurzelkanal, der bis zur Größe ISO 25 präpariert wurde, unter Umständen sowohl ein Guttaperchastift der Größe ISO 20 als auch einer der Größe ISO 30 passen kann. In der Studie von Moule et al. (2002) wurden standardisierte *Single-Cone*-Systeme acht verschiedener Hersteller mit den Größen ISO 25, ISO 30 und ISO 35 jeweils 1 mm und 6 mm koronal der Spitze vermessen. Die Autoren stellten fest, dass die Durchmesser der *Single-Cones* der drei Größen aller acht Hersteller großen Schwankungen unterlagen. Die DIN EN ISO-Norm 6877 sei ungeeignet und lasse zu große Abweichungen zu.

Cunningham et al. (2006) prüften fünf verschiedene Guttaperchastift-Systeme auf ihre Formtreue. Die Guttaperchastifte der Größe 30/.04 wurden an der Spitze vermessen, zudem wurde die Konizität verglichen. Es zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Herstellern in Bezug auf den Durchmesser an der Stiftspitze sowie hinsichtlich der Konizitäten. Ebenfalls wurden auch hohe Abweichungen innerhalb eines Systems eines Herstellers festgestellt.

Diese Studien verdeutlichen die Schwierigkeit, mit angeblich formkongruenten Instrumenten bzw. Stiftsystemen dichte und wandständige Wurzelkanalfüllungen zu erzielen.

Guttapercha als alleiniges Wurzelfüllmaterial ist nicht in der Lage, einen bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanalsystems zu erlangen. Eine Füllung mit Guttapercha und einer Wurzelfüllpaste zeigte dichter gefüllte Wurzelkanalsysteme als eine Wurzelkanalfüllung ohne Wurzelfüllpaste (Tagger et al. 1994).

1.4.2 Wurzelfüllpasten

Wurzelfüllpasten, im Englischen *Sealer* genannt, haben die Aufgabe, einen langfristigen Haftverbund zwischen Guttapercha und Wurzelkanalwand herzustellen.

Einer der am häufigsten verwendeten *Sealer* ist AH-Plus (Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland), der auf einem Epoxid-Amin-Harz basiert. Unter anderem zeichnet sich AH-Plus durch gute Dimensionsstabilität, gute Dichtigkeit und hohe Anwenderfreundlichkeit aus. In der Literatur wird AH-Plus als biokompatibel beschrieben (Konjhodzic-Prcic et al. 2015). *Sealer*, die auf Zinkoxid-Eugenol basieren, wurden von den Autoren schlechter bewertet (Sadr et al. 2015). Besonders die Zytotoxizität, die Dentinhaftung und das Schrumpfungsverhalten sind die Hauptkritikpunkte. Es wird empfohlen, so wenig *Sealer* wie nötig zur Wurzelkanalobturation zu benutzen (Ørstavik et al. 2001). Undichtigkeiten der Wurzelkanalfüllung, die koronal eintretenden Bakterien einen Zugang zum periapikalen Gewebe erlauben, können entstehen.

Auch der häufig verwendete *Sealer* AH-Plus zeigte Undichtigkeiten, besonders zwischen Wurzelkanalwand und Guttapercha (Zmener et al. 1997).

1.5 Kalte Wurzelkanalobturation

1.5.1 Laterale Kompaktion

Als laterale Kompaktion wird eine Technik bezeichnet, bei der ein Guttaperchastift mit *Sealer* benetzt in den Wurzelkanal eingebracht wird. Dabei soll der zuerst eingesetzte Guttaperchastift, der sogenannte *Masterpoint*, mit apikaler Friktion auf die zuvor bestimmte Arbeitslänge appliziert werden. Anschließend wird der *Masterpoint* mit Hilfe von *Spreadern* gegen die Wurzelkanalwand gedrückt und somit verdichtet. Der durch das Verdichten entstandene Hohlraum wird mit weiteren akzessorischen Guttaperchastiften aufgefüllt, die erneut komprimiert werden. Diese Obturationstechnik gilt als die am weitesten verbreitete Wurzelkanalfülltechnik (Whitworth 2005), die gute Langzeitergebnisse zeigt und einfach in der Anwendung ist (Hata et al. 1995). Grundsätzlich wird wie bei allen gängigen Obturationsmethoden angestrebt, möglichst viel Volumen des Wurzelkanals mit Guttapercha und möglichst wenig Volumen mit *Sealer* auszufüllen (Wu et al. 2001). Gute Ergebnisse zeigten sich

bei konisch präparierten Wurzelkanälen im Vergleich zu solchen mit komplexer Geometrie oder weit offenem Apex. Auch in ovalen Wurzelkanälen war die Kompaktion im apikalen Drittel ungenügend (Wu und Wesselink 2001). Ebenfalls kritisch kann das Verwenden der *Spreader* gesehen werden, wenn diese durch zu große Krafteinwirkung Längsfrakturen am Zahn hervorrufen (Tamse 1988).

1.5.2 Single-Cone

Die *Single-Cone*-Technik wurde in den 1960er-Jahren durch Standardisierungen der Präparationsinstrumente und Füllungsmaterialien wie Silber-, Titan- oder Guttaperchastifte entwickelt (Pereira et al. 2012). In den 1990er-Jahren wurden – aufgrund der Versuche von Ingle – standardisierte Guttaperchastifte mit genormter Steigung und genormtem Durchmesser kongruent zu den Präparationsinstrumenten eingesetzt (Ingle 1961).

Die Einstift-, Zentralstift- oder *Single-Cone*-Technik genannte Obturationstechnik zeichnet sich durch den Einsatz von nur einem einzigen Guttaperchastift aus. Dabei sollen die Form des zuletzt eingesetzten Präparationsinstruments sowie des Guttaperchastifts möglichst kongruent sein. Die *Single-Cone*-Technik bietet im Vergleich zu anderen Wurzelkanalfülltechniken Vorteile. Zum einen ist die Einstift-Technik für den Zahnarzt zeitsparend, zum anderen sicher in der Anwendung (Hörsted-Bindslev et al. 2007).

Um kleinere Inkongruenzen zwischen dem Guttaperchastift und dem Wurzelkanal auszugleichen, wird für gewöhnlich ein *Sealer* verwendet, der eine undurchlässige Verbindung, einerseits mit dem Guttaperchastift, andererseits mit dem Wurzeldentin eingehen soll (Vujašković und Teodorović 2010). Ziel ist es, eine durchgängig dreidimensionale bakteriendichte Wurzelkanalfüllung zu erreichen, um eine periapikale Reinfektion zu unterbinden. *Sealer* stellen bei Wurzelkanalfüllungen eine Schwachstelle dar. Es kann zu Undichtigkeiten zwischen dem *Sealer* und der Guttapercha, dem *Sealer* und der Wurzelkanalwand oder durch Porositäten innerhalb des *Sealers* kommen.

Zahlreiche Dentalhersteller bieten Wurzelkanalpräparationsinstrumente in Kombination mit passenden Guttaperchastiften an. In der DIN EN ISO-Norm 3630 sind Materialeigenschaften sowie Konizitäten von Präparationsinstrumenten festgelegt. Die Formkongruenz zwischen Wurzelkanal und Guttaperchastift kann nur durch eine standardisierte Präparation erzielt werden.

Die Dentalhersteller werben damit, dass ihre Wurzelkanalpräparationsinstrumente und die dazugehörigen Guttaperchastifte bezüglich Durchmesser und Konizität formkongruent seien. In mehreren Studien wurde untersucht, inwiefern die Guttaperchastifte Fertigungsabweichungen aufwiesen. Dabei ergab sich, dass die Fertigungstoleranzen – abhängig vom Hersteller – variierten.

Als problematisch sind Wurzelkanäle anzusehen, die keinen runden Querschnitt aufweisen. Wurzelkanäle mit ovalem Querschnitt sind nicht optimal mit der *Single-Cone*-Technik zu füllen. Eine erweiterte kreisrunde Präparationsform, die den ovalen Querschnitt im Gesamten fasst, erhöht den Dentinabtrag wesentlich (Wu und Wesselink 2001).

Pommel und Camps (2001) verglichen folgende Obturationsmethoden: System B, *Single-Cone*, kalte laterale bzw. warm-vertikale Kompaktion und Thermafill. Jeweils zehn Zähne pro Obturationstechnik wurden auf die Dichtigkeit überprüft. Sowohl nach einem Tag als auch nach einem Monat wurden die Tests durchgeführt. Die *Single-Cone*-Technik zeigte nach 24 Stunden und auch nach einem Monat die höchste Undichtigkeit.

Gordon et al. (2005) verglichen die *Single-Cone*-Obturationstechnik mit der kalten lateralen Kompaktion an Wurzelkanälen mit einer Krümmung von 30° und einem Radius von 10,5 mm sowie an Wurzelkanälen mit einer Krümmung von 58° und einem Radius von 4,7 mm. In beiden Gruppen wurde der *Sealer* AH-26 verwendet. Die Wurzelkanäle wurden auf mehreren Ebenen durchtrennt und durch Fotos mit einer Vergrößerung mit Faktor 40 ausgewertet. Es zeigte sich, dass bei dem Schnitt 2,5 mm koronal des Apex die *Single-Cone*-Obturationstechnik bei 58° Krümmung signifikant überlegen war. Des Weiteren ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Obturationsmethoden.

Wu et al. (2006) untersuchten zwei Gruppen mit jeweils 30 extrahierten Zähnen, die mit NiTi-Instrumenten präpariert worden waren. Eine Gruppe wurde mit der *Single-Cone*-Technik gefüllt, nachdem der *Sealer* RoekoRSA mit einer bidirektionalen Spirale im Kanal verteilt wurde. Die andere Gruppe wurde mit der *Single-Cone*-Technik gefüllt, wobei der *Sealer* mit dem *Single-Cone* eingebracht wurde. Die apikalen 4 mm der Zähne wurden untersucht. Es ergaben sich nach einer Woche sowie nach einem Jahr in beiden Testreihen keine apikalen Undichtigkeiten im Flüssigkeits-Filtrationstest. In der Gruppe, in welcher der

Sealer mit dem *Single-Cone* eingebracht wurde, zeigten 88% der Zähne überpressten *Sealer*, in der anderen Gruppe lediglich 28%.

Monticelli et al. (2007) prüften die Bakteriendichtigkeit fünf verschiedener Obturationstechniken. Die extrahierten Zähne wurden mit System B, kalter lateraler Kompaktion, Thermafill, *Single-Cone* ProTaper Guttapercha und kalter lateraler Kompaktion mit ProTaper Guttapercha gefüllt. Mit *Enterococcus faecalis* wurde ein Bakterienpenetrationstest durchgeführt. Die schnellste Penetration des Bakteriums wurde bei Thermafill und der *Single-Cone*-Technik gefunden. Nach 60 Tagen wurde aber kein signifikanter Unterschied mehr zwischen allen Obturationsmethoden festgestellt.

Inan et al. (2009) verglichen die *Single-Cone*-Technik mit der kalten lateralen Kompaktion und Thermafill. Für die Studie wurden 66 Unterkiefer-Prämolaren mit NiTi-Instrumenten rotierend präpariert und mit dem *Sealer* AH-Plus sowie Guttapercha gefüllt. Mit der Flüssigkeits-Filtrations-Methode wurde die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung nach sieben Tagen ermittelt. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Obturationsmethoden festgestellt.

Pitout und Oberholzer (2009) untersuchten die bakterielle Dichtigkeit dreier Obturationsmethoden. Es wurden die *Single-Cone*-Technik, die kalte laterale Kompaktion und die warm-vertikale Kompaktion verglichen. 85 einwurzelige Zähne wurden über einen Zeitraum von 90 Tagen beobachtet. Es zeigte sich, dass die warm-vertikale Kompaktion schlechter abdichtete als die *Single-Cone*-Technik bzw. die kalte laterale Kompaktion. Das Resultat der Studie ist jedoch nicht eindeutig auf die Obturationsmethode zurückzuführen, da jeweils unterschiedliche *Sealer* verwendet wurden.

Ozawa et al. (2009) prüften an 42 extrahierten ovalen Wurzelkanälen drei verschiedene Obturationstechniken. Es wurden ProTaper-Präparationen mit anschließender Wurzelkanalfüllung mit der *Single-Cone*-Technik, Thermafill oder kalter lateraler Kompaktion mit formkongruenten Guttaperchastiften angefertigt. Die Zähne wurden im apikalen, medialen und koronalen Drittel auf die Menge an *Sealer* untersucht. Thermafill wies im medialen Drittel signifikant weniger *Sealer* auf als die anderen Obturationstechniken. Es wurden in allen Wurzelkanaldritteln keine signifikanten Unterschiede zwischen der *Single-Cone*-Technik und der kalten lateralen Kompaktion festgestellt.

Taşdemir et al. (2009a) verglichen die Einstift-Technik mit der kalten lateralen Kompaktion und der warm-vertikalen Obturation an 80 extrahierten Zähnen. Diese wurden zuvor mit NiTi-Instrumenten präpariert und anschließend mit dem jeweiligen Obturationssystem und dem *Sealer AH-Plus* gefüllt. Die obturierten Zähne wurden mit einem Bakterienpenetrationstest auf ihre Dichtigkeit überprüft. Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den drei getesteten Obturationsmethoden in Bezug auf die Dichtigkeit.

Taşdemir et al. (2009b) prüften den prozentualen Anteil an Guttapercha zweier Wurzelkanalfülltechniken. 30 Zähne wurden mit ProTaper NiTi-Instrumenten präpariert und 15 Zähne mit der *Single-Cone*-Technik, 15 Zähne mit der kalten lateralen Kompaktion gefüllt. Alle Zähne wurden 2 mm und 4 mm vom Apex durchtrennt und nach 40-facher photographischer Vergrößerung begutachtet. Es zeigte sich, dass die *Single-Cone*-Technik beim Schnitt 2 mm koronal des Apex signifikant mehr Volumen mit Guttapercha ausfüllte als die kalte laterale Kompaktion. Beim Schnitt 4 mm koronal des Apex war kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Obturationstechniken zu erkennen. Nach Meinung der Autoren könne davon ausgegangen werden, dass die *Single-Cone*-Technik eine qualitativ bessere Obturation darstellt als die kalte laterale Kompaktion, wenn die Menge an Guttapercha im Wurzelkanal als Qualitätskriterium angesehen wird.

Yilmaz et al. (2009) untersuchten einwurzelige extrahierte Zähne auf die Dichtigkeit vier verschiedener Obturationstechniken. Die Systeme BeeFill 2in1, System B/ Obtura II, *Single-Cone* und die kalte laterale Kompaktion wurden verglichen, nachdem die Wurzelkanäle mit Mtwo NiTi-Instrumenten präpariert worden waren. Bei den mit BeeFill gefüllten Zähnen wurde der *Sealer 2seal*, bei allen anderen der *Sealer AH-26* verwendet. Die Daten wurden nach einer sowie nach zwei Wochen erhoben. Es stellte sich heraus, dass die Systeme B/ Obtura II und BeeFill schlechtere Dichtigkeiten als die anderen Systeme aufwiesen.

Marciano et al. (2011) verglichen vier Obturationsmethoden. Dafür wurden 60 mesiale Wurzeln der ersten unteren Molaren mit ProTaper NiTi-Instrumenten präpariert und mit der *Single-Cone*-Technik, der kalten lateralen Kompaktion, System B oder Thermafill gefüllt. Die Zähne wurden 2, 4 und 6 mm koronal des Apex durchtrennt. Unter einem Mikroskop wurden die Menge an *Sealer* bzw. Guttapercha sowie die Porositäten ermittelt. Es stellte sich heraus, dass die

Single-Cone-Technik bei 2 mm und 4 mm signifikant mehr *Sealer* sowie Porositäten und weniger Guttapercha als Thermafill aufwies. Das Schnittbild 2 mm koronal des Apex zeigte keine Unterschiede zwischen der *Single-Cone*-Technik, der kalten lateralen Kompaktion und System B.

Robberecht et al. (2012) verglichen die *Single-Cone*-Technik mit der warm-vertikalen Kompaktion. Zu diesem Zweck wurden 20 extrahierte Zähne mit Mtwo präpariert und mit der *Single-Cone*-Technik gefüllt, 20 weitere wurden mit NiTi-Instrumenten präpariert und mit BeeFill warm-vertikal gefüllt. Die apikale Dichtigkeit der Obturationsmethoden wurde anhand eines Farb-Tests mit Methylen-Blau ermittelt. Die *Single-Cone*-Technik wies schlechtere Ergebnisse auf als die warm-vertikale Obturation.

Schäfer et al. (2012) untersuchten verschiedene Obturationsmethoden im Hinblick auf die Menge an Guttapercha bzw. an *Sealer* sowie Porositäten. Es wurden 48 extrahierte Zähne verwendet, deren Wurzeln eine Krümmung von 25° bis 35° aufwiesen. Alle Zähne wurden mit Mtwo NiTi-Instrumenten bis zur Größe ISO 35 präpariert. Anschließend wurden die Zähne in vier Gruppen aufgeteilt und entweder mit der *Single-Cone*-Technik, der kalten lateralen Kompaktion mit formkongruenten bzw. standardisierten Guttaperchastiften oder warm-vertikal gefüllt. In allen Gruppen wurde der *Sealer* AH-Plus verwendet, die Zähne wurden nach Obturation bei 2, 3, 4, 6 und 8 mm koronal des Apex durchtrennt und die prozentualen Werte der Guttaperchafläche, des *Sealers* und der Porositäten ermittelt. Es zeigte sich, dass die *Single-Cone*-Technik signifikant mehr *Sealer* und Porositäten und weniger Guttapercha als die anderen drei Gruppen aufwies. Zwischen den verbleibenden drei Gruppen lagen keine signifikanten Unterschiede vor. Die *Single-Cone*-Technik war die zeitlich schnellste Obturationsmethode.

Chesler et al. (2013) untersuchten drei *Single-Cone*-Systeme auf die Formkongruenz zwischen Präparationsinstrument und Guttaperchastift. Beide wurden unter einem Mikroskop unter 35-facher Vergrößerung analysiert. Es fanden sich signifikante Unterschiede beim Durchmesser sowie bei der Konizität der drei Systeme.

In der Studie von El Sayed et al. (2013) wurden 90 einwurzelige Zähne mit verschiedenen Obturationstechniken behandelt. Die Zähne wurden in sechs Gruppen eingeteilt, wobei die sechste Gruppe die unbehandelte Kontrollgruppe

war, und mit NiTi-Instrumenten präpariert. Glukose-Penetrationstests wurden nach einem Tag sowie nach ein, zwei, drei und sechs Wochen durchgeführt. Die Gruppen der *Single-Cone*-Technik mit dem *Sealer* AH-Plus, der *Single-Cone*-Technik mit dem *Sealer* GuttaFlow und der *Single-Cone*-Technik mit dem *Sealer* Real Seal zeigten signifikant weniger Undichtigkeiten als die kalte laterale Kompaktion mit AH-Plus bzw. die *Single-Cone*-Technik ohne *Sealer*. Die Standardabweichungen waren bei allen Gruppen hoch.

Moinzadeh et al. (2015) untersuchten zwei Gruppen mit je sieben extrahierten Zähnen nach der Wurzelkanalfüllung mit der *Single-Cone*-Obturationstechnik und der kalten lateralen Kompaktion – jeweils mit einem Kalziumsilikat-*Sealer*. Die Zähne wurden im Mikro-CT nach der Wurzelkanalpräparation und nach der Wurzelkanalfüllung gescannt und auf Hohlräume untersucht. Die *Single-Cone*-Obturationstechnik wies im medialen und im koronalen Drittel prozentual signifikant weniger Porositäten auf als die kalte laterale Kompaktion. Im apikalen Drittel waren die Unterschiede zwischen beiden Obturationssystemen nicht signifikant. Die *Single-Cone*-Obturationstechnik zeigte in einigen Präparaten gar keine Porositäten, die kalte laterale Kompaktion hingegen in jedem Präparat. Sadr et al. (2015) prüften an drei Gruppen mit jeweils 20 Zähnen die *Single-Cone*-Obturationstechnik mit verschiedenen *Sealern*. Die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllungen wurde nach sieben Tagen mit Methylen-Blau untersucht. Die Gruppe mit der *Single-Cone*-Obturationstechnik und dem *Sealer* AH-26 erwies sich als signifikant am dichtesten, die Gruppe mit der *Single-Cone*-Obturationstechnik und einem Zinkoxid-Eugenol-*Sealer* zeigte die schlechtesten Ergebnisse.

Krug et al. (2017) untersuchten in einer retrospektiven klinischen Studie 535 Wurzelkanalbehandlungen. 254 Zähne wurden manuell mit Handinstrumenten präpariert und kalt lateral gefüllt, 281 Zähne mit NiTi-Instrumenten und *Single-Cone*-Technik. Signifikant bessere Ergebnisse waren bei der *Single-Cone*-Technik in Bezug auf die Länge der Wurzelkanalfüllung bei Molaren und Unterkieferzähnen zu verzeichnen. Außerdem wurden signifikant weniger Fehler in der Behandlungsweise mit der *Single-Cone*-Technik festgestellt.

Castagnola et al. (2018) untersuchten zwei Gruppen extrahierter, wurzelkanalpräparierter Zähne im Mikro-CT auf Porositäten der Wurzelkanalfüllungen. 40 Zähne wurden mit WaveOne präpariert und, 20 Zähne mit der *Single-Cone*-Obturationstechnik und dem *Sealer* AH-Plus, 20 Zähne mit GuttaCore und dem

Sealer AH-Plus gefüllt. Die Porositäten in Kubikmillimetern wurden nach sieben Tagen Inkubationszeit an drei verschiedenen Stellen ermittelt. Es stellte sich heraus, dass die Zähne, die mit GuttaCore gefüllt worden waren, im medialen und koronalen Drittel weniger Porositäten aufwiesen als diejenigen mit der *Single-Cone*-Obturationstechnik. Beide Systeme zeigten im apikalen Drittel jedoch ähnliche Resultate.

Haupt et al. (2018) untersuchten drei *Single-File*-NiTi-Systeme mit den passenden Guttaperchastiften für die *Single-Cone*-Obturationstechnik. Es wurden der Durchmesser, die Konizität und die Toleranzwerte mit den Herstellerangaben verglichen. Durchmesser und Konizität der NiTi-Instrumente und der Guttaperchastifte stimmten größtenteils überein. Trotz Standardisierung der Instrumente und der korrespondierenden Guttaperchastifte sei aber mit Abweichungen und Passungenauigkeiten zu rechnen.

1.5.3 Trägerbasierte Systeme

Die trägerbasierten Systeme bauen auf einem starren Kern auf, der mit Guttapercha ummantelt ist. Vor der Wurzelkanalobturation wird dieser, gewöhnlich aus Kunststoff oder aus Guttapercha bestehend, im Wurzelkanal auf seine Passung hin kontrolliert. Anschließend wird der Stift in einem Ofen erwärmt, mit *Sealer* benetzt und in den Wurzelkanal eingeführt. Dieses System stellt ein einfaches und schnelles Verfahren der Wurzelkanalobturation dar. Zügiges Arbeiten ist allerdings notwendig, denn ein langsames Einsetzen des warmen Stifts führt zu schlechteren apikalen Füllungsergebnissen (Levitan et al. 2003). Clinton und Himel (2001) verglichen an menschlichen extrahierten Zähnen die Füllungseigenschaften von Thermafill-Plus mit der kalten lateralen Kompaktion. Es zeigte sich, dass Thermafill-Plus besser in laterale Seitenkanäle infiltrierte, weniger Porositäten aufwies und der Wurzelgeometrie besser folgte. Jedoch wurde auch mehr Füllungsmaterial apikal überpresst als bei der kalten lateralen Kompaktion. Beschädigungen der Zahnwurzel oder des parodontalen Gewebes durch die Temperatur eines warmen Thermafill-Plus-Stifts sind nicht belegt (Behnia und McDonald 2001). Chu et al. (2005) stellten in ihrer Studie, in der die kalte laterale Kompaktion mit Thermafill verglichen wurde, fest, dass sich die Behandlungsergebnisse nicht signifikant unterschieden.

1.6 Computertomographie

Der Computertomograph (CT) kann mit einem computerbasierten bildgebenden Verfahren Schichtansichten eines Objekts erstellen. Dieses wird dabei von Röntgenstrahlen durchleuchtet und die gewonnenen Daten zu einem dreidimensionalen Bild hochgerechnet. Bei der herkömmlichen Röntgentechnik durchleuchten die Röntgenstrahlen das Objekt und bilden es zweidimensional auf einer Röntgenfolie oder einem elektronischen Detektor ab. Mit Hilfe des Computertomographen können dreidimensionale Strukturen des Objekts dargestellt werden, ohne dieses dabei zerstören zu müssen. Es besteht, wie beim konventionellen Röntgen, jedoch eine nicht unbeträchtliche Strahlenbelastung, die negative Auswirkungen auf lebende Organismen haben kann. Die Computertomographie gilt in der modernen Medizin als eines der wichtigsten Diagnoseverfahren. Besonders eignet sie sich, Hartgewebsstrukturen abzubilden, wie zum Beispiel Knochenfrakturen. Weichgewebe können durch den Zusatz von Kontrastmitteln ebenfalls gut dargestellt werden.

1.7 Mikro-Computertomographie

Ein Mikro-Computertomograph (Mikro-CT) stellt eine Weiterentwicklung des Computertomographen dar und basiert auf einer ähnlichen Technik. In den frühen 1980er-Jahren wurden die ersten Versuche mit einem Mikro-CT durchgeführt. Seit Mitte der 1990er-Jahre ist der Mikro-CT kommerziell verfügbar und seitdem ein oft genutztes und bewährtes Untersuchungsverfahren in der modernen Forschung. Bei einem herkömmlichen CT dreht sich die Röntgenquelle um das starre Objekt herum. Beim Mikro-CT dreht sich das Objekt, während die Röntgenquelle starr ist. Die Bildauflösung des in der vorliegenden Studie genutzten Mikro-CTs SkyScan 1272 (Bruker, Billerica, USA) beträgt 209 Megapixel bei einer Detailauflösung von 0,4 μm . Ein herkömmlicher CT besitzt eine Detailauflösung von ca. 1 mm (Engelke et al. 1999). Ein Mikro-CT kann durch seinen fokussierten Strahlengang nur Objekte von wenigen Zentimetern, ein herkömmlicher CT einen Menschen mit weit über hundert Zentimetern Größe scannen. Wegen des sehr detaillierten Scans des Mikro-CTs sind sowohl die Dauer des Scans als auch die benötigte Speicherkapazität für die Datensätze größer als beim herkömmlichen CT.

Der in dieser Studie verwendete Mikro-CT besteht aus einer Röntgenquelle, einem Röntgendetektor und einem rotationsfähigen Objektträger. Ein leistungsstarker Computer mit mehreren Grafikkarten und dem Betriebssystem Microsoft Windows ist in der Lage, die gewonnenen Daten dreidimensional darzustellen und zu analysieren.

Von einer Röntgenquelle werden Röntgenstrahlen ausgesandt und von einem Detektor empfangen. Die Differenz zwischen der ausgehenden und der detektierten Strahlungsintensität ist abhängig vom zu scannenden Objekt. Mehr Strahlen werden bei Objekten mit höherer Dichte abgeschirmt als bei solchen mit geringerer. Um ein Objekt mit hoher Dichte scannen zu können, muss die Intensität der Röntgenquelle erhöht werden. Dies geschieht über die Stromstärke. Durch verschiedene Filter lässt sich das Energiespektrum, das abhängig von der Spannung ist, optimal auf das zu scannende Objekt und seine Dichte einstellen. Durch den *Shutter*, eine Blende, ist die Belichtungszeit des Objekts regulierbar. Eine eingebaute Kühleinheit sorgt für eine konstante Temperatur während des Scanvorgangs. Abhängig von der gewünschten Detailschärfe variieren sowohl die Scandauer als auch die benötigten Datenspeicherkapazitäten.

Besonders in der Forschung ist der Mikro-CT zu einem wichtigen Instrument geworden, um kleinste Strukturunterschiede aufzeigen zu können.

1.8 Mikro-Computertomographie in der Zahnmedizin

In der Zahnmedizin sind die Weiterentwicklungen des Mikro-CTs besonders für die Forschung sehr entscheidend geworden. Die nicht destruktive oder auch nicht-invasive Analyse kleinster Strukturen ist für die zahnmedizinische Forschung von großer Bedeutung (Swain und Xue 2009).

Informationen über Schmelzdicke und Schmelzmasse von Zähnen der Neandertaler wurden entweder durch destruktives Zerstören des Zahns oder durch relativ ungenaues computertomographisches Messen gewonnen. Durch den Einsatz des Mikro-CTs konnten die sowohl sehr alten als auch historisch wertvollen Zähne erhalten werden und genauere Analysen des Schmelzes erfolgen (Olejniczak et al. 2008). Des Weiteren konnte in einem anderen Zusammenhang mit Hilfe des Mikro-CTs die komplexe Wurzelkanalanatomie von zwölf extrahierten humanen Oberkiefermolaren dargestellt und der

Wurzelkanaldurchmesser sowie die Wurzelkanalkonfiguration erfasst werden. Dabei stellte sich heraus, dass das Mikro-CT eine genaue, nicht-invasive Analyse des Wurzelkanalsystems erlaubt (Peters et al. 2000).

Die Wurzelkanalanatomie, bezogen auf die Isthmuskonfiguration, wurde unter Anwendung des Mikro-CTs genau analysiert. Verschiedene Formen, wie flossenartig (*fin-shaped*), netzartig (*web-shaped*) oder bandartig (*ribbon-shaped*), wurden erkannt (Gu et al. 2009).

Der Mikro-CT ermöglichte es auch, zahlreiche Präparationsinstrumente in der Endodontologie zu vergleichen. Effektivität und Genauigkeit der angewendeten Präparationsinstrumente konnten anhand von überlagerten Mikro-CT-Scans ermittelt werden. Kanalbegradigungen, unpräparierte Bereiche oder Perforationen wurden analysiert und ließen so eine objektive Bewertung zu.

Durch ähnliche Versuchsaufbauten mit überlagerten Mikro-CT-Scans wurden unter anderem auch die Kanaldesinfektion (Versiani et al. 2016), die Entfernung von Kalziumhydroxid (Wiseman et al. 2011) und die Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen (Hammad et al. 2009) untersucht.

Jung et al. (2005) verglichen histologische Schnitte wurzelkanalgefüllter Zähne mit zuvor erhobenen Mikro-CT-Scans und kamen zu dem Ergebnis, dass der Mikro-CT eine genaue Methode der Bewertung darstellt.

Der Mikro-CT wurde ebenfalls verwendet, um die Effektivität einer Revisionsbehandlung in Bezug auf die möglichst vollständige Entfernung von Guttapercha zu ermitteln (Roggendorf et al. 2010).

Besonders die Endodontologie hat von der Weiterentwicklung des Computertomographen profitiert. Weitere Fortschritte in der Mikro-CT-Technik wie höhere Auflösungen und schnellere Scanzeiten werden diesem Verfahren in Zukunft noch weitere Einsatzmöglichkeiten bieten.

1.9 Ziel der Studie

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Qualität der *Single-Cone*-Wurzelkanalobturation nach maschineller Wurzelkanalpräparation mit der *Single-File*-Technik der Systeme Reciproc und F6 SkyTaper mit der *Multiple-Files*-Technik mit dem System Mtwo zu vergleichen. Diese Untersuchung erfolgt mit Instrumenten der Größen ISO 25 und ISO 40 mit variierenden Steigungen zwischen 4% und 8%.

Es wurden die folgenden Nullhypothesen überprüft:

1. Es besteht kein Unterschied in der Formkongruenz zwischen Präparation und systemeigenen Guttaperchastiften bei Verwendung von *Single-File*- oder *Multiple-Files*-NiTi-Systemen gleicher Größe und Steigung (F6 SkyTaper 25/.06 vs. Mtwo 25/.06)
2. Es besteht kein Unterschied in der Formkongruenz zwischen Präparation und systemeigenen Guttaperchastiften bei Verwendung von *Single-File*- oder *Multiple-Files*-NiTi-Systemen gleicher Größe und unterschiedlicher Steigung (Reciproc 40/.06 vs. Mtwo 40/.04)
3. Es besteht kein Unterschied in der Formkongruenz zwischen Präparation und systemeigenen Guttaperchastiften bei Verwendung von *Single-File* und *Multiple-Files*-NiTi-Systemen gleicher Größe und unterschiedlicher Steigung (Reciproc 25/.08 vs. Mtwo 25/.06).

2 Material und Methoden

Die Studie wurde von der Ethik-Kommission der Universitätsmedizin Göttingen mit der Antragsnummer 6/4/20 genehmigt. Die folgende Übersicht (Abbildung 2) stellt den Versuchsablauf schematisch dar.

2.1 Versuchsablauf

1.) Sammlung von 75 extrahierten menschlichen Zähnen

2.) Präparation der Zugangskavität

3.) Bestimmung der Arbeitslänge mit *Reamer* Größe ISO 10

4.) Gruppeneinteilung und Wurzelkanalpräparation

Gruppe 1: Reciproc 25/.08 (n = 15 Zähne)

Gruppe 2: F6 SkyTaper 25/.06 (n = 15 Zähne)

Gruppe 3: Mtwo 25/.06 (n = 15 Zähne)

Gruppe 4: Reciproc 40/.06 (n = 15 Zähne)

Gruppe 5: Mtwo 40/.04 (n = 15 Zähne)

5.) Obturation mit korrespondierendem Guttaperchastift

6.) Mikro-CT-Scan

7.) Datenanalyse

8.) Statistische Auswertung

Abbildung 2: Versuchsablauf

2.2 Zahnauswahl

Für die Studie wurden 75 extrahierte menschliche Oberkieferfrontzähne verwendet. Die Zähne wiesen eine gerade Wurzel und einen runden Wurzelkanal auf. Zähne mit noch nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum, internen Wurzelresorptionen, mehreren oder stark obliterierten Wurzelkanälen, Wurzelkanalfüllungen, nicht intaktem Apex, prothetischen Restaurationen oder kariös befallenen Wurzeln wurden von der Studie ausgeschlossen. Konkremente und Gewebereste wurden mechanisch mit einem *HS-Scaler* (Henry Schein Dental, Langen, Deutschland) von der Zahnoberfläche entfernt. Die Aufbewahrung der Zähne erfolgte in nummerierten Lagerungsboxen, gefüllt mit Leitungswasser. Die Zugangskavitäten wurden mit einem Diamantschleifer mit dem Durchmesser 14 mm (Brasseler, Lemgo, Deutschland) und dem Rotring-Pulpabohrer Müller (Brasseler, Lemgo, Deutschland) angelegt. Der Wurzelkanalquerschnitt wurde unter dem Dentalmikroskop (Zeiss, Oberkochen, Deutschland) bewertet. Wurzelkanäle, die laterale Extensionen oder Isthmen aufwiesen, wurden ausgeschlossen. Die Arbeitslänge für die spätere Wurzelkanalpräparation wurde mit Hilfe eines *Reamers* (VDW, München, Deutschland) der Größe ISO 10 ermittelt. Dieser wurde so weit in den Wurzelkanal eingebracht, dass er apikal an der Wurzelspitze austrat. Die Länge des *Reamers* wurde von einem Referenzpunkt des Zahns bis zum sichtbaren Austreten des Instruments apikal gemessen, ein Millimeter wurde subtrahiert. Die Feststellung der Arbeitslänge der jeweiligen Zähne erfolgte unter dem Dentalmikroskop.

Dieses Verfahren wurde bei allen Zähnen standardisiert angewandt, die jeweiligen Arbeitslängen wurden notiert. Anschließend wurde ein *Reamer* der Größe ISO 30 in den Wurzelkanal eingebracht und überprüft, ob dieser die notierte Arbeitslänge erreichte. War dies der Fall, wurde der Zahn von der Studie ausgeschlossen, da die präoperative interne Maximalgröße des Wurzelkanals überschritten war.

Die Einteilung der Zähne in zwei Gruppen erfolgte anhand ihres Wurzelkanaldurchmessers.

Die Zähne der Gruppen 1, 2 und 3 wurden bis zur Größe ISO 25 präpariert. Ermittelt wurde die Wurzelkanalgröße, indem ein *Reamer* der Größe ISO 20 in den Wurzelkanal eingebracht wurde und initial nicht die Arbeitslänge erreichte.

Den Gruppen 4 und 5 wurden Zähne zugeteilt, die bis zur Größe ISO 40 präpariert werden sollten. Ermittelt wurde dies, indem ein *Reamer* der Größe ISO 20 in den Wurzelkanal eingebracht wurde und initial die Arbeitslänge erreichte (Abbildung 3).

Je 15 Zähne mit der anzustrebenden Präparationsgröße ISO 25 wurden randomisiert auf die Gruppen 1, 2 und 3 aufgeteilt. Je 15 Zähne mit der anzustrebenden Präparationsgröße ISO 40 wurden randomisiert auf die Gruppen 4 und 5 aufgeteilt.

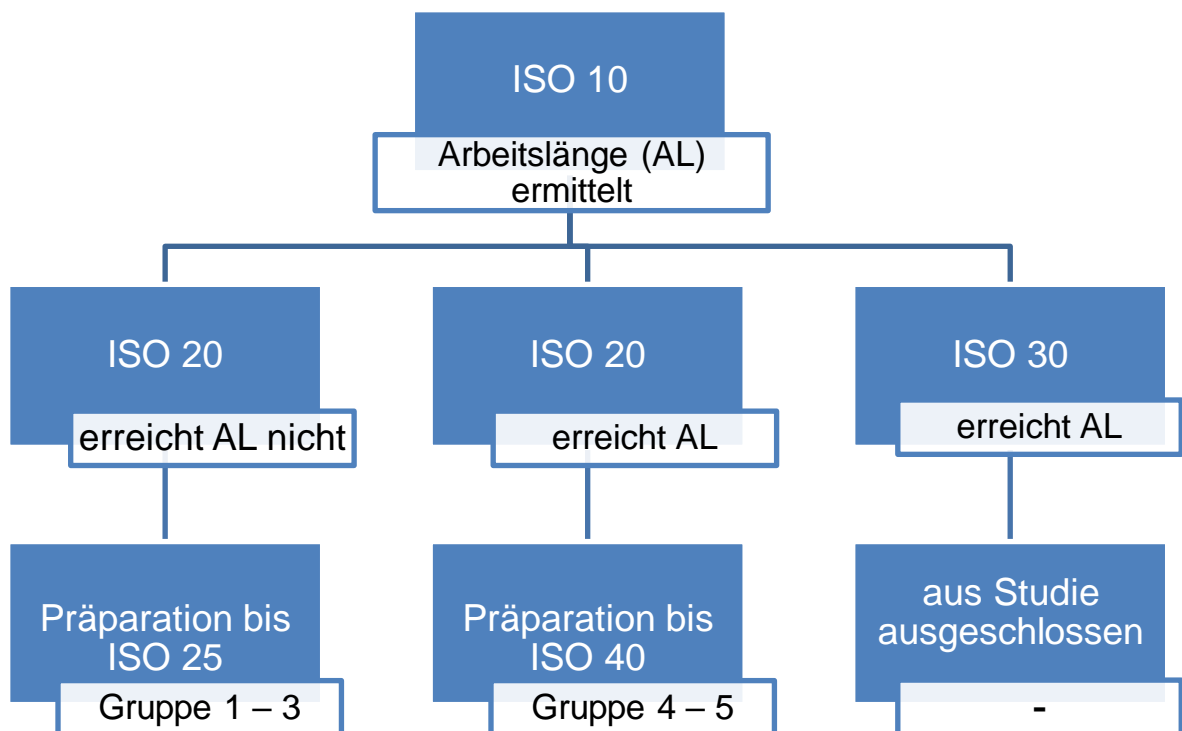


Abbildung 3: Ermittlung der Präparationsgrößen

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind Gruppeneinteilung, Präparationsinstrumente, Hersteller sowie Anzahl der Zähne dargestellt.

Tabelle 1: Gruppeneinteilung Präparationsgröße ISO 25

Gruppe	Instrumentengröße	Hersteller	Probe
1. Reciproc	25/.08 (SF)	VDW	15 Zähne
2. F6 SkyTaper	25/.06 (SF)	Brasseler	15 Zähne
3. Mtwo	25/.06 (MF)	VDW	15 Zähne

Tabelle 2: Gruppeneinteilung Präparationsgröße ISO 40

Gruppe	Instrumentengröße	Hersteller	Probe
4. Reciproc	40/.06 (SF)	VDW	15 Zähne
5. Mtwo	40/.04 (MF)	VDW	15 Zähne

2.3 Präparation

Der Wurzelkanal wurde mit Leitungswasser gespült, grobe Gewebereste wurden aus dem Wurzelkanal sowie der Pulpakammer mit Hilfe eines *Reamers* der Größe ISO 10 entfernt.

2.3.1 Reciproc 25/08 und Reciproc 40/06

Die Wurzelkanalpräparation mit dem Reciproc-System erfolgte nach Herstellerangaben. Der in dieser Studie verwendete Endodontie-Motor VDW Silver (VDW, München, Deutschland) wurde auf den Modus „*Reciproc all*“ gestellt. Die Reciproc-Feile wurde in pickenden Bewegungen eingesetzt. Nach jeweils drei „*picks*“ wurde der Wurzelkanal mit Leitungswasser aus einer 5 ml-Spritze sowie einer Spülkanüle VMK Endoneedle Dr. J. Buquet (Vedifar nv, Mechelen, Belgien) gespült, bis – unter dem Dentalmikroskop sichtbar – klare Flüssigkeit aus dem Wurzelkanal austrat.

Die Arbeitslänge wurde anschließend mit einem *Reamer* der Größe ISO 10 rekapituliert. Die Reciproc-Feile wurde in einem Schaumstoffständer gereinigt und unter dem Dentalmikroskop auf Beschädigungen untersucht. Bei erstmaligem Erreichen der zuvor abgemessenen Arbeitslänge stoppte die Präparation. Der Wurzelkanal wurde erneut gespült und rekapituliert. Danach

wurde der Wurzelkanal mit einer 17%igen Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) gespült, die mit einer EDDY-Polymerspitze (VDW, München, Deutschland) und einem Sonic Flex-Handstück (KaVo, Biberach, Deutschland) aktiviert wurde. Der Wurzelkanal wurde erneut mit Leitungswasser gespült und der Zahn in Leitungswasser gelagert.

Die folgende Darstellung (Abbildung 4) zeigt die Präparationsinstrumente des Systems Reciproc neben ihrem jeweiligen korrespondierenden Guttaperchastift.

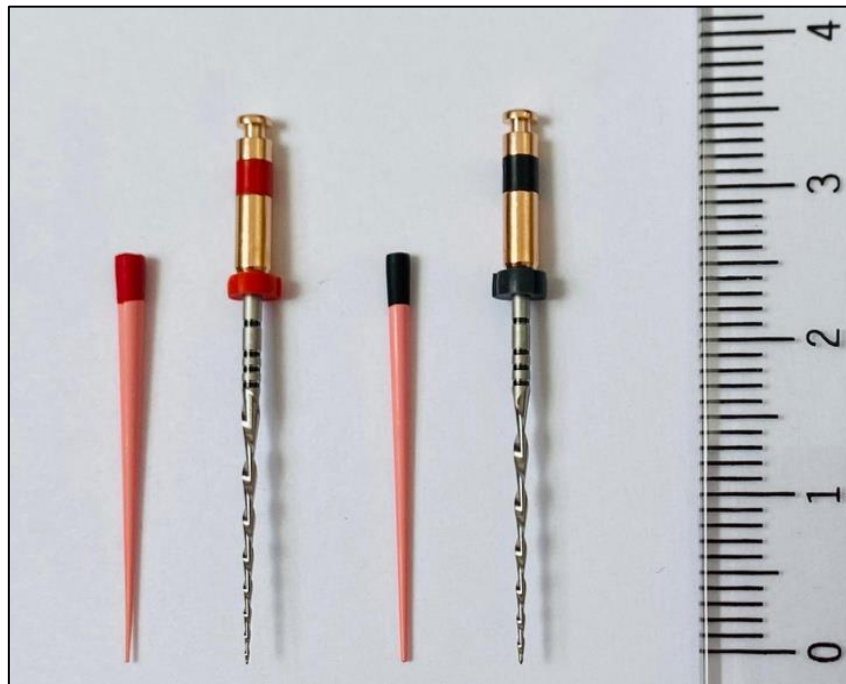


Abbildung 4: Reciproc-System

V. l. n. r.: Guttaperchastift korrespondierend zu R25, Instrument Reciproc R25, Guttaperchastift korrespondierend zu R40, Instrument Reciproc R40, Zentimeterlineal als Referenz.

2.3.2 Mtwo 25/06 und Mtwo 40/04

Die Wurzelkanalpräparation mit dem System Mtwo (VDW) erfolgte nach Herstellerangaben. Der in dieser Studie verwendete Endodontie-Motor VDW Silver (VDW) wurde auf den Modus „Mtwo“ gestellt. Die Feilen wurden nach Herstellerangaben rotierend ohne Wandkontakt in den Wurzelkanal eingebracht. Der Wurzelkanal wurde mit streichenden Bewegungen und mit leichtem Kontakt zur Wurzelkanalwand, gefolgt vom langsamen Vordringen nach apikal präpariert. Nach drei streichenden Bewegungen wurde dieser mit Leitungswasser aus einer 5 ml-Spritze und der Spülkanüle VMK Endoneedle Dr. J. Buquet (Veddefar nv)

gespült, bis unter dem Dentalmikroskop klare Flüssigkeit – aus dem Wurzelkanal austretend – zu sehen war. Das Instrument wurde in einem Schaumstoffständer gereinigt und unter dem Dentalmikroskop auf Beschädigungen untersucht. Der Wurzelkanal wurde anschließend mit einem *Reamer* der Größe ISO 10 rekapituliert. Beim erstmaligen Erreichen der zuvor abgemessenen Arbeitslänge wurde auf die nächstgrößere Feile gewechselt. Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen die Instrumentenabfolge des Mtwo-Systems.

Tabelle 3: Abfolge der Instrumente Mtwo bis 25/.06

10/.04
15/.05
20/.06
25/.06

Tabelle 4: Abfolge der Instrumente Mtwo bis 40/.04

30/.05
35/.04
40/.04

Die Präparation wurde gestoppt, wenn die Zielgröße die Arbeitslänge erreicht hatte. Anschließend wurde der Wurzelkanal erneut gespült und rekapituliert. Um den Wurzelkanal optimal zu reinigen, wurde mit einer 17%igen EDTA-Lösung gespült. Diese Spüllösung wurde mit Hilfe eines Sonic Flex-Handstücks (KaVo) und einer EDDY-Polymerspitze (VDW) aktiviert. Der Wurzelkanal wurde erneut mit Leitungswasser gespült und der Zahn in Leitungswasser gelagert. Abbildung 5 zeigt das Mtwo-System mit den beiden apikalen Meister-Feilen (MAF) (25/.06 und 40/.04) und ihren korrespondierenden Guttaperchastiften.

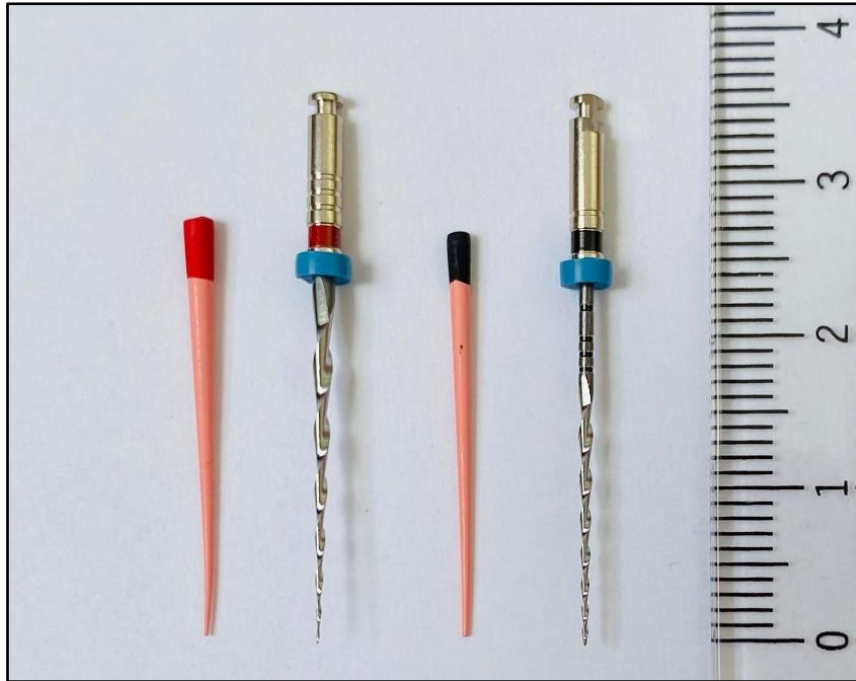


Abbildung 5: Mtwo-System

V. l. n. r.: Guttaperchastift korrespondierend zu Mtwo 25, Instrument Mtwo 25/06, Guttaperchastift korrespondierend zu Mtwo 40, Instrument Mtwo 40/04, Zentimeterlineal als Referenz.

2.3.3 F6 SkyTaper 25/06

Die Wurzelkanalpräparation mit dem System F6 SkyTaper (Brasseler) erfolgte nach Herstellerangaben. Der in dieser Studie verwendete Endodontie-Motor VDW Silver (VDW) wurde auf den Modus „*Dr.'s choice*“ gestellt. Nach Herstellerangaben wurde die Drehzahl auf 300 Umdrehungen pro Minute und 2,2 Newton/Zentimeter Drehmoment eingestellt. Die F6 SkyTaper-Feile wurde in pickenden Bewegungen eingesetzt. Nach jeweils drei „*picks*“ wurde der Wurzelkanal mit Leitungswasser aus einer 5 ml-Spritze und einer Spülkanüle VMK Endoneedle Dr. J. Buquet (Vedefar nv) gespült, bis – unter dem Dentalmikroskop zu sehen – klare Flüssigkeit aus dem Wurzelkanal austrat.

Der Wurzelkanal wurde anschließend mit einem *Reamer* der Größe ISO 10 rekapituliert. Die F6 SkyTaper-Feile wurde in einem Schaumstoffständer gereinigt und unter dem Dentalmikroskop auf Beschädigungen untersucht. Beim erstmaligen Erreichen der zuvor abgemessenen Arbeitslänge stoppte die Präparation. Der Wurzelkanal wurde erneut gespült und rekapituliert. Anschließend wurde der Kanal mit einer 17%igen EDTA-Lösung gespült und mit einer Eddy-Polymerspitze (VDW) und einem Sonic Flex-Handstück (KaVo)

aktiviert. Der Wurzelkanal wurde erneut mit Leitungswasser gespült und der Zahn in Leitungswasser gelagert. Die nachstehende Abbildung (Abbildung 6) zeigt das Präparationsinstrument des Systems F6 SkyTaper im Vergleich zum korrespondierenden Guttaperchastift.

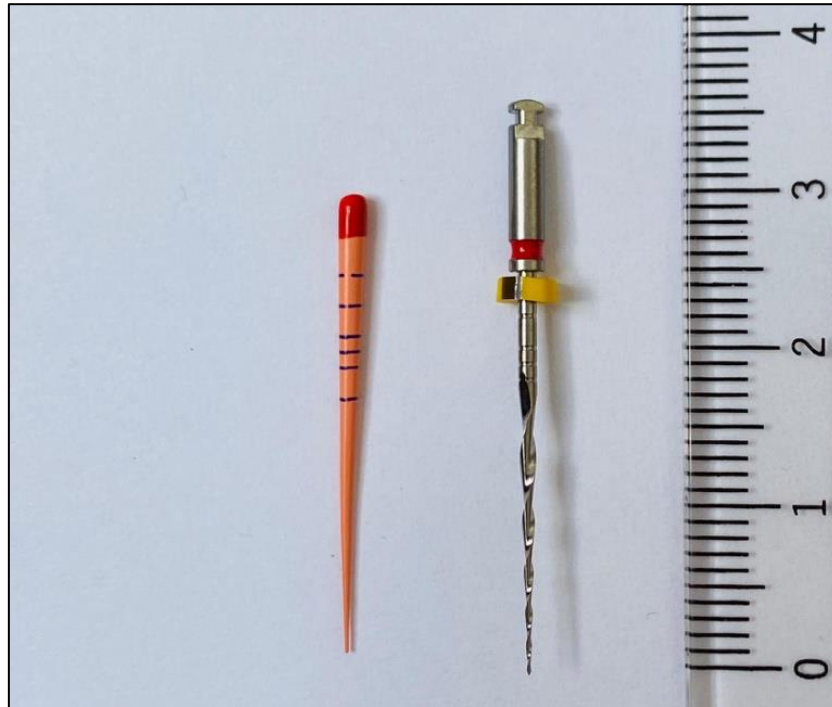


Abbildung 6: F6 SkyTaper-System

V. l. n. r.: Guttaperchastift korrespondierend zu F6 SkyTaper 25, F6 SkyTaper 25./06, Zentimeterlineal als Referenz.

2.4 Wurzelkanalfüllung

Der präparierte Zahn wurde mit Druckluft und den systemspezifischen Papierspitzen getrocknet, bis keine Feuchtigkeit an den Papierspitzen mehr zu sehen war. Anschließend wurde die Wurzelkanalfüllung mit der *Single-Cone*-Technik durchgeführt. Die dem jeweiligen Präparationssystem und der Präparationsgröße zugehörigen Guttaperchastifte wurden auf die zuvor festgelegte Arbeitslänge abgemessen und mit einer Pinzette eingebracht. Koronal wurde der Guttaperchastift mit einem über einer Flamme erwärmten Buchanan Hand *Plugger* (KERR, Biberach, Deutschland) abgetrennt. Der nun wurzelkanalgefüllte Zahn wurde anschließend direkt in das Mikro-CT gestellt. Auf die Verwendung eines *Sealers* wurde verzichtet, da die Studie nicht die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung, sondern die Passgenauigkeit der

Guttaperchastifte im Wurzelkanal – korrespondierend zur apikalen Meister-Feile – untersucht.

2.5 Mikro-CT-Scan

Für die Studie wurde der Mikro-CT SkyScan 1272 (Bruker) verwendet.

Dieser war mit dem leistungsstarken Dell Precision Tower-Computer 7910 (Dell, Round Rock, USA) und zwei Bildschirmen verbunden. Die Abbildung 7 zeigt den Mikro-CT und den Arbeitsplatz, an dem die Daten ausgewertet wurden. Der Mikro-CT steht auf mit Luft gefüllten Standfüßen, die kleine Vibrationen oder Erschütterungen abfedern sollen, auf einem stabilen Tisch in einer geschützten Ecke eines Laborraums.



Abbildung 7: Mikro-CT-Arbeitsplatz

V. l. n. r.: Mikro-CT SkyScan 1272 und Arbeitsplatz mit zwei Dell-Computerbildschirmen. Diese sind mit dem Dell Precision Tower-Computer 7910 verbunden. An diesem Arbeitsplatz fanden das Scannen der Zähne sowie die Datenauswertung statt.

Nachdem die Software SkyScan 1272 (Bruker) geöffnet und die Röntgenquelle gestartet worden war, musste diese sich 15 Minuten lang aufwärmen. Die Zähne wurden in einer transparenten Röhre mit Schaumstoff fixiert und einzeln in der Halterung des Mikro-CTs platziert (Abbildung 8). Durch die Fixierung im Schaumstoff veränderte der Zahn seine Position nicht und konnte lagestabil gescannt werden. Lediglich die Röhre, in die der Zahn eingebettet wurde, drehte sich im Mikro-CT. Die Zeit, um einen Zahn zu scannen, betrug ca. 100 Minuten.

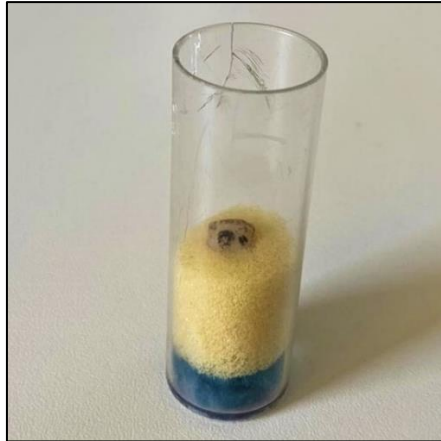


Abbildung 8: Zahn in Schaumstoff eingebettet

Der Zahn wurde mit der Wurzelspitze nach unten in die Röhre eingelassen. Er steht lagestabil im gelben Schaumstoff und hat durch den blauen Schaumstoff keinen Kontakt zum Boden der Kunststoffröhre. Aus dem Schaumstoff herausragend ist die Inzisalkante des Zahns zu erkennen, der auf der Labialseite mit schwarzem Stift nummeriert ist.

Mit der Funktion „grab“ wurde der Zahn in die gewünschte Position gefahren, um diesen optimal und ganzheitlich scannen zu können. Vor dem Scanvorgang wurden alle Einstellungen und ein Speicherort für die Datei festgelegt.

Folgende Einstellungen wurden bei allen Scans standardisiert vorgenommen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Einstellung des Mikro-CTs

Elektrische Spannung [kV]	100
Elektrische Stromstärke [μ A]	100
Auflösung [Pixel]	2452 x 1640
Pixelgröße [μ m]	10.9
<i>Rotation step</i> [°]	0.400
<i>Averaging</i> [frames]	3
Filter	0,11 mm Kupferfilter
Scan-Zeit [min]	100

2.6 Scananalyse

Die aus dem Mikro-CT erhaltenen Datensätze wurden mit der Software NRecon (Bruker, Billerica, USA) geöffnet. Diese wandelte die einzelnen Bilder des Scanvorgangs in Schnittbilder mit Hilfe des Feldkamp-Algorithmus um. In Abbildung 9 ist ein horizontaler Schnitt durch einen Zahn zu sehen, der mit NRecon errechnet wurde.

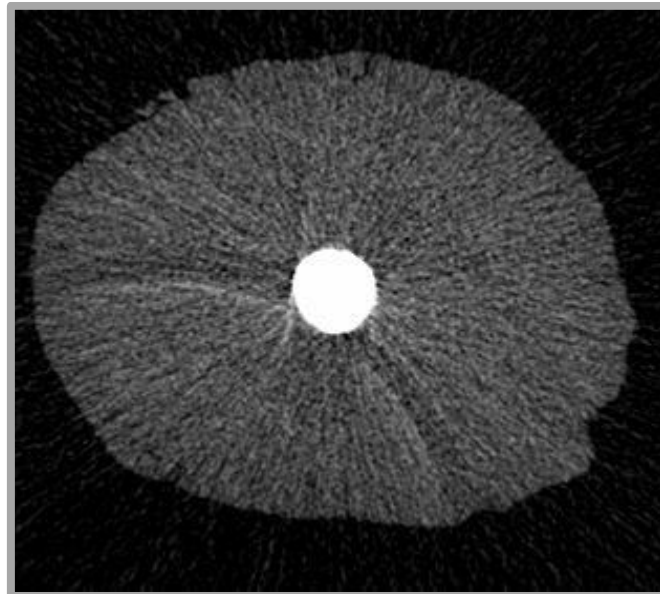


Abbildung 9: Mikro-CT-Aufnahme

Mikro-CT-Aufnahme eines Zahns nach Wurzelkanalobturation. Zu sehen ist ein horizontaler Schnitt durch die Zahnwurzel. Der weiße Kreis mittig zeigt den Guttaperchastift. Zirkulär um den Guttaperchastift sind minimale Porositäten (schwarz) zu sehen.

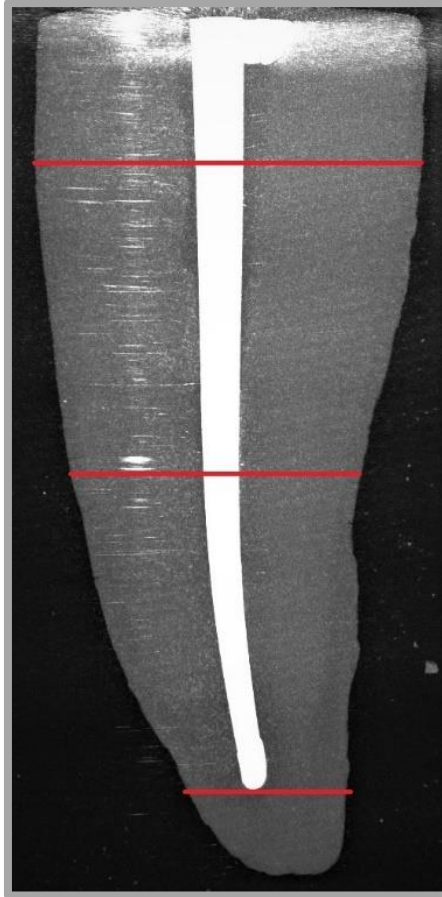
Die durch das Drehen während des Scanvorgangs entstandenen Datenlücken wurden ebenfalls mit NRecon geschlossen. Als Erstes wurde der Bereich definiert, in welchem die Rekonstruktion und die spätere Datenauswertung angewendet werden sollten. Dazu wurden der obere und der untere Bereich des Zahns markiert. Anschließend wurden standardisiert für alle Zähne – abgesehen von der *Misalignment compensation* – die gleichen Einstellungen gewählt und der Rekonstruktionsvorgang wurde gestartet. Die *Misalignment compensation* musste bei jedem Zahn individuell eingestellt werden. NRecon schlug dafür individuell passende Werte vor, die vom Operator stets übernommen wurden.

Tabelle 6 stellt die Einstellungen der Software NRecon gelistet dar. Die Speicherung der Schnittbilder erfolgte in einem neu angelegten Dateiordner auf der Festplatte des Computers.

Tabelle 6: Einstellung NRecon

<i>Histogram</i>	0 – 0,09
<i>Beam-hardening correction</i>	50
<i>Ring artifact reduction</i>	20
<i>Smoothing</i>	0
<i>Misalignment compensation</i>	individuell vom Computer gesteuert

Mit der Software CT-analyser (Bruker, Billerica, USA) wurden die zuvor rekonstruierten Daten für die Datenanalyse geöffnet. Zuerst wurden die Schnittbilder des Zahns gesichtet. Gesucht wurde das Schnittbild, an dem der Wurzelkanal dem Durchmesser der Spitze der MAF entsprach. Hierzu wurden die Schnittbilder von koronal nach apikal durchfahren und mit einem im Programm enthaltenen Lineal vermessen. In den Gruppen 1, 2 und 3 wurde apikal nach einem Guttaperchastift-Durchmesser von 0,25 mm, in den Gruppen 4 und 5 nach 0,40 mm gesucht. Das ermittelte Schnittbild wurde notiert und als Schnittebene 0 mm definiert. Von dort aus wurden koronal, entlang des Guttaperchastifts, Distanzen von 4 mm und 8 mm digital gemessen und die Werte notiert. Abbildung 10 zeigt anhand eines Mikro-CT-Scans die Schnittebenen in der Außenansicht. Abbildung 11 zeigt die Auswahl der drei analysierten Schnittebenen im horizontalen Schnitt.

**Abbildung 10: Außenansicht Schnittebenen**

Die Abbildung zeigt einen Mikro-CT-Scan eines Zahns, der mit einem Guttaperchastift gefüllt wurde (weißer Stift). Zu sehen ist die Außenansicht, an der exemplarisch durch die roten Linien die Schnittebenen verdeutlicht werden. Von unten nach oben folgen die Schnittebenen apikal 0 mm, 4 mm und 8 mm.

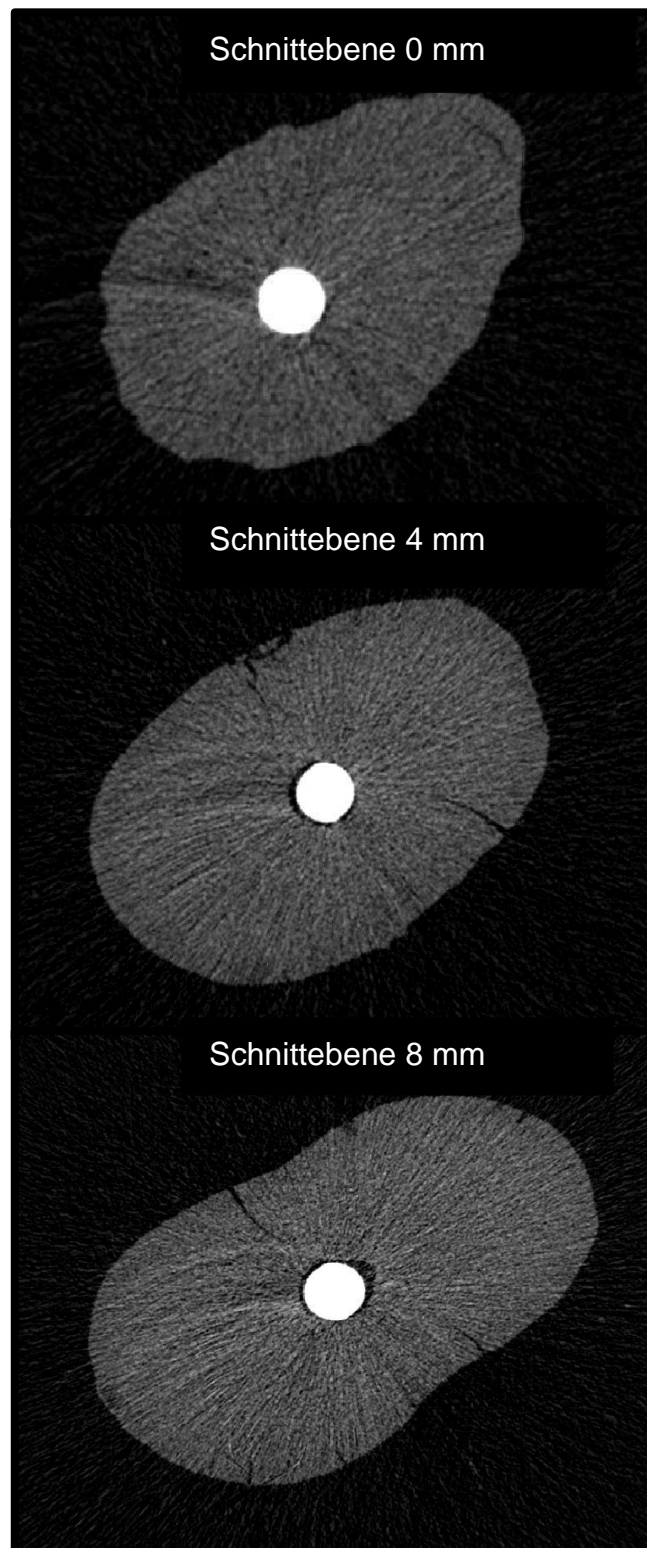


Abbildung 11: Drei Schnittebenen im Mikro-CT

Die Abbildung zeigt die drei untersuchten horizontalen Schnittebenen bei 0 mm, 4 mm und 8 mm. Es handelt sich hierbei um Scans eines Zahns aus der Gruppe 4 (Reciproc 40/.06). Bei Schnittebene 0 mm ist der Durchmesser des Guttaperchastifts (weiß) 0,40 mm groß. Zirkulär um den weißen Guttaperchastift sind schwarz die Porositäten sichtbar.

Nachdem die Schnittebenen definiert worden waren, wurde eine „*region of interest*“, von Schnittebene 0 mm bis Schnittebene 8 mm, um den Wurzelkanal definiert. Durch Erstellen eines binären Schwarzweißbildes und Einstellen der Kontrastwerte konnten sowohl die Struktur mit der geringsten Röntgenopazität (Luft) als auch die Struktur mit der höchsten Röntgenopazität (Guttaperchastift) einzeln sichtbar gemacht werden (Abbildung 12 und Abbildung 13).

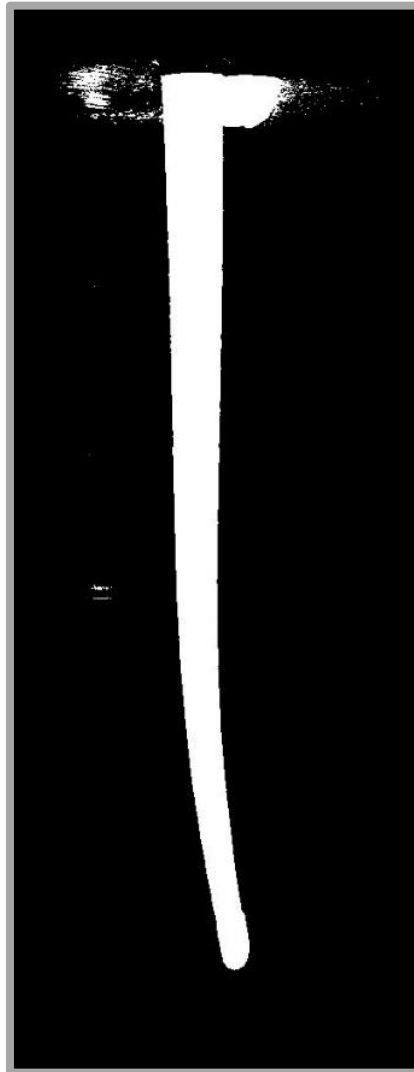


Abbildung 12: Binäre Darstellung: Guttaperchastift

Die Abbildung zeigt ein binäres Mikro-CT-Bild. Die Objekte mit der höchsten Röntgenopazität werden hier weiß dargestellt, in diesem Fall ein Guttaperchastift. Die Zahnwurzel wurde vom Computer herausgerechnet und ist nicht mehr zu erkennen.



Abbildung 13: Binäre Darstellung: Schnittebene

Die Abbildung zeigt ein binäres Mikro-CT-Bild im horizontalen Schnitt. Der Zahn ist hier weiß dargestellt. In der Mitte des Bildes ist eine schwarze, fast geschlossene zirkuläre Struktur zu erkennen, die einen weißen Kreis umgibt. Die schwarzen Strukturen innerhalb des Zahns sind Porositäten, die weißen Strukturen Zahnhartsubstanz sowie der mittige Guttaperchastift.

Durch eine 3D-Analyse wurden die Porositäten zwischen Guttaperchastift und Wurzelkanalwand in Prozent sowie in Kubikmillimeter ermittelt. Als Porosität wird das Hohlraumvolumen in Bezug zum Gesamtvolumen gesehen. Die 3D-Analyse wurde pro Zahn an jeder der drei Schnittebenen sowie für die Strecke von Schnittebene 0 mm bis Schnittebene 8 mm durchgeführt. Abbildung 14 verdeutlicht das Vorhandensein von Porositäten.

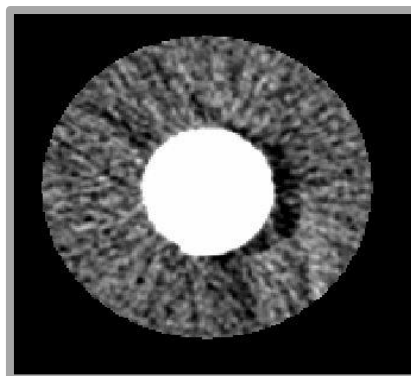


Abbildung 14: Nahaufnahme Mikro-CT

Die Abbildung zeigt die „*region of interest*“ eines horizontalen Mikro-CT-Schnittbildes. Mittig ist der weiße Guttaperchastift zu sehen. Rechtsseitig des Guttaperchastifts sind halbmondförmig (schwarz) Porositäten (Luft) zwischen Wurzelkanalwand und Guttaperchastift zu erkennen.

2.7 Statistische Auswertung

Die gewonnenen Datensätze wurden mit der Software SPSS Statistics Version 24.0 (IBM, Armonk, USA) statistisch ausgewertet. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Statistik der Universitätsmedizin Göttingen wurde die Methode zur statistischen Datenauswertung abgestimmt. Zuerst wurden die Messwerte der drei Schnittebenen sowie der Strecke von 0 mm bis 8 mm von allen 15 Versuchszähnen jeder der 5 Gruppen in eine Tabelle eingetragen. Die Porositäten wurden in Prozent und im mm^3 angegeben. Anhand des Shapiro-Wilk-Tests sowie durch graphische Quantil-Quantil-Diagramme (Q-Q-Diagramm) wurden die Messwerte auf ihre Häufigkeitsverteilung untersucht. Abbildung 15 zeigt beispielhaft ein Q-Q-Diagramm.

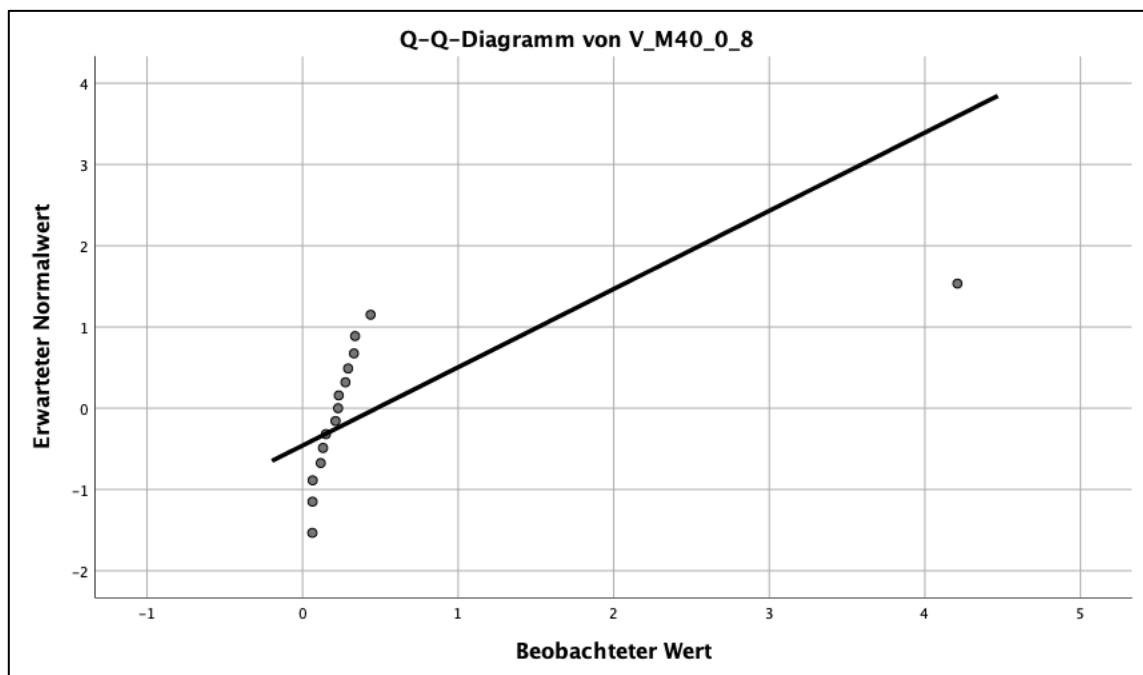


Abbildung 15: Q-Q-Diagramm

Die Abbildung zeigt ein Q-Q-Diagramm. Die einzelnen Punkte stellen die Messwerte der 15 Zähne im Untersuchungsbereich des Systems Mtwo 40/04 im Bereich von Schnittebene 0 mm bis 8 mm dar. Die schwarze diagonale Linie zeigt die Normalverteilung der Daten. Würden die Punkte nah an oder auf der Linie liegen, so würde eine Normalverteilung der Werte bestehen. Dies ist in diesem Beispiel nicht der Fall.

Die Nullhypothese des Shapiro-Wilk-Tests nimmt die Normalverteilung der Grundgesamtheit an, die Alternativhypothese dagegen keine Normalverteilung der Grundgesamtheit. Die überwiegende Mehrheit der Datensätze resultierte in der Alternativhypothese. Daher wurde einheitlich ein nicht parametrischer Test zum Vergleich zweier unabhängiger Stichproben gewählt.

Um die Unterschiede zwischen den Gruppen bewerten zu können, wurde der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde standardisiert mit $\alpha = 0,05$ festgelegt. Die Nullhypothese des Mann-Whitney-U-Tests nimmt keinen signifikanten Unterschied der zu vergleichenden Gruppen an ($p > 0,05$). Die Alternativhypothese des Mann-Whitney-U-Tests nimmt einen signifikanten Unterschied der zu vergleichenden Gruppen an ($p < 0,05$). Kommt die Alternativhypothese $p < 0,05$ zum Tragen, so wird angenommen, dass der Unterschied zwischen den Gruppen nicht zufällig ist, sondern ein signifikanter Unterschied besteht.

Es wurden die beiden *Single-File*-Gruppen der Größe ISO 25 jeweils mit der *Multiple-Files*-Gruppe der Größe ISO 25 verglichen.

Des Weiteren wurde die *Single-File*-Gruppe der Größe ISO 40 der *Multiple-Files*-Gruppe der Größe ISO 40 gegenübergestellt. Tabelle 7 zeigt, welche Gruppen mit welchem Präparationssystem und welcher Präparationsgröße verglichen wurden.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Gruppen

Gruppe 1:	Reciproc 25/.08 (SF)	-	Gruppe 3:	Mtwo 25/.06 (MF)
Gruppe 2:	F6 SkyTaper 25/.06 (SF)	-	Gruppe 3:	Mtwo 25/.06 (MF)
Gruppe 4:	Reciproc 40/.06 (SF)	-	Gruppe 5:	Mtwo 40/.04 (MF)

Auf eine statistische Korrektur der Alphafehler-Kumulierung für multiples Testen wurde bewusst verzichtet. Die Adjustierung der Signifikanzwerte würde bei diesem explorativen Vorgehen weniger aufschlussreiche Tendenzen bei den Gruppenvergleichen aufzeigen. Unterschiede zwischen den Gruppen würden aufgrund des konservativeren Signifikanzniveaus weniger deutlich erscheinen.

3 Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse zeigen die Porositäten der ohne *Sealer* gefüllten Wurzelkanäle. Die Werte geben an, wie viel Luft (in Prozent) sich im Verhältnis zum Kanalvolumen in einer Schnittebene befindet. Je kleiner die prozentualen Werte bzw. je kleiner die Werte der Volumina in mm³ ausfallen, desto weniger Luft befindet sich zwischen Wurzelkanalwand und Guttaperchastift. Für eine qualitativ hochwertige Wurzelkanalfüllung sollten möglichst kleine Porositätswerte vorliegen.

3.1.1 Vergleich Gruppe 1 vs. Gruppe 3

Der Vergleich der Gruppe 1 Reciproc (25/.08) mit der Gruppe 3 Mtwo (25/.06) vergleicht ein *Single-File-System* mit einem *Multiple-Files-System*. Beide Instrumentensysteme wiesen an der apikalen Master-Feile einen Durchmesser von 0,25 mm auf. Die Konizität des Reciproc-Instruments lag bei den ersten 3 mm bei 8%, danach folgte eine konstante Steigung von 4%. Das *Multiple-Files-System* benötigte zur Präparation vier Instrumente, das letzte wies eine konstante Steigung von sechs Prozent auf. Die Vorgehensweise bei der Wurzelkanalobturation war die *Single-Cone-Technik*. Die jeweils 15 Zähne beider Gruppen wurden an identischen Schnittebenen verglichen. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der prozentualen Menge an Porositäten im Vergleich der drei Schnittebenen sowie in der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm. Tabelle 8 zeigt die Schnittebenen, die verglichen wurden, die p-Werte und den Vergleich der Mittelwerte beider Gruppen.

Tabelle 8: Mann-Whitney-U-Test: Gruppe 1 vs. Gruppe 3

Schnittebene 0 mm	p = 0,870	nicht signifikant
Schnittebene 4 mm	p = 0,148	nicht signifikant
Schnittebene 8 mm	p = 0,074	nicht signifikant
Strecke 0 – 8 mm	p = 0,744	nicht signifikant

Die beiden Systeme wiesen keinen statistisch signifikanten Unterschied im Volumen der Porositäten auf. Es sind jedoch Unterschiede in Bezug auf die Maximal- bzw. Minimalwerte zu erkennen. In Schnittebene 0 mm wurde in Gruppe 1 in einem Wurzelkanal gar keine Porosität festgestellt. Dies spricht für

einen äußerst dicht gefüllten Wurzelkanal und somit für eine sehr hochwertige Obturation. Besonders apikal ist eine hohe Dichtigkeit sehr entscheidend. In Gruppe 3 betrug der Minimalwert des Porositätenenvolumens 0,18%. Die Mittelwerte zeigten keine großen Diskrepanzen und betrugen 3,64% (Gruppe 1) und 3,78% (Gruppe 3). Gleichermaßen ähnelten sich die Maximalwerte mit 10,65% (Gruppe 1) zu 10,60% (Gruppe 3). Um eine Vorstellung der absoluten Werte zu erhalten, wurden die Porositäten auch als Volumina in Kubikmillimeter erhoben. In Gruppe 1 betrug der maximal gemessene Wert der Porositäten in Schnittebene 0 mm $0,00039 \text{ mm}^3$, in Gruppe 3 hingegen $0,00057 \text{ mm}^3$.

In Schnittebene 4 mm lag bei Gruppe 3 einmalig gar keine Porosität vor, in Gruppe 1 hingegen betrug der Minimalwert 0,063%. Der Mittelwert war in Gruppe 3 kleiner als in Gruppe 1. Auch der maximale Wert der Gruppe 3 lag unter dem Vergleichswert von Gruppe 1.

Besonders auffällig war in Schnittebene 8 mm, dass der Maximalwert eines Ausreißers dreimal höher war als der der Gruppe 1. Es wurde ein Maximalwert von 27,73% (Gruppe 3) im Vergleich zu 9,38% (Gruppe 1) ermittelt. Bei der Strecke von 0 mm bis 8 mm war der Maximalwert in Gruppe 3 doppelt so groß wie in Gruppe 1 und lag bei $0,41 \text{ mm}^3$ im Vergleich zu $0,83 \text{ mm}^3$ bei Gruppe 3.

Abbildung 16 veranschaulicht anhand eines Boxplot-Diagramms den Vergleich der beiden Gruppen jeweils an den drei Schnittebenen sowie der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm.

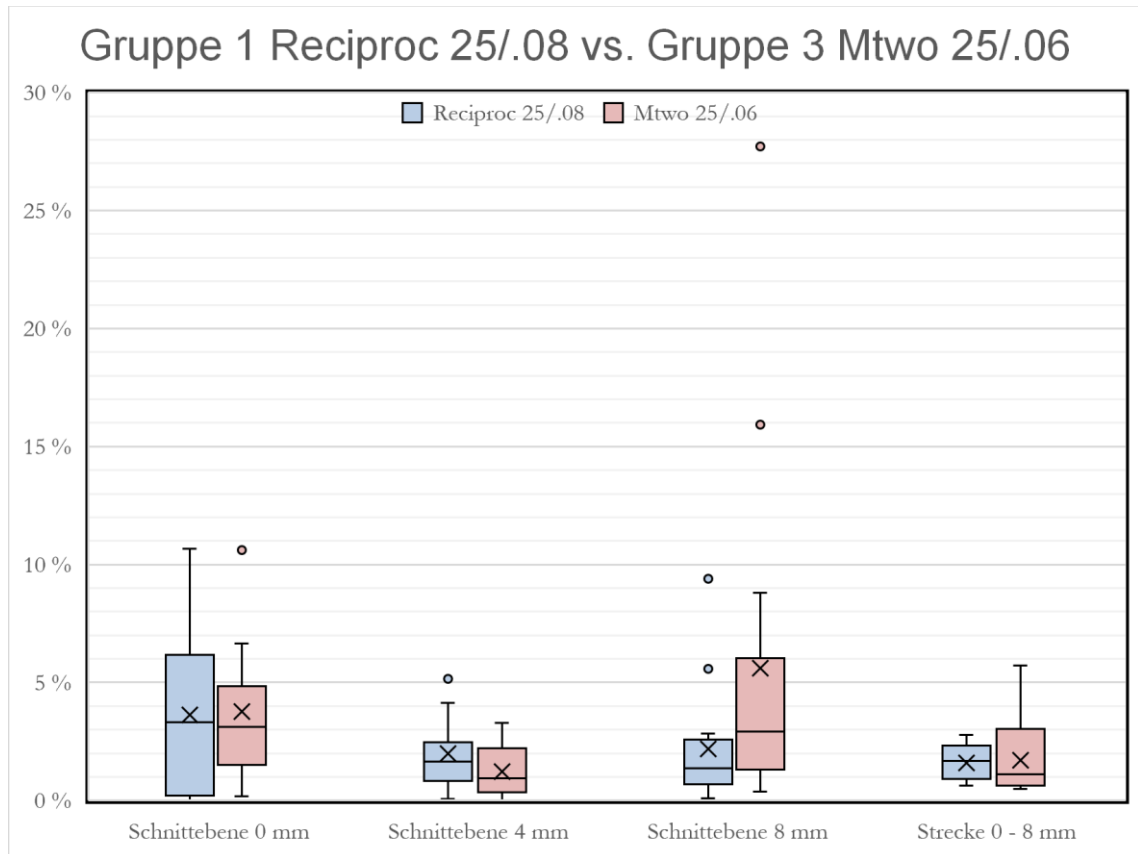


Abbildung 16: Boxplot-Diagramm: Vergleich Gruppe 1 vs. Gruppe 3

Die Abbildung zeigt ein Boxplot-Diagramm. Die y-Achse gibt die Porositäten in Prozent an. Auf der x-Achse sind die drei Schnittebenen sowie die Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm aufgezeigt. Blau wird das System Reciproc 25/.08, rot das System Mtwo 25/.06 dargestellt. Die jeweils farbige Box zeigt den Interquartilsabstand zwischen dem ersten und dem dritten Quartil. Die in der Box befindliche horizontale Linie veranschaulicht den Median, das Kreuz den Mittelwert. Die Antennen zeigen nach oben die Maximal- und nach unten die Minimalwerte an. Die Punkte stellen Ausreißer dar, die den 1,5-fachen Interquartilsabstand überschritten haben.

Tabelle 9 zeigt die Schnittebenen, die Mittelwerte, Maximum und Minimum sowie die Standardabweichung. Der obere Teil der Tabelle stellt die Werte in Prozent, der unterer Teil die Absolutwerte in Kubikmillimetern dar.

Tabelle 9: Gegenüberstellung: Gruppe 1 vs. Gruppe 3

Gruppe 1 - Gruppe 3 (Angaben in %)				
	Reciproc 25/.08		Mtwo 25/.06	
Schnitt- ebene	Mittelwert (min. & max.)	Standard- abweichung	Mittelwert (min. & max.)	Standard- abweichung
0 mm	3,64 (0 – 10,65)	± 3,12	3,78 (0,18 – 10,60)	± 2,61
4 mm	1,98 (0,063 – 5,19)	±1,63	1,23 (0 – 3,30)	± 1,09
8 mm	2,18 (0,091 – 9,38)	± 2,41	5,62 (0,37 – 27,73)	± 7,31
0 – 8 mm	1,58 (0,64 – 2,80)	± 0,72	1,70 (0,48 – 5,72)	± 1,48
Gruppe 1 - Gruppe 3 (Angaben in mm ³)				
0 mm	0,00017 (0 – 0,00039)	± 0,00014	0,00029 (0,000011 – 0,00057)	± 0,00016
4 mm	0,00029 (0,0000079 – 0,0011)	± 0,00029	0,00027 (0 – 0,0011)	± 0,00034
8 mm	0,00068 (0,000019 – 0,0035)	± 0,0011	0,0015 (0,00012 – 0,0056)	± 0,0018
0 – 8 mm	0,17 (0,068 – 0,41)	± 0,12	0,26 (0,052 – 0,83)	± 0,28

3.1.2 Vergleich Gruppe 2 vs. Gruppe 3

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Vergleichs des *Single-File-Systems* der Gruppe 2 – F6 SkyTaper (25/.06) – mit denen des *Multiple-Files-Systems* Gruppe 3 – Mtwo (25/.06) – gezeigt. Beide Instrumente weisen einen apikalen Durchmesser von 0,25 mm an der Instrumentenspitze der apikalen Meister-Feile auf. Auch die Konizität ist mit 6% Steigung identisch. Wie auch beim vorherigen Gruppenvergleich wurden alle Zähne mit der *Single-Cone-Technik* gefüllt. Der Vergleich der Mittelwerte beider Gruppen zeigte keine signifikanten Unterschiede des Porositätensvolumens an den drei Schnittebenen sowie der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm (Tabelle 10).

Tabelle 10: Mann-Whitney-U-Test: Gruppe 2 vs. Gruppe 3

Schnittebene 0 mm	p = 0,567	nicht signifikant
Schnittebene 4 mm	p = 0,967	nicht signifikant
Schnittebene 8 mm	p = 0,267	nicht signifikant
Strecke 0 – 8 mm	p = 0,233	nicht signifikant

In Gruppe 2 zeigte sich bei Schnittebene 0 mm ein Minimalwert von 0% Porosität im Vergleich zu 0,18% in Gruppe 3. Das bedeutet, dass der Guttaperchastift in Gruppe 2 den Wurzelkanal gänzlich ausfüllte. Dies spricht für eine sehr gute Passform des Guttaperchastifts und eine hochwertige Wurzelkanalobturation in dieser Schnittebene. Der Mittelwert der Volumina betrug in der zweiten Gruppe 0,00017 mm³ – im Vergleich zu 0,00029 mm³ bei Gruppe 3.

In Schnittebene 4 mm zeigten beide Gruppen jeweils einen Minimalwert von 0% Porosität auf. Der Maximalwert der Gruppe 2 war mit 7,10% mehr als doppelt so hoch wie in Gruppe 3 mit 3,30%.

In Schnittebene 8 mm zeigten beide Gruppen große Ausreißer von 18,55% maximal in Gruppe 2 im Vergleich zu Gruppe 3 mit 27,73%. Die Mittelwerte der Volumina lagen bei 0,00082 mm³ (Gruppe 2) und 0,0015 mm³ (Gruppe 3).

Die Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm zeigte maximale Volumenwerte in Gruppe 2 von 0,54 mm³ und in Gruppe 3 von 0,83 mm³. Die Mittelwerte beider Gruppen ähnelten sich und betrugen 1,72% (Gruppe 2) und 1,70% (Gruppe 3). Das folgende Boxplot-Diagramm (Abbildung 17) veranschaulicht graphisch den Vergleich der beiden Gruppen. Die dargestellten Werte sind in Prozent angegeben.

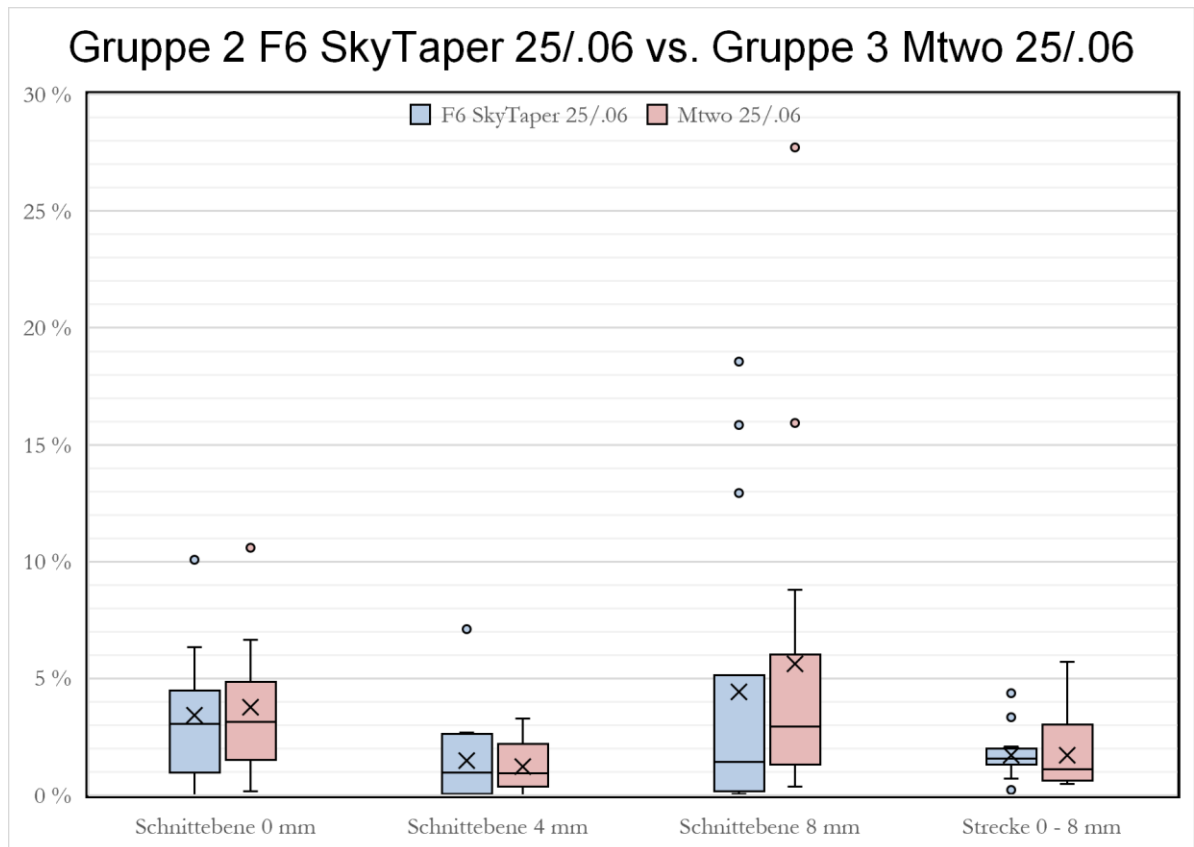


Abbildung 17: Boxplot-Diagramm: Vergleich Gruppe 2 vs. Gruppe 3

Die Abbildung zeigt ein Boxplot-Diagramm. Die y-Achse gibt die Porositäten in Prozent an. Auf der x-Achse sind die drei Schnittebenen sowie die Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm aufgezeigt. Blau wird das System F6 SkyTaper 25/.06, rot das System Mtwo 25/.06 dargestellt. Die jeweils farbige Box zeigt den Interquartilsabstand zwischen dem ersten und dem dritten Quartil. Die in der Box befindliche horizontale Linie veranschaulicht den Median, das Kreuz den Mittelwert. Die Antennen zeigen nach oben die Maximal- und nach unten die Minimalwerte an. Die Punkte stellen Ausreißer dar, die den 1,5-fachen Interquartilsabstand überschritten haben.

Tabelle 11 zeigt den Vergleich von Gruppe 2 mit Gruppe 3. Es werden die Schnittebenen, die Mittelwerte, Maximum und Minimum sowie die Standardabweichung dargestellt. Der obere Teil der Tabelle gibt die Werte in Prozent, der untere Teil die Absolutwerte in Kubikmillimetern wieder.

Tabelle 11: Gegenüberstellung: Gruppe 2 vs. Gruppe 3

Gruppe 2 - Gruppe 3 (Angaben in %)				
	F6 SkyTaper		Mtwo 25/.06	
Schnitt-ebene	Mittelwert (min. & max.)	Standard- abweichung	Mittelwert (min. & max.)	Standard- abweichung
0 mm	3,42 (0 – 10,08)	± 2,68	3,78 (0,18 – 10,60)	± 2,61
4 mm	1,47 (0 – 7,10)	± 1,83	1,23 (0 – 3,30)	± 1,09
8 mm	4,43 (0,046 – 18,55)	± 6,16	5,62 (0,37 – 27,73)	± 7,31
0 – 8 mm	1,72 (0,23 – 4,36)	± 1,02	1,70 (0,48 – 5,72)	± 1,48
Gruppe 2 - Gruppe 3 (Angaben in mm ³)				
0 mm	0,00017 (0 – 0,00037)	± 0,00012	0,00029 (0,000011 – 0,00057)	± 0,00016
4 mm	0,00018 (0 – 0,00092)	± 0,00024	0,00027 (0 – 0,0011)	± 0,00034
8 mm	0,00082 (0,0000075 – 0,0028)	± 0,0011	0,0015 (0,00012 – 0,0056)	± 0,0018
0 – 8 mm	0,16 (0,016 – 0,54)	± 0,14	0,26 (0,052 – 0,83)	± 0,28

3.1.3 Vergleich Gruppe 4 vs. Gruppe 5

Verglichen wurde die Gruppe 4 (Reciproc 40/.06) mit der Gruppe 5 (Mtwo 40/.04). Es handelt sich wiederum um einen Vergleich eines *Single-File*-Systems mit einem *Multiple-Files*-System. Die apikale Präparationsgröße der MAF lag in beiden Gruppen bei 0,40 mm. Das Instrument der Gruppe 4 wies dabei auf den ersten 3 mm eine Steigung von 6%, nachfolgend konstant eine 4% Steigung auf. Die MAF der Gruppe 5 hingegen wies eine Steigung von konstanten 4% auf. Die Zähne beider Gruppen wurden mit der *Single-Cone*-Technik gefüllt. In den Schnittebenen 0 mm und 4 mm waren keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen zu erkennen. In Schnittebene 8 mm sowie der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm unterschieden sich die Gruppen signifikant voneinander. Es zeigten sich signifikant weniger Porositäten in Gruppe 4 als in Gruppe 5, was für eine qualitativ höherwertigere Wurzelkanalobturation spricht. Die folgende Tabelle zeigt die verglichenen Schnittebenen und die ermittelten Signifikanzen (Tabelle 12).

Tabelle 12: Mann-Whitney-U-Test: Gruppe 4 vs. Gruppe 5

Schnittebene 0 mm	p = 0,090	nicht signifikant
Schnittebene 4 mm	p = 0,806	nicht signifikant
Schnittebene 8 mm	p = 0,001	signifikant
Strecke 0 – 8 mm	p = 0,004	signifikant

In Schnittebene 0 mm zeigten beide Gruppen einen Minimalwert von 0% Porosität. Der prozentuale Mittelwert lag bei 0,92% (Gruppe 4) und 3,06% bei Gruppe 5. Der Maximalwert betrug bei der fünften Gruppe 11,48%, war somit mehr als dreimal so groß wie bei Gruppe 4 mit 3,19%.

Gruppe 5 zeigte in Schnittebene 4 mm ebenfalls einen Minimalwert von 0% Porosität, Gruppe 4 hingegen von 0,45%. Die Maximalwerte lagen bei 3,36% (Gruppe 4) und 8,91% (Gruppe 5).

Auch in Schnittebene 8 mm zeigten sich bei Gruppe 5 größere Maximalwerte mit 25,91% als in Gruppe 4 mit 8,53%. Die Mittelwerte der Volumina betrugen 0,00061 mm³ (Gruppe 4) und 0,0011 mm³ (Gruppe 5). Wie in Schnittebene 8 mm unterschieden sich auch die Mittelwerte der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm signifikant voneinander.

Die Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm zeigte maximale Werte von 0,30 mm³ in Gruppe 4 im Vergleich zu 4,21 mm³ in Gruppe 5. Die Minimalwerte an Porosität ähnelten sich jedoch mit 0,056 mm³ (Gruppe 4) und 0,063mm³ (Gruppe 5). Gruppe 5 zeigte deutlich größere Ausreißer als Gruppe 4.

Das folgende Boxplot-Diagramm (Abbildung 18) veranschaulicht graphisch die ermittelten Werte in Prozent und vergleicht die beiden Gruppen miteinander.

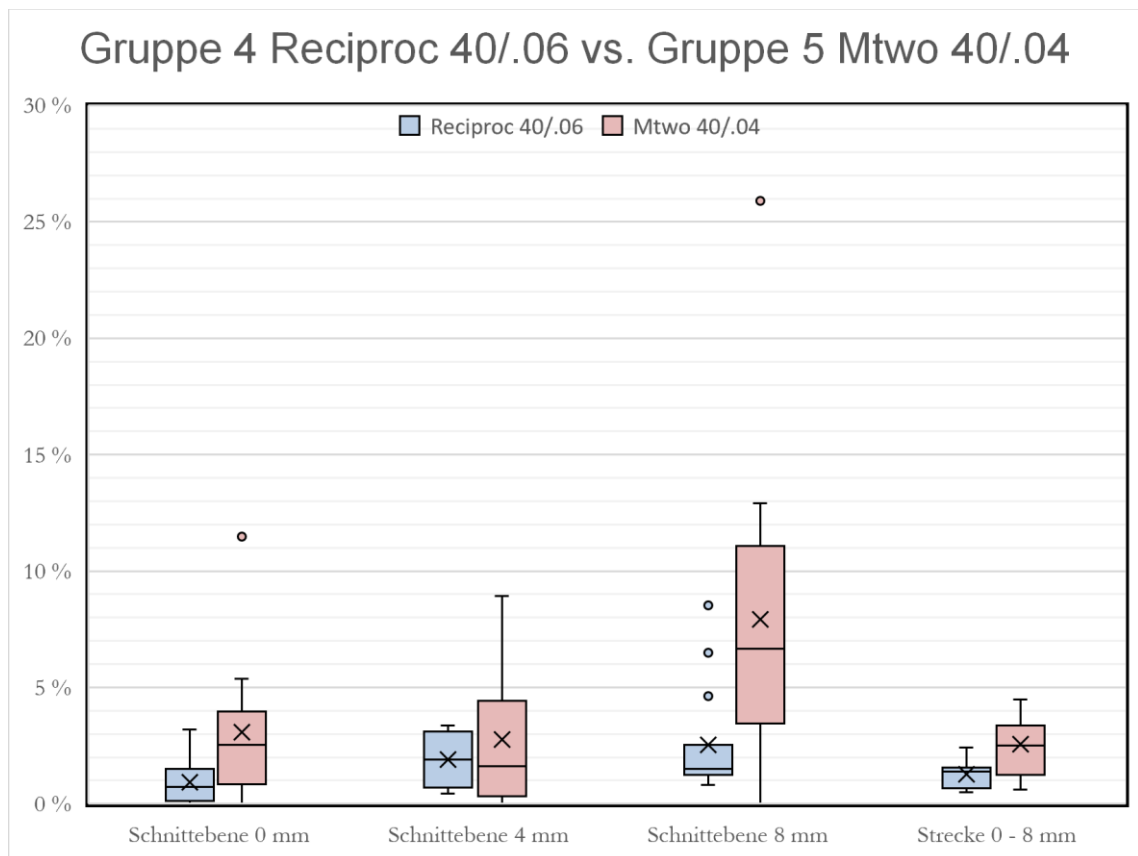


Abbildung 18: Boxplot-Diagramm: Vergleich Gruppe 4 vs. Gruppe 5

Die Abbildung zeigt ein Boxplot-Diagramm. Die y-Achse gibt die Porositäten in Prozent an. Auf der x-Achse sind die drei Schnittebenen sowie die Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm aufgezeigt. Blau wird das System Reciproc 40/.06, rot das System Mtwo 40/.04 dargestellt. Die jeweils farbige Box zeigt den Interquartilsabstand zwischen dem ersten und dem dritten Quartil. Die in der Box befindliche horizontale Linie veranschaulicht den Median, das Kreuz den Mittelwert. Die Antennen zeigen nach oben die Maximal- und nach unten die Minimalwerte an. Die Punkte stellen Ausreißer dar, die den 1,5-fachen Interquartilsabstand überschritten haben.

Die nachstehende Tabelle (Tabelle 13) zeigt den Vergleich von Gruppe 4 mit Gruppe 5. Es werden die Schnittebenen, die Mittelwerte, Maximum und Minimum sowie die Standardabweichung dargestellt. Der obere Teil der Tabelle zeigt die Werte in Prozent, der unterer Teil die Absolutwerte in Kubikmillimeter.

Tabelle 13: Gegenüberstellung: Gruppe 4 vs. Gruppe 5

Gruppe 4 - Gruppe 5 (Angaben in %)				
	Reciproc 40/.06		Mtwo 40/.04	
Schnitt-ebene	Mittelwert (min. & max.)	Standard- abweichung	Mittelwert (min. & max.)	Standard- abweichung
0 mm	0,92 (0 – 3,19)	± 0,91	3,06 (0 – 11,48)	± 2,91
4 mm	1,91 (0,45 – 3,36)	± 1,11	2,75 (0 – 8,91)	± 2,59
8 mm	2,53 (0,80 – 8,53)	± 2,25	7,94 (0,00036 – 25,91)	± 6,31
0 – 8 mm	1,26 (0,50 – 2,43)	± 0,62	2,56 (0,62 – 4,49)	± 1,28
Gruppe 4 - Gruppe 5 (Angaben in mm ³)				
0 mm	0,000086 (0 – 0,00028)	± 0,000094	0,00023 (0 – 0,00058)	± 0,00017
4 mm	0,00029 (0,000074 – 0,00063)	± 0,00019	0,00030 (0 – 0,0013)	± 0,00034
8 mm	0,00061 (0,00025 – 0,0016)	± 0,00041	0,0011 (0,00022 – 0,0029)	± 0,00079
0 – 8 mm	0,16 (0,056 – 0,30)	± 0,074	0,48 (0,063 – 4,21)	± 1,04

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Methode

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Qualität der Wurzelkanalobturation nach Wurzelkanalpräparation mit der *Single-File*- sowie mit der *Multiple-Files*-Technik zu vergleichen. Durch die dreidimensionale Darstellung mit Hilfe des Mikro-CTs konnten kleinste Hohlräume zwischen Guttaperchastift und Wurzelkanalwand aufgezeigt werden.

Eine gewöhnliche Wurzelkanalobturation besteht aus Guttapercha und einem *Sealer*. Die Präparationsinstrumente und die *Single-Cone*-Guttaperchastifte werden von Seiten der Hersteller als formkongruent bezeichnet.

Iglecias et al. (2017) untersuchten Porositäten in der Wurzelkanalfüllung nach Obturation mit der *Single-Cone*-Technik und der warm-vertikalen Kompaktion an 25 Unterkiefermolaren mit Krümmungen zwischen 25° und 35°. Jene Studie nutzte – genauso wie die vorliegende – die Mikro-Computertomographie zur Datenerhebung, unterscheidet sich aber in einem wesentlichen Merkmal: Es wurde neben Guttapercha standardmäßig *Sealer* zur Obturation verwendet.

Das Design der vorliegenden Studie sieht jedoch – im Gegensatz zu gängigen Untersuchungen – keine Verwendung von *Sealer* vor.

Um die Formkongruenz der Präparationsinstrumente mit den Guttaperchastiften zu vergleichen, wurden diese folglich ohne *Sealer* in einen Wurzelkanal eingebracht. Die Inkongruenzen wurden durch Vermessen der Porositäten zwischen Stift und Wurzelkanalwand nachgewiesen. Je mehr Porositäten vorhanden sind, desto mehr *Sealer* müsste benutzt werden, um den Wurzelkanal abzudichten. Die Menge an *Sealer* sollte jedoch möglichst gering sein.

Es liegen zahlreiche Mikro-CT-Studien vor, die verschiedene *Sealer* auf ihre Dichtigkeit hin untersuchten (Huang et al. (2017); Yanpiset et al. (2018)). Des Weiteren sind in der Literatur mehrere Mikro-CT-Studien zu finden, die verschiedene Präparationsinstrumente oder Obturationsmethoden miteinander verglichen (Paqué et al. 2005; Peters und Paqué 2011).

Die Studie von Celikten et al. (2016) ähnelt im Grundsatz der vorliegenden. Celikten et al. verwendeten 40 einwurzelige Zähne. Diese wiesen allerdings einen ovalen Wurzelquerschnitt auf, die auf vier Gruppen verteilt wurden. Die insgesamt 40 Zähne wurden bis auf die Größe 40/.06 präpariert, abschließend

mit EDTA gespült und mit der *Single-Cone*-Technik gefüllt. Dabei wurde – anders als in der vorliegenden Studie – in jeder der vier Gruppen ein anderer *Sealer* verwendet. In Gruppe 1 wurde AH Plus, in Gruppe 2 EndoSequence BC, in Gruppe 3 Smartpaste bio und in Gruppe 4 ActiV GP verwendet. Die Zähne wurden – wie auch in dieser Studie – mit dem Mikro-CT gescannt, allerdings nur mit einer Auflösung von 13,47 µm. Die Datenbearbeitung sowie die Auswertung wurden ebenfalls mit der Software NRecon und CT-analyser durchgeführt. Dabei wurden die Porositäten der Wurzelkanalfüllung wie in der vorliegenden Studie an drei Schnittebenen 0 mm – 4 mm (apikal), 4 mm – 8 mm (mittel) und 8 mm – 12 mm (koronal) gemessen. Ausgewertet wurden unter anderem die Porositäten in der Wurzelkanalfüllung sowie die Porositäten zwischen Wurzelkanalwand und Füllungsmaterial.

Die in der vorliegenden Studie verwendete Methodik entspricht den in der Literatur bereits etablierten und angewendeten Untersuchungsmethoden.

4.1.1 Zahnauswahl und Gruppeneinteilung

Für die vorliegende Studie wurden 75 extrahierte menschliche Oberkieferfrontzähne ausgewählt. Die Zähne wurden vorwiegend aus parodontalen Gründen extrahiert und dieser Studie freiwillig zur Verfügung gestellt. Das Alter sowie das Geschlecht der Personen, die die Zähne zur Verfügung stellten, wurden anonymisiert und sind den Zähnen nicht mehr zuzuordnen. In Anlehnung an ähnlich strukturierte Studien wurden die Gruppengröße sowie die Gruppeneinteilung gestaltet.

Die Zähne sollten einen weitgehend geradlinigen, runden Wurzelkanal aufweisen, um eine möglichst optimale Wurzelkanalpräparation mit anschließender geradliniger Wurzelkanalobturation zuzulassen. Für einen objektiven Vergleich der Formkongruenz zwischen Guttaperchastift und MAF war eine ideale Ausgangssituation für eine Wurzelkanalfüllung erstrebenswert.

Die Zähne wurden mit einem Diamantschleifer trepaniert und von demselben Behandler unter dem Dentalmikroskop bewertet, sodass eine einheitliche Vorgehensweise und eine einheitliche Bewertung der Zähne gegeben waren. Das Dentalmikroskop ermöglichte eine optimale Betrachtung der Wurzelkanäle. So war es möglich, unter Einhaltung hoher Qualitätsstandards die

Wurzelkanalgeometrien zu begutachten und die Präparation optimal durchzuführen.

Ein *Reamer* der Größe ISO 30 wurde anschließend in den Wurzelkanal eingebracht und überprüft, ob die notierte Arbeitslänge erreicht worden war. In diesem Fall wurde der Zahn von der Studie ausgeschlossen, weil die präoperative interne Maximalgröße des Wurzelkanals überschritten worden war. Die Ermittlung der Präparationsgrößen orientierte sich an den Vorgaben für die Nutzung der Reciproc-Instrumente der Firma VDW und wurde für alle fünf Gruppen gleichermaßen angewandt.

Da es sich um menschliche extrahierte Zähne handelte, konnte schon aus anatomischen Gründen nicht von einer vollkommenen Gleichheit aller Wurzelkanäle ausgegangen werden. Jeder Zahn wurde individuell und möglichst objektiv durch nur einen Behandler begutachtet.

Eine völlige Gleichheit aller Zähne ist nicht anzunehmen. Um eine vollständige Gleichheit aller Zähne zu ermöglichen, wäre alternativ der Gebrauch von Kunststoffblöcken notwendig gewesen. Dioguardi et al. (2015) beispielsweise verglichen zwei NiTi-Präparationssysteme an 40 Kunststoffblöcken, die Analyse erfolgte in einem Mikro-CT. Die Kunststoffblöcke gleichen jedoch, bedingt durch die unterschiedlichen Härten der verschiedenen Zahnschichten, nicht gänzlich einem natürlichen Zahn, auch wenn sie für die endodontische Lehre geeignet zu sein scheinen (Nassri et al. 2008).

Die 75 ausgewählten extrahierten menschlichen Zähne wurden auf fünf Gruppen aufgeteilt. Dabei stellten drei Gruppen die *Single-File*-Technik und zwei Gruppen die *Multiple-Files*-Technik dar. Es sollte untersucht werden, inwiefern Unterschiede in der Wurzelkanalfüllung in Verbindung mit der Präparationstechnik festzustellen sind. Besonders gängige Vertreter dieser Techniken sind die verwendeten Instrumente Reciproc (VDW), F6 SkyTaper (Brasseler) und Mtwo (VDW).

Die Zähne wurden randomisiert – in Abhängigkeit der Präparationszielgröße – verteilt, sodass die Ausgangsvoraussetzungen für alle fünf Gruppen gleich waren. Um eine standardisierte Messung durchführen zu können, wurde auch die Länge des Wurzelkanals vereinheitlicht, sodass bei allen Zähnen eine Beurteilung von Schnittebene 0 mm bis 8 mm möglich war.

Zur Vermeidung des Austrocknens der extrahierten Zähne wurden diese permanent in Leitungswasser gelagert. Ausgetrocknete Zähne neigen dazu, Risse zu bilden und somit mehr Porositäten aufzuweisen. Eine Lagerung der Zähne in destilliertem Wasser bzw. in einer Kochsalzlösung wäre ebenfalls denkbar gewesen.

4.1.2 Wurzelkanalpräparation und -obturation

Die Wurzelkanalpräparation mit den Instrumenten Reciproc, F6 SkyTaper und Mtwo erfolgte streng nach Herstellerangaben und wurde standardisiert von nur einem Behandler durchgeführt. Trotz größtmöglicher Bemühungen, alle Präparationen gleichermaßen auszuführen, ist dennoch von einer denkbaren menschlichen Ungenauigkeit auszugehen. Diese vom Menschen abhängige Fehlerrate ist jedoch auch bei Patientenbehandlungen in den Zahnarztpraxen nicht auszuschließen und gibt realistische Verhältnisse wieder.

Positiv zeichnet sich die *Single-File*-Technik im Vergleich zur *Multiple-Files*-Technik durch eine einfache Anwendung und signifikante Zeitersparnis bei der Wurzelkanalpräparation aus. Die *Single-File*-Technik mit dem Reciproc-System überpresst apikal jedoch signifikant mehr *Debris* als die *Multiple-Files*-Technik mit dem Mtwo-System (Bürklein et al. 2014).

Die Gruppen, die in dieser Studie verglichen wurden, wiesen – außer im Vergleich der Gruppe 2 mit der Gruppe 3 – unterschiedliche Konizitäten auf. Da die vom Hersteller angebotenen Guttaperchastifte auch die jeweiligen Konizitäten der Instrumente besitzen, ist ein Unterschied der Konizitäten im Vergleich zu vernachlässigen. Die Einstellungen des Endodontiemotors waren jeweils vom Hersteller vorgegeben und wurden dementsprechend übernommen. Einen Einfluss auf die Formgebung der Wurzelkanalpräparation ist durch die unterschiedlichen Einstellungen des Endodontiemotors nicht anzunehmen, sie dient eher der Vermeidung von Instrumentenfrakturen durch zu große Krafteinwirkung an den Instrumenten.

Die Spülung der Zähne erfolgte mit Leitungswasser und nicht mit einer desinfizierenden Lösung wie beispielsweise Natriumhypochlorit. Es bestand nicht die Notwendigkeit, den Wurzelkanal zu desinfizieren, weil die Untersuchung der Zähne auf die Qualität der Wurzelkanalobturation fokussierte.

Es wird hingegen empfohlen, EDTA als Abschlusspflung vor der Wurzelkanalfüllung zu verwenden (Jimna et al. 2017). EDTA agiert als Chelator und ist in der Lage, den anorganischen Anteil des *smear layers* aufzulösen. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Untersuchung die Wurzelkanäle abschließend mit EDTA gespült, um anorganische Substanzen aus dem Wurzelkanalsystem zu lösen und somit eine optimale Situation für die *Single-Cone*-Obturation zu gewährleisten.

Die Schallaktivierung der EDTA-Lösung wurde mit Hilfe eines Sonic Flex-Handstücks und einer EDDY-Polymerspitzte durchgeführt, um die Reinigungsleistung in den Wurzelkanälen zu erhöhen. Abschließend wurden die Zähne umgehend in Leitungswasser gelagert.

Die Präparationsinstrumente sowie die Guttaperchastifte waren vom Hersteller original verpackt und somit unbenutzt. Die Guttaperchastifte wurden bei Raumtemperatur gelagert und in den Wurzelkanal eingeführt. Die durchschnittliche thermische Wärmeausdehnung der Guttapercha beträgt 137×10^{-6} pro Grad Celsius (Cohen et al. 1992). Das bedeutet, dass sich die Guttapercha bei einer Erhöhung der Temperatur um 5 Grad Celsius um 0,07% volumetrisch ausdehnt. Dies kann, besonders bei Messungen im Mikrometerbereich, entscheidende Unterschiede verursachen. Die im Labor herrschende Raumtemperatur war jedoch konstant und somit standardisiert für alle Zähne gleich.

Die Wurzelkanalobturation erfolgte auf die zuvor bestimmte Arbeitslänge und wurde ebenfalls von nur einem Behandler durchgeführt, nachdem die Wurzelkanäle gründlich getrocknet worden waren. Durch die Trocknung konnte ausgeschlossen werden, dass in den Kanälen verbliebenes Wasser für Fehlmessungen sorgte. Die Zähne wurde nach der Wurzelkanalobturation umgehend im Mikro-CT gescannt.

4.1.3 Mikro-CT

Durch den Einsatz des Mikro-CTs konnten zerstörungsfreie und exakte Messungen der Zähne durchgeführt werden. Alternativ wäre es möglich gewesen, die Zähne histologisch zu untersuchen. Jung et al. (2005) teilten die Zähne mit einem 0,2 mm dünnen Trennschleifer in horizontale Schnitte, die mit Hilfe eines Mikroskops und einer Kamera ausgewertet wurden. Dieses Verfahren

zerstört einerseits den zu untersuchenden Zahn und ist andererseits nicht so präzise wie die Analyse mit Hilfe eines Mikro-CTs. Es ist nicht auszuschließen, dass beim Sägen der Querschnittspräparate die Guttapercha von einer Seite der Wurzelkanalwand abgezogen und auf der gegenüberliegenden Seite an die Wurzelkanalwand angedrückt wird. Ein Nano-CT wäre auch in der Lage gewesen, die Proben zu scannen, allerdings stand dieser im Rahmen der vorliegenden Studie nicht zur Verfügung.

Die Analyse der Porositäten erfolgte anhand einer einzigen Mikro-CT-Aufnahme jedes Zahns nach der Wurzelkanalobturation. Es wäre ebenfalls möglich gewesen, die Zähne vor und nach der Wurzelkanalobturation zu scannen und die Bilder anschließend mit einer Software zu überlagern. Paqué et al. (2009) beschreiben in ihrer Studie, dass eine Überlagerung der Scans möglich ist, allerdings eine Abweichung von mindestens einem Voxel üblich ist. Ein Voxel ist das Äquivalent zu einem Pixel in einem zweidimensionalen Bild.

In der vorliegenden Studie wurde nur ein Scan verwendet, da eine Überlagerung nicht notwendig war und somit einerseits ein Scanvorgang pro Zahn eingespart und andererseits die Ungenauigkeiten der Scanüberlagerung vermieden werden konnte.

Wie bei allen bildgebenden Verfahren können auch im Mikro-CT Artefakte oder Bildstörungen auftreten. Gründe dafür können unter anderem stark variierende Materialdichten sein (Schladitz 2011), wie sie beispielsweise beim Übergang von Zahnhartsubstanz zu metallischen Restaurationen vorkommen, oder Erschütterungen des Mikro-CTs während des Scanvorgangs.

Um diese Fehler zu minimieren, wurden Zähne mit restaurativen Versorgungsbereits bei der anfänglichen Begutachtung von der Studie ausgeschlossen und Erschütterungen des Geräts durch eine geschützte Position im Laborraum vermieden. Darüber hinaus wurden die Zähne in einer mit Schaumstoff ausgekleideten Röhre gescannt, um mögliche Erschütterungen zu dämpfen. Alternativ hätte man die Zähne mit der Wurzelspitze auch in Wachs positionieren und den Scanvorgang starten können. Dies hat jedoch den Nachteil, dass das Wachs sich beim Scanvorgang erwärmen kann und somit ein Verschieben des Zahns während des Scanvorgangs nicht ausgeschlossen ist. Des Weiteren könnte der metallische Objektträger, von dem der Zahn nur durch das Wachs getrennt ist, für Streu-Artefakte im Mikro-CT-Scan sorgen.

Auch das Alter der Röntgenquelle sowie mögliche Temperaturschwankungen, durch die Röntgenquelle verursacht, sind Faktoren, die die Qualität eines Mikro-CT-Scans beeinflussen können. Diese Faktoren galten allerdings für alle Zähne gleichermaßen.

Die Einstellungen des Mikro-CTs wurden standardisiert bei allen Scans gleichermaßen verwendet. Orhan et al. (2018) empfehlen eine Auflösung von mindestens 11,2 μm . Die verwendete höhere Auflösung von 10,9 μm ist somit für diese Untersuchung geeignet. Bei niedrigeren Pixelgrößen könnten Gegenstände noch genauer untersucht werden, jedoch steigen damit die Scanzeit und auch die Datenmenge, die verarbeitet werden muss, stark an. Die Auflösung des Micro-CT-Scans wurde deshalb in guter Balance zwischen exakter Datenerhebung und Datenauswertung getroffen.

Zur Auswertung der Mikro-CT-Daten müssen diese mit spezieller Software bearbeitet werden. Die in dieser Studie verwendete Software wurde von der Herstellerfirma des Mikro-CTs entwickelt und ist auf den Einsatz der Datenauswertung dieses Mikro-CTs abgestimmt. Es wäre jedoch auch möglich gewesen, Software von Drittanbietern zu verwenden. Alle Datensätze wurden bei der Datenverarbeitung möglichst gleich bearbeitet. Wann immer möglich, wurden die Einstellungsparameter aller Datensätze standardisiert eingestellt. Die Parameter, die nicht einheitlich eingestellt werden konnten, wurden von der Computersoftware automatisch ausgewählt. Besonders die Einstellung der Grauwerte der Binarisierung stellt ein Problem dar, in der Literatur gibt es aktuell keine einheitliche Vorgehensweise.

Orhan et al. (2018) stellten fest, dass das individuelle Einstellen der Grauwerte bei der Datenbearbeitung problematisch sein kann, da – je nach Einstellung – die ermittelten Daten variieren. Bis jetzt ist es nicht gelungen, einen einheitlichen Standard für die Binarisierung zu ermitteln. Diese Tatsache ist ein Nachteil bei der Nutzung eines Mikro-CTs. Die Grauwerte wurden in der vorliegenden Studie bei allen Bearbeitungen gleich eingestellt, sodass keine Indifferenzen zwischen den Proben vorlagen.

Die Schnittebene 0 mm wurde an dem Punkt definiert, an welchem am Guttaperchastift apikal – je nach Gruppe – ein Durchmesser von 0,25 mm bzw. 0,40 mm im Wurzelkanal zu messen war. Dadurch konnte ein reproduzierbarer Referenzpunkt ermittelt werden, von welchem aus die Distanzen 4 mm bzw.

8 mm digital addiert wurden. Da der Mikro-CT eine sehr hohe Auflösung bietet und den Zahn in mehrere hundert Schnittbilder unterteilt, war die Definition der Schnittebene 0 mm äußerst komplex. Dabei wurde von dem Operator das Schnittbild ermittelt, das am ehesten dem des gesuchten Durchmessers entsprach. Bei diesem Arbeitsschritt waren auch – bedingt durch das menschliche, individuelle Begutachten des Durchmessers – minimale Abweichungen bei der Ermittlung der Schnittebene 0 mm möglich. Die Schnittebenen wurden ausgewählt, um einen Überblick über die Qualität der Wurzelkanalfüllung und deren Passgenauigkeit zur Wurzelkanalgeometrie an verschiedenen Punkten zu erhalten. Dabei ist sicherlich die Schnittebene 0 mm von großer Bedeutung, da diese zeigt, wie gut die *Single-Cone*-Technik die apikale Konstriktion verschließt, was zum Unterbinden einer Reinfektion des periapikalen Gewebes unabdingbar ist. Wie Abbildung 19 verdeutlicht, besteht jedoch immer die Möglichkeit, dass mehrere apikale Foramina vorhanden sein können, sodass selbst ein scheinbar optimal gefüllter Wurzelkanal mit 0% Porosität an der Schnittebene 0 mm im klinischen Verlauf nicht zur Heilung kommen muss.

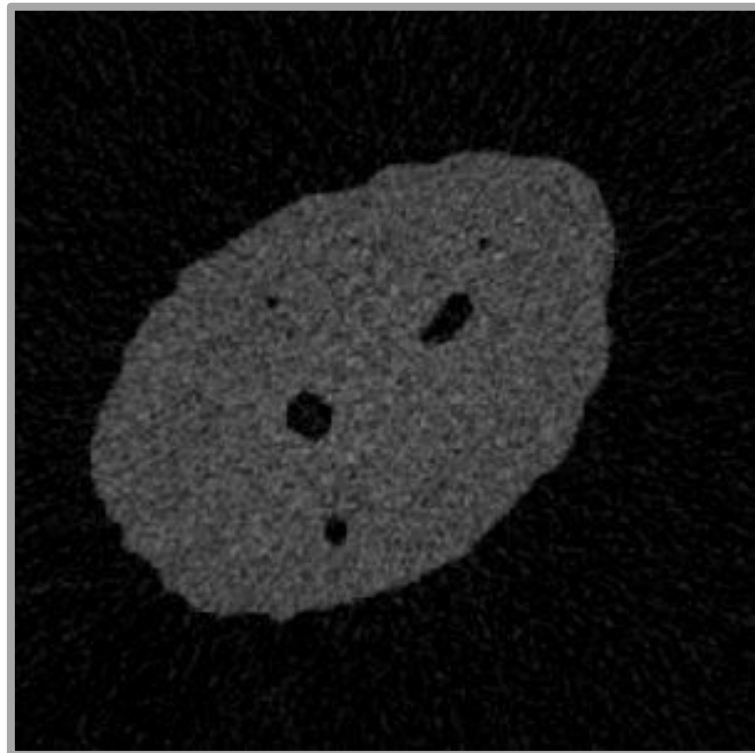


Abbildung 19: Apikales Delta

Die Abbildung zeigt eine apikale, horizontale Schnittebene durch einen Zahn. Die Schnittebene zeigt drei Foramina (drei schwarze Kreise).

Als besonders interessant ist die Untersuchung der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm zu bewerten. Auf dieser Strecke werden im Gegensatz zu den Schnittebenen 0 mm, 4 mm sowie 8 mm nicht nur ein horizontaler Schnitt, sondern mehrere hundert Schnitte kumuliert ausgewertet. Die Aussagekraft eines einzigen Schnittbildes gleicht eher einer Momentaufnahme, die für eine äußerst dünne Schicht gilt. Wenige Mikrometer oberhalb bzw. unterhalb dieser Schnittebene kann das Ergebnis stark variieren. Die Analyse der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm beruht auf derselben Berechnung wie die der einzelnen Schnittebenen, bezieht sich aber auf eine Strecke von 8 mm und mehrere hundert Schnittebenen. Diese Analyse ermöglicht einen ganzheitlichen Vergleich der Zähne und eine abschließende Aussage zur Qualität der Wurzelkanalobturation.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Auswertung der Ergebnisse wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Statistik der Universitätsmedizin Göttingen erarbeitet. In Anlehnung an ähnlich strukturierte endodontische Studien wurde ebenfalls der Mann-Whitney-U-Test angewandt. Die Datensätze wurden als nicht normalverteilt einheitlich statistisch ausgewertet, wohl wissend, dass parametrische Tests eine höhere Aussagekraft als nicht parametrische besitzen. Aufgrund der Strenge der Bonferroni-Korrektur zur Vermeidung der Alphafehler-Kumulierung für multiples Testen wurde auf diese verzichtet. Die statistische Auswertung sieht die Ermittlung der Daten als exploratives Vorgehen an. Die Auswertung sollte in der Lage sein, vorherrschende Signifikanzunterschiede aufdecken zu können.

Die aus dem Mikro-CT ermittelten Daten der *Single-File*-Systeme wurden jeweils mit denen des *Multiple-Files*-Systems derselben Präparationsgröße verglichen. Die hohe Qualität der Wurzelkanalfüllung ist für einen erfolgreichen Abschluss der Wurzelkanalbehandlung unabdingbar (Burke et al. 2009). Das Wurzelkanalsystem muss dicht verschlossen sein, da jegliche Porosität eine mögliche Reinfektion des gesamten Wurzelkanalsystems begünstigen kann. Für eine hochwertige Wurzelkanalfüllung sollte der Anteil an Guttapercha möglichst groß (Schäfer et al. 2013), der Anteil an *Sealer* möglichst klein sein. In vorherigen Studien wurde gezeigt, dass sich *Sealer* über die Zeit strukturell verändern

können. Sie sind im Gegensatz zu Guttapercha langfristig nicht dimensionsstabil (Kazemi et al. 1993). Die strukturelle Veränderung des *Sealers* kann es Bakterien ermöglichen, den Wurzelkanal erneut zu reinfizieren. Aus diesem Grund ist die Formkongruenz der MAF und der Guttaperchastifte von großer Bedeutung. Der modernen Zahnmedizin stehen heutzutage viele Obturationsmethoden zur Verfügung. Bei allen Methoden gilt gleichermaßen: Je mehr Guttapercha den Wurzelkanal ausfüllt, desto qualitativ hochwertiger ist die Wurzelkanalfüllung.

Taşdemir et al. (2009b) zeigten, dass die *Single-Cone*-Technik eine qualitativ bessere Wurzelkanalobturation ermöglicht als die kalte laterale Kompaktion in Bezug auf die Menge der Guttapercha im Wurzelkanal.

Nach Haupt et al. (2018) gleichen die Präparationsinstrumente, trotz standardisierter Herstellung, nicht exakt dem dazu korrespondierenden Guttaperchastift. Von einer ausschließlich durch den Guttaperchastift ausgefüllten Wurzelkanalfüllung ist folglich nicht auszugehen. Dies unterstützen die Ergebnisse dieser Studie.

In der vorliegenden Untersuchung konnten vereinzelt optimale Werte von 0% Porosität ermittelt werden. Es scheint demnach nicht unmöglich, eine zumindest in einzelnen Abschnitten des Wurzelkanals gänzlich mit Guttapercha gefüllte Wurzelkanalobturation zu erreichen, wenn man die Analyse mit dem Mikro-CT und eine Auflösung von 10,9 µm zugrunde legt.

Ein durchgängig mit 0% Porosität gefüllter Zahn war allerdings nicht auszumachen. Ebenso konnte in keiner Gruppe in irgendeiner Schnittebene ein Mittelwert von 0% Porosität festgestellt werden. Von einer direkt formkongruenten Übereinstimmung der MAF und der Guttaperchastifte kann demzufolge nicht ausgegangen werden.

Ebenso kamen Moule et al. (2002) in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass die geltende DIN EN ISO-Norm 6877 nicht strikt genug im Hinblick auf die Toleranzwerte sei und dass diese nachgebessert werden müsse. Es zeigte sich, dass bisher kein System in der Lage ist, einen Wurzelkanal gänzlich mit Guttapercha auszufüllen.

Besonders interessant ist, wie die ermittelten Werte der Porositäten schwankten. Bei der Präparationsgröße ISO 25 variierten die Minimal- und Maximalwerte der Porositäten bei Schnittebene 0 mm zwischen 0% und 10%. Der Mittelwert lag bei

ca. 3,5%. Von einer vollkommenen, alleine durch Guttapercha erzielten Wurzelkanalobturation ist apikal daher nur äußerst selten auszugehen.

Bei der Präparationsgröße ISO 40 lag der Mittelwert in Gruppe 5 ebenfalls bei ca. 3%, in Gruppe 4 hingegen bei unter einem Prozent. Die Untersuchung der Strecke von Schnittebene 0 mm bis 8 mm zeigte in den Gruppen 1 – 4 einen Mittelwert um 1,5%, in Gruppe 5 um 2,5% Porosität. In Kubikmillimeter ausgedrückt bedeutet das, dass die Gruppen 1 – 4 ca. 0,20 mm³, Gruppe 5 ca. 0,50 mm³ Porosität auf der gesamten Messstrecke aufwiesen.

Um einen Vergleich der Absolutwerte zu erlangen und diese besser einschätzen zu können, kann man das Volumen eines Bakteriums mit ca. 1 µm³ beziffern. Dies bedeutet, dass im Mittel – auf der gesamten Strecke von 8 mm Länge – in allen Gruppen ausreichend Raum für eine bakterielle Penetration vorhanden ist. Es ist denkbar, dass der Einsatz eines *Sealers* in der Lage sein kann, diese Porositäten so zu verschließen, dass von einer annähernd optimalen Wurzelkanalobturation gesprochen werden kann.

Die *Single-File*-Technik erwies sich bei der Präparationsgröße ISO 25 als nicht signifikant schlechter als die *Multiple-Files* Präparation. Im Gegensatz hierzu wies bei der Präparationsgröße ISO 40 die *Single-File*-Technik in zwei von vier Messbereichen signifikant bessere Ergebnisse auf. Ungeklärt bleibt der Umstand, warum ein signifikanter Unterschied beim Vergleich der Gruppe 4 mit Gruppe 5 entstand und dieser nicht beim Vergleich der Gruppe 1 bzw. Gruppe 2 mit Gruppe 3 auftrat. Die Form der korrespondierenden Guttaperchastifte sollte in jedem Fall der MAF gleichen, unabhängig von der Präparationsgröße und der Steigung.

Die Präparation der Zähne wurde von einem approbierten Zahnarzt durchgeführt, der speziell im Umgang mit den verschiedenen Präparationssystemen geschult wurde. Es ist jedoch eine von Menschen ausgeführte Tätigkeit, die eine vollkommene, gleiche Präparation aller Zähne unmöglich macht und somit eine potenzielle Fehlerquelle der Studie darstellt.

Die Anzahl der Zähne war ausreichend, um für diese Studie klare und statistisch auswertbare Daten zu liefern. Es ist jedoch unbestritten, dass eine größere Probenanzahl die Aussagekraft des Studienergebnisses noch valider werden ließe.

Da es sich in der vorliegenden Studie um eine In-Vitro-Studie handelt, sind die Ergebnisse nur bedingt auf die realen Patientenbehandlungen übertragbar. Mit größter Sorgfalt wurden nur diejenigen Zähne für diese Studie präpariert, die einen geraden und runden Wurzelkanal aufwiesen. Dementsprechend können die ermittelten Ergebnisse nur auf Wurzelkanäle mit der gleichen Konfiguration bezogen werden. Die Menge an Porositäten zwischen dem Guttaperchastift und der Wurzelkanalwand kann, bedingt durch die große anatomische Vielfalt der Wurzelkanalsysteme, deutlich variieren. So zeigen Ozawa et al. (2009), dass die *Single-Cone*-Technik beispielsweise in ovalen Wurzelkanälen nur eine ungenügende Wurzelanalobturation erzielt. Es kann jedoch bestätigt werden, dass der Gebrauch der *Single-File*-Systeme dem der *Multiple-Files*-Systeme mindestens ebenbürtig ist. Dieser Umstand stärkt die Argumente für die Verwendung von *Single-File*-Systemen, die in Anbetracht von Anwendung und Hygiene den *Multiple-Files*-Systemen überlegen sind.

Yared (2008) beschrieb, dass die einmalige Nutzung eines Präparationsinstruments vorteilhaft ist, da dieses keine Kreuzkontamination verursachen, das Risiko einer Instrumentenfraktur minimieren sowie Behandlungskosten reduzieren kann. Bürklein et al. (2013) zeigten, dass die Präparationszeit des *Single-File-Reciproc*-Systems um bis zu 60% kürzer ist als die des *Multiple-Files*-Systems Mtwo.

Die *Single-File*-Technik der verwendeten Systeme in der vorliegenden Studie kann demnach als mindestens gleichwertig in Bezug auf die abschließende Obturationsqualität angesehen werden. Es muss aber weiter untersucht werden, wie passgenau die Guttaperchastifte komplexe Wurzelkanalstrukturen und Krümmungen obturieren.

Die der Studie zugrunde liegenden Nullhypothesen können abschließend wie folgt bewertet werden:

1. Es besteht kein Unterschied in der Formkongruenz zwischen Präparation und systemeigenen Guttaperchastiften bei Verwendung von *Single-File*- oder *Multiple-Files*-NiTi-Systemen gleicher Größe und Steigung (F6 SkyTaper 25/.06 vs. Mtwo 25/.06).
→ Die Nullhypothese kann bestätigt werden.

2. Es besteht kein Unterschied in der Formkongruenz zwischen Präparation und systemeigenen Guttaperchastiften bei Verwendung von *Single-File*- oder *Multiple-Files*-NiTi-Systemen gleicher Größe und unterschiedlicher Steigung (Reciproc 40/.06 vs. Mtwo 40/.04).
→ Die Nullhypothese kann nicht vollständig bestätigt werden, es lagen signifikante Unterschiede vor, allerdings nur in der Schnittebene 8 mm und über die Distanz 0 mm – 8 mm.

3. Es besteht kein Unterschied in der Formkongruenz zwischen Präparation und systemeigenen Guttaperchastiften bei Verwendung von *Single-File* und *Multiple-Files*-NiTi-Systemen gleicher Größe, und unterschiedlicher Steigung (Reciproc 25/.08 vs. Mtwo 25/.06).
→ Die Nullhypothese kann bestätigt werden.

5 Zusammenfassung

Es wurde mit Hilfe der Mikro-Computertomographie die Qualität der *Single-Cone*-Wurzelkanalobturation nach Präparation mit der *Single-File*- sowie der *Multiple-Files*-Technik untersucht.

75 extrahierte Oberkieferfrontzähne mit einem geraden, runden Wurzelkanal wurden auf fünf Gruppen randomisiert verteilt. Drei Gruppen wurden mit der *Single-File*-Technik und den jeweiligen Instrumenten Reciproc R25, R40 und F6 SkyTaper 25/.06 maschinell präpariert, genauso wie die beiden anderen Gruppen mit der *Multiple-Files*-Technik und den Instrumenten Mtwo 25/.06 und Mtwo 40/.04 gemäß ihrer jeweiligen Zielgröße. Nach der Wurzelkanalpräparation wurden die Zähne aller Gruppen mit je einem – dem Präparationssystem entsprechenden – *Single-Cone*-Guttaperchastift gefüllt. *Sealer* wurde nicht verwendet. Die wurzelkanalgefüllten Zähne wurden im Mikro-CT gescannt und die Porositäten (Lufteinschlüsse) zwischen dem Wurzelkanal und dem Guttaperchastift in drei Schnittebenen auf Höhe von 0 mm, 4 mm und 8 mm koronal des Apex sowie kumulativ die Strecke von 0 mm bis 8 mm ausgewertet. Die ermittelten Daten wurden statistisch auf ihre Häufigkeitsverteilung und mit dem Mann-Whitney-U-Test auf signifikante Unterschiede getestet.

Der Vergleich des *Single-File*-Systems R25 mit dem *Multiple-Files*-System Mtwo 25/.06 zeigte keine signifikanten Unterschiede bei den Schnittebenen und bei der Strecke von 0 mm bis 8 mm. Ohne signifikante Unterschiede war auch der Vergleich des *Single-File*-Systems F6 SkyTaper 25/.06 mit dem *Multiple-Files*-System Mtwo 25/.06. Das *Single-File*-System R40, verglichen mit dem *Multiple-Files*-System Mtwo 40/.04, zeigte bei Schnittebene 8 mm sowie bei der Strecke von 0 mm bis 8 mm signifikant bessere Ergebnisse.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es keinen qualitativen Unterschied zwischen dem *Single-File*-System und den *Multiple-Files*-Systemen bei den Instrumentengrößen R25, Mtwo 25/.06 und F6 SkyTaper 25/.06 gibt. Bei der größeren Präparationsgröße war die *Single-File*-Technik des Reciproc-Systems dem *Multiple-Files*-System Mtwo überlegen.

6 Anhang

Tabelle A 1: Materialliste

Material/Instrument	Hersteller
Buchanan Hand Plugger	KERR, Biberach, Deutschland
Dell Precision Tower-Computer 7910	Dell, Round Rock, USA
Dental Pinzette	ClinicCare, Bremen, Deutschland
Dentalmikroskop	Zeiss, Oberkochen, Deutschland
Diamantschleifer	Brasseler, Lemgo, Deutschland
EDDY-Polymerspitze	VDW, München, Deutschland
Einwegspritze 5 ml	B. Braun, Melsungen, Deutschland
Endodontie-Motor VDW Silver	VDW, München, Deutschland
Ethylendiamintetraessigsäure 17%	lege artis Pharma, Dettenhausen, Deutschland
F6 SkyTaper Instrumente 25/.06	Brasseler, Lemgo, Deutschland
Guttapercha F6 SkyTaper	Brasseler, Lemgo, Deutschland
Guttapercha Mtwo 25	VDW, München, Deutschland
Guttapercha Mtwo 40	VDW, München, Deutschland
Guttapercha Reciproc 25	VDW, München, Deutschland
Guttapercha Reciproc 40	VDW, München, Deutschland
HS-Scaler	Henry Schein Dental, Langen, Deutschland
Lagerungsbox	Hünersdorff, Ludwigsburg, Deutschland
Microsoft Excel	Microsoft, Redmond, USA
Microsoft Word	Microsoft, Redmond, USA
Mikro-CT SkyScan 1272	Bruker, Billerica, USA
Mtwo Instrumente 10/.04	VDW, München, Deutschland
Mtwo Instrumente 15/.05	VDW, München, Deutschland
Mtwo Instrumente 20/.06	VDW, München, Deutschland
Mtwo Instrumente 25/.06	VDW, München, Deutschland
Mtwo Instrumente 30/.05	VDW, München, Deutschland
Mtwo Instrumente 35/.04	VDW, München, Deutschland

Tabelle A 1: Materialliste

Material/Instrument	Hersteller
Mtwo Instrumente 40/.04	VDW, München, Deutschland
Papierspitzen F6 SkyTaper	Brasseler, Lemgo, Deutschland
Papierspitzen Mtwo	VDW, München, Deutschland
Papierspitzen Reciproc	VDW, München, Deutschland
Pulpabohrer Müller	Brasseler, Lemgo, Deutschland
<i>Reamer</i> Größe ISO 10	VDW, München, Deutschland
<i>Reamer</i> Größe ISO 20	VDW, München, Deutschland
<i>Reamer</i> Größe ISO 30	VDW, München, Deutschland
Reciproc Instrumente 25/.08	VDW, München, Deutschland
Reciproc Instrumente 40/.06	VDW, München, Deutschland
Schaumstoffständer	Henry Schein Dental, Langen, Deutschland
Software CT-analyser	Bruker, Billerica, USA
Software NRecon	Bruker, Billerica, USA
Software SPSS	IBM, Armonk, USA
Sonic Flex- Handstück	KaVo, Biberach, Deutschland
Spülkanüle VMK Endoneedle Dr. J Buquet	Vedefar nv, Mechelen, Belgien
Zentimeterlineal	VIVESS-REWE Markt, Köln, Deutschland

7 Literaturverzeichnis

- Behnia A, McDonald NJ (2001): In vitro infrared thermographic assessment of root surface temperatures generated by the Thermafil Plus system. *J Endod* 27, 203–205
- Burke FM, Lynch CD, Ríordáin RN, Hannigan A (2009): Technical quality of root canal fillings performed in a dental school and the associated retention of root-filled teeth: a clinical follow-up study over a 5-year period. *J Oral Rehabil* 36, 508–515
- Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2013): Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 46, 590–597
- Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2014): Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J* 47, 405–409
- Capar ID, Ertas H, Ok E, Arslan H, Ertas ET (2014): Comparative study of different novel Nickel-Titanium rotary systems for root canal preparation in severely curved root canals. *J Endod* 40, 852–856
- Castagnola R, Marigo L, Pecci R, Bedini R, Cordaro M, Liborio Coppola E, Lajolo C (2018): Micro-CT evaluation of two different root canal filling techniques. *Eur Rev Med Pharmacol Sci* 22, 4778–4783
- Celikten B, Uzuntas CF, Orhan AI, Orhan K, Tufenkci P, Kursun S, Demiralp KÖ (2016): Evaluation of root canal sealer filling quality using a single-cone technique in oval shaped canals: An In vitro Micro-CT study. *Scanning* 38, 133–140
- Chesler MB, Tordik PA, Imamura GM, Goodell GG (2013): Intramanufacturer diameter and taper variability of rotary instruments and their corresponding gutta-percha cones. *J Endod* 39, 538–541
- Chu CH, Lo ECM, Cheung GSP (2005): Outcome of root canal treatment using Thermafil and cold lateral condensation filling techniques. *Int Endod J* 38, 179–185
- Clinton K, Himel VT (2001): Comparison of a warm gutta-percha obturation technique and lateral condensation. *J Endod* 27, 692–695
- Cohen BD, Combe EC, Lilley JD (1992): Effect of thermal placement techniques on some physical properties of gutta-percha. *Int Endod J* 25, 292–296
- Cunningham KP, Walker MP, Kulild JC, Lask JT (2006): Variability of the diameter and taper of size #30, 0.04 gutta-percha cones. *J Endod* 32, 1081–1084

- Dioguardi M, Troiano G, Laino L, Russo LL, Giannatempo G, Lauritano F, Cicciù M, Muzio LL (2015): ProTaper and WaveOne systems three-dimensional comparison of device parameters after the shaping technique. A micro-CT study on simulated root canals. *Int J Clin Exp Med* 8, 17830–17834
- El Sayed MAAM, Taleb AAA, Balbahaith MSM (2013): Sealing ability of three single-cone obturation systems: An in-vitro glucose leakage study. *J Conserv Dent* 16, 489–493
- Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Seibert U, Schaller S, Kalender W (1999): Micro-CT. Technology and application for assessing bone structure. *Radiol* 39, 203–212
- Ferraz C, Dealmeidagomes B, Zaia A, Teixeira F, Desouzafilho F (2001): In vitro assessment of the antimicrobial action and the mechanical ability of chlorhexidine gel as an endodontic irrigant. *J Endod* 27, 452–455
- Ferreira RB, Alfredo E, Arruda MPD, Sousa YTCS, Sousa-Neto MD (2004): Histological analysis of the cleaning capacity of nickel-titanium rotary instrumentation with ultrasonic irrigation in root canals. *Aust Endod J* 30, 56–58
- Friedman CM, Sandrik JL, Heuer MA, Rapp GW (1975): Composition and mechanical properties of gutta-percha endodontic points. *J Dent Res* 54, 921–925
- Gordon MPJ, Love RM, Chandler NP (2005): An evaluation of .06 tapered gutta-percha cones for filling of .06 taper prepared curved root canals. *Int Endod J* 38, 87–96
- Gründling GL, Zechin JG, Jardim WM, de Oliveira SD, de Figueiredo JAP (2011): Effect of ultrasonics on *Enterococcus faecalis* biofilm in a bovine tooth model. *J Endod* 37, 1128–1133
- Gu L, Wei X, Ling J, Huang X (2009): A microcomputed tomographic study of canal isthmuses in the mesial root of mandibular first molars in a Chinese population. *J Endod* 35, 353–356
- Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2009): Evaluation of root canal obturation: A three-dimensional in vitro study. *J Endod* 35, 541–544
- Hata G, Kawazoe S, Toda T, Weine FS (1995): Sealing ability of thermoplasticized gutta-percha fill techniques as assessed by a new method of determining apical leakage. *J Endod* 21, 167–172
- Hatch GW, Roberts S, Joyce AP, Runner R, McPherson JC (2008): Comparative study of the variability of 0.06 tapered rotary endodontic files to current taper standards. *J Endod* 34, 463–465

- Haupt F, Seidel M, Rizk M, Sydow H-G, Wiegand A, Rödiger T (2018): Diameter and taper variability of single-file instrumentation systems and their corresponding gutta-percha cones. *J Endod* 44, 1436–1441
- Hörsted-Bindslev P, Andersen MA, Jensen MF, Nilsson JH, Wenzel A (2007): Quality of molar root canal fillings performed with the lateral compaction and the single-cone technique. *J Endod* 33, 468–471
- Huang Y, Celikten B, de Faria Vasconcelos K, Ferreira Pinheiro Nicolielo L, Lippiatt N, Buyuksungur A, Jacobs R, Orhan K (2017): Micro-CT and nano-CT analysis of filling quality of three different endodontic sealers. *Dentomaxillofacial Radiol* 46, 02–23
- Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH (2005): Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endod Top* 10, 30–76
- Iglecias EF, Freire LG, de Miranda Candeiro GT, dos Santos M, Antoniazzi JH, Gavini G (2017): Presence of voids after continuous wave of condensation and single-cone obturation in mandibular molars: A micro-computed tomography analysis. *J Endod* 43, 638–642
- Inan U, Aydin C, Tunca YM, Basak F (2009): In vitro evaluation of matched-taper single-cone obturation with a fluid filtration method. *J Can Dent Assoc* 75, 123
- Ingle JI (1961): A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 14, 83–91
- Jimna MM, Ashwini TS, Sowmya HK (2017): Comparison and evaluation of two reciprocating root canal instruments on removal of smear layer by using two irrigants at apical one-third of the root canal-an ex vivo-scanning electron microscopic study. *J Conserv Dent* 20, 451–458
- Jung M, Lommel D, Klimek J (2005): The imaging of root canal obturation using micro-CT. *Int Endod J* 38, 617–626
- Kazemi RB, Safavi KE, Spångberg LSW (1993): Dimensional changes of endodontic sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 76, 766–771
- Kim H-C, Kwak S-W, Cheung GS-P, Ko D-H, Chung S-M, Lee W (2012): Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endod* 38, 541–544
- Konjhodzic-Prcic A, Jakupovic S, Hasic-Brankovic L, Vukovic A (2015): Evaluation of biocompatibility of root canal sealers on L929 fibroblasts with Multiscan EX spectrophotometer. *Acta Inform Medica* 23, 135–137

- Krug R, Krastl G, Jahreis M (2017): Technical quality of a matching-taper single-cone filling technique following rotary instrumentation compared with lateral compaction after manual preparation: a retrospective study. *Clin Oral Investig* 21, 643–652
- Larsen T, Fiehn N-E (2017): Dental biofilm infections – an update. *APMIS* 125, 376–384
- Lask JT, Walker MP, Kulild JC, Cunningham KP, Shull PA (2006): Variability of the diameter and taper of size #30, 0.04 nickel-titanium rotary files. *J Endod* 32, 1171–1173
- Levitan ME, Himel VT, Luckey JB (2003): The effect of insertion rates on fill length and adaptation of a thermoplasticized gutta-percha technique. *J Endod* 29, 505–508
- Marciano MA, Ordinola-Zapata R, Cunha TVRN, Duarte M a. H, Cavenago BC, Garcia RB, Bramante CM, Bernardineli N, Moraes IG (2011): Analysis of four gutta-percha techniques used to fill mesial root canals of mandibular molars. *Int Endod J* 44, 321–329
- Moinzadeh AT, Zerbst W, Boutsoukis C, Shemesh H, Zaslansky P (2015): Porosity distribution in root canals filled with gutta percha and calcium silicate cement. *Dent Mater* 31, 1100–1108
- Monticelli F, Sword J, Martin RL, Schuster GS, Weller RN, Ferrari M, Pashley DH, Tay FR (2007): Sealing properties of two contemporary single-cone obturation systems. *Int Endod J* 40, 374–385
- Moule AJ, Kellaway R, Glarkson R, Rowell J, Macfarlane R, Lewis D, Cameron T, Atkins D (2002): Variability of master gutta-percha cones. *Aust Endod J* 28, 38–43
- Nair PNR (2004): Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures. *Crit Rev Oral Biol Med* 15, 348–381
- Nassri MRG, Carlik J, Silva CRN da, Okagawa RE, Lin S (2008): Critical analysis of artificial teeth for endodontic teaching. *J Appl Oral Sci* 16, 43–49
- Olejniczak AJ, Smith TM, Feeney RNM, Macchiarelli R, Mazurier A, Bondioli L, Rosas A, Fortea J, de la Rasilla M, Garcia-Taberner A et al. (2008): Dental tissue proportions and enamel thickness in Neandertal and modern human molars. *J Hum Evol* 55, 12–23
- Orhan K, Jacobs R, Celikten B, Huang Y, de Faria Vasconcelos K, Nicolielo LFP, Buyuksungur A, Van Dessel J (2018): Evaluation of threshold values for root canal filling voids in Micro-CT and Nano-CT images. *Scanning* 2018, 9437569

- Ørstavik D, Kerekes K, Molven O (1991): Effects of extensive apical reaming and calcium hydroxide dressing on bacterial infection during treatment of apical periodontitis: a pilot study. *Int Endod J* 24, 1–7
- Ørstavik D, Nordahl I, Tibballs JE (2001): Dimensional change following setting of root canal sealer materials. *Dent Mater* 17, 512–519
- Ozawa T, Taha N, Messer HH (2009): A comparison of techniques for obturating oval-shaped root canals. *Dent Mater J* 28, 290–294
- Paqué F, Barbakow F, Peters OA (2005): Root canal preparation with Endo-Eze AET: changes in root canal shape assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J* 38, 456–464
- Paqué F, Laib A, Gautschi H, Zehnder M (2009): Hard-tissue debris accumulation analysis by high-resolution computed tomography scans. *J Endod* 35, 1044–1047
- Paqué F, Al-Jadaa A, Kfir A (2012): Hard-tissue debris accumulation created by conventional rotary versus self-adjusting file instrumentation in mesial root canal systems of mandibular molars. *Int Endod J* 45, 413–418
- Pereira AC, Nishiyama CK, Pinto L de C (2012): Single-cone obturation technique: a literature review. *Rev Sul-Bras Odontol* 9, 442–447
- Peters OA, Paqué F (2011): Root canal preparation of maxillary molars with the Self-adjusting File: A micro-computed tomography study. *J Endod* 37, 53–57
- Peters OA, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F (2000): Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res* 79, 1405–1409
- Pitout E, Oberholzer TG (2009): Leakage of teeth root-filled with GuttaFlow and a single GP cone compared to lateral condensation and warm vertical condensation : scientific. *South Afr Dent J* 64, 104–108
- Pommel L, Camps J (2001): In vitro apical leakage of system B compared with other filling techniques. *J Endod* 27, 449–451
- Robberecht L, Colard T, Claisse-Crinquette A (2012): Qualitative evaluation of two endodontic obturation techniques: tapered single-cone method versus warm vertical condensation and injection system An in vitro study. *J Oral Sci* 54, 99–104
- Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S (2010): Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *Int Endod J* 43, 200–209

- Sadr S, Golmoradzadeh A, Raouf M, Tabanfar MJ (2015): Microleakage of single-cone gutta-percha obturation technique in combination with different types of sealers. *Iran Endod J* 10, 199–203
- Schäfer E, Schulz-Bongert U, Tulus G (2004): Comparison of hand stainless steel and nickel titanium rotary instrumentation: A clinical study. *J Endod* 30, 432–435
- Schäfer E, Nelius B, Bürklein S (2012): A comparative evaluation of gutta-percha filled areas in curved root canals obturated with different techniques. *Clin Oral Investig* 16, 225–230
- Schäfer E, Köster M, Bürklein S (2013): Percentage of gutta-percha-filled areas in canals instrumented with nickel-titanium systems and obturated with matching single cones. *J Endod* 39, 924–928
- Schladitz K (2011): Quantitative micro-CT. *J Microsc* 243, 111–117
- Shanahan DJ, Duncan HF (2011): Root canal filling using Resilon: a review. *Br Dent J* 211, 81–88
- Siqueira JF, Alves FRF, Versiani MA, Rôças IN, Almeida BM, Neves MAS, Sousa-Neto MD (2013): Correlative bacteriologic and micro-computed tomographic analysis of mandibular molar mesial canals prepared by Self-Adjusting File, Reciproc, and Twisted File systems. *J Endod* 39, 1044–1050
- Sonntag D, Peters OA (2007): Effect of prion decontamination protocols on nickel-titanium rotary surfaces. *J Endod* 33, 442–446
- Swain MV, Xue J (2009): State of the art of micro-CT applications in dental research. *Int J Oral Sci* 1, 177–188
- Tagger M, Katz A, Tamse A (1994): Apical seal using the GP11 method in straight canals compared with lateral condensation, with or without sealer. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 78, 225–231
- Tamse A (1988): Iatrogenic vertical root fractures in endodontically treated teeth. *Dent Traumatol* 4, 190–196
- Taschieri S, Fabbro MD, Samaranayake L, Chang JWW, Corbella S (2014): Microbial invasion of dentinal tubules: a literature review and a new perspective. *J Investig Clin Dent* 5, 163–170
- Taşdemir T, Er K, Yildirim T, Buruk K, Çelik D, Cora S, Tahan E, Tuncel B, Serper A (2009a): Comparison of the sealing ability of three filling techniques in canals shaped with two different rotary systems: A bacterial leakage study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology* 108, e129–e134

- Taşdemir T, Yesilyurt C, Ceyhanli KT, Celik D, Er K (2009b): Evaluation of apical filling after root canal filling by 2 different techniques. *J Can Dent Assoc* 75, 201a–201d
- Versiani MA, Alves FRF, Andrade-Junior CV, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Rôças IN, Sousa-Neto MD, Siqueira JF (2016): Micro-CT evaluation of the efficacy of hard-tissue removal from the root canal and isthmus area by positive and negative pressure irrigation systems. *Int Endod J* 49, 1079–1087
- Viana ACD, Chaves Craveiro de Melo M, Guiomar de Azevedo Bahia M, Lopes Buono VT (2010): Relationship between flexibility and physical, chemical, and geometric characteristics of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology* 110, 527–533
- Vujašković M, Teodorović N (2010): Analysis of sealing ability of root canal sealers using scanning electronic microscopy technique. *Srp Arh Celok Lek* 138, 694–698
- Walia H, Brantley WA, Gerstein H (1988): An initial investigation of the bending and torsional properties of nitinol root canal files. *J Endod* 14, 346–351
- Whitworth J (2005): Methods of filling root canals: principles and practices. *Endod Topics* 12, 2–24
- Wiseman A, Cox TC, Paranjpe A, Flake NM, Cohenca N, Johnson JD (2011): Efficacy of sonic and ultrasonic activation for removal of calcium hydroxide from mesial canals of mandibular molars: A microtomographic study. *J Endod* 37, 235–238
- Wu M-K, Wesselink PR (2001): A primary observation on the preparation and obturation of oval canals. *Int Endod J* 34, 137–141
- Wu M-K, Kaš'áková A, Wesselink PR (2001): Quality of cold and warm gutta-percha fillings in oval canals in mandibular premolars. *Int Endod J* 34, 485–491
- Wu M-K, van der Sluis LWM, Wesselink PR (2006): A 1-year follow-up study on leakage of single-cone fillings with RoekoRSA sealer. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology* 101, 662–667
- Yanpiset K, Banomyong D, Chotvorrarak K, Srisatjaluk RL (2018): Bacterial leakage and micro-computed tomography evaluation in round-shaped canals obturated with bioceramic cone and sealer using matched single cone technique. *Restor Dent Endod* 43, e30
- Yared G (2008): Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J* 41, 339–344
- Yilmaz Z, Deniz D, Ozcelik B, Sahin C, Cimilli H, Cehreli ZC, Kartal N (2009): Sealing efficiency of BeeFill 2in1 and System B/Obtura II versus single-cone and cold

lateral compaction techniques. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 108, e51–e55

Zmener O, Spielberg C, Lamberghini F, Rucci M (1997): Sealing properties of a new epoxy resin-based root-canal sealer. *Int Endod J* 30, 332–334

Danksagung

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr. med. dent. Michael Hülsmann, Oberarzt der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, für die überaus professionelle Betreuung dieser Dissertation. Besonderen Dank möchte ich für die stets sehr schnelle und unkomplizierte Kommunikation aussprechen.

Frau Dr. Marta Rizk möchte ich für die Unterstützung am Mikro-CT danken.

Ebenfalls möchte ich mich bei dem Institut der Medizinischen Statistik der Universitätsmedizin Göttingen für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung bedanken.