

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

**Untersuchung des Penetrationsverhaltens von AH Plus®,
Medcem® MTA, ProRoot® MTA und Total Fill® BC
Sealer™ in Dentintubuli mittels konfokalem
Laserscanning-Mikroskops**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Nicolas Maximilian Frisch
aus
Göttingen

2018

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatterin: Prof. Dr. med. dent. Karin Christine Huth
Mitberichterstatter: Prof. Dr. Dr. Heinz Kniha
Mitbetreuung durch die
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. dent. Maximilian Kollmuß, Dr. med. dent.
Stefan Kist
Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard HICKEL
Tag der mündlichen Prüfung: 26.07.2018

Die Dissertation
ist
meinen Eltern und meiner Oma
gewidmet

1	Einleitung	2
1.1	Ätiologie der Wurzelkanalbehandlung	2
1.2	Aktuelles Vorgehen in der endodontischen Therapie	4
1.3	Einsatz des Sealers	8
1.3.1	Erfolgskriterien einer endodontischen Behandlung	8
1.3.2	Eigenschaften der Sealer	10
1.3.3	Anforderungen an die Wurzelkanalfüllung	13
2	Fragestellung	16
3	Material und Methode	17
3.1	Versuchsaufbau	17
3.1.1	Zähne	17
3.1.2	Längenbestimmung der Wurzelkanäle	17
3.1.3	Wurzelkanalaufbereitung	17
3.1.4	Spüllösungen	17
3.1.5	Verwendete Sealer	18
3.1.6	Fluoreszenzfarbstoff	20
3.1.7	Obturation der Wurzelkanäle	20
3.1.8	Herstellung der Schnitte	20
3.2	Versuchsdurchführung – Vorversuche	23
3.3	Versuchsdurchführung – Hauptversuche	26
3.4	Statistische Auswertung	33
4	Ergebnisse	34
4.1	Penetrationstiefe in die Dentintubuli	34
4.2	Anteil des mit Sealer penetrierten Kanalumfangs	41
5	Diskussion	44
6	Zusammenfassung	51
7	Literaturverzeichnis	53
8	Anhang	61
8.1	Tabellenverzeichnis	61
8.2	Abbildungsverzeichnis	61
8.3	Detaillierte Versuchsergebnisse mit Einzelwerten	62
9	Danksagungen	69

1 Einleitung

1.1 Ätiologie der Wurzelkanalbehandlung

Wird ein Zahn in irgendeiner Form einem pathologischen, also einem über die physiologische Belastung hinausgehenden Reiz ausgesetzt, kann als Folge dieses Reizes eine Entzündung der Zahnpulpa, bestehend aus Nervenfasern, Bindegewebe mit Blut- und Lymphgefäßen, im Pulpencavum entstehen. Diese Entzündung wird Pulpitis genannt (Hülsmann, 2008; Hellwig, 2009). Eine Pulpitis kann verschiedene Ursachen haben. Als häufigste Ursache einer Pulpitis gilt die Karies. Karies ist beschrieben als ein dynamischer Prozess aus De- und Remineralisierungsvorgängen der Zahnhartsubstanz mit dominierender Demineralisierung (Hellwig, 2009). Bedingt ist dies durch von Bakterien aus Kohlenhydraten der Nahrung produzierten organischen Säuren. Solange diese organischen Säuren produziert werden, hält die Demineralisation der Zahnhartsubstanz an. Die Säuren geben Wasserstoffionen ab, was dazu führt, dass die Zahnhartsubstanzanteile wie beispielsweise Calcium und Magnesium aus ihrer Kristallstruktur herausgelöst werden. Durch den unterschiedlichen Konzentrationsgradienten wandern diese Ionen an die Schmelzoberfläche. Dies führt dann letztendlich zu einem irreversiblen Verlust der Zahnhartsubstanz (Hellwig, 2009; Weber, 2010). Eine nicht erkannte und somit nicht therapierte Karies entwickelt sich progredient, schreitet also in die Tiefe des Zahnes weiter fort. Nach einiger Zeit wird die Pulpenkammer von den kariesverursachenden Bakterien infiltriert und das Pulpagewebe entzündet sich als Reaktion auf die einwandernden Mikroorganismen (Bergenholtz *et al.*, 1981; Hahn *et al.*, 1991).

Abgesehen von Karies gibt es diverse andere Ursachen, die eine Pulpitis hervorrufen können. Zu nennen sind Frakturen der Zähne oder Zahnwurzeln durch stumpfe Traumata, Präparationstraumata durch insuffiziente Wasserkühlung oder zu geringem Abstand zur Pulpakammer, Erosionen infolge eines Refluxes oder einer Essstörung, Abrasionen durch beispielsweise nächtliche Parafunktionen und Bruxismus sowie allergene oder toxische Bestandteile in Füllungsmaterialien (Hülsmann, 2008).

Auf all diese Reize antwortet die Pulpa mit einer Freisetzung von Entzündungsmediatoren, wie Zytokine, welche dafür sorgen, dass Immunzellen angelockt werden. Die Immunzellen versuchen die eindringenden Mikroorganismen

abzutöten und zu eliminieren. Anschließend erfolgt der Versuch der Wundheilung. Gelingt die Wundheilung und die durch die Karies induzierte Entzündung der Zahnpulpa heilt aus, spricht man von einer reversiblen Pulpitis. In diesem Stadium ist eine Wurzelkanalbehandlung nicht indiziert. Klinisch äußert sich eine reversible Pulpitis durch einen positiven Sensibilitätstest, der jedoch mitunter einen Schmerz auslösen kann. Perkussionsempfindlichkeiten, Spontan- oder Nachtschmerzen treten in diesem Stadium der Pulpitis noch nicht auf. Auch röntgenologisch kann eine reversible Pulpitis nicht diagnostiziert werden (Hülsmann, 2008). Misslingt aber die Wundheilung der Zahnpulpa, kommt es zu einer irreversiblen Pulpitis, also einer unumkehrbaren Entzündung mit anschließender Zerstörung der Pulpa (Bjorndal *et al.*, 1998; Bjorndal und Darvann, 1999; Cooper *et al.*, 2014). In diesem Fall reagieren die Nervenanteile des Pulpengewebes auf den Sensibilitätstest positiv, allerdings mit einem reizüberdauernden Schmerz. Spontan- und Nachtschmerzen sind bei einer irreversiblen Pulpitis typisch und äußern sich meist durch einen pulsierenden, pochenden Schmerz. Röntgenologisch können oft schon Veränderungen im Bereich der Wurzelspitze, also eine beginnende Parodontitis apicalis, festgestellt werden (Hülsmann, 2008). Bei einer manifestierten Parodontitis apicalis ist der größte Teil, wenn nicht sogar das gesamte Pulpengewebe bereits devital und nekrotisch. Somit gibt es meist keinerlei Reaktion mehr auf die Sensibilitätsprobe. Durch die apikale Entzündung tritt meist ein starker Schmerz beim Perkussionstest auf. Oft klagen Patienten über Schmerzen beim Kauen oder Aufbeißen (Hülsmann, 2008).

1.2 Aktuelles Vorgehen in der endodontischen Therapie

Für die zahnärztliche Diagnostik gibt es verschiedene Indikatoren, die die Notwendigkeit einer Wurzelkanalbehandlung anzeigen. Zum einen weist eine stark schmerzhafte Sensibilitätsprobe durch einen Kältereiz auf eine irreversible Pulpitis hin, wohingegen eine negative Sensibilitätsprobe ein Hinweis auf einen devitalen Zahn sein könnte. Letzteres kann jedoch auch bei überkronten oder tief gefüllten Zähnen auftreten, beispielsweise durch verminderte Leitfähigkeit der jeweils verwendeten Materialien. Des Weiteren ist der vertikale Perkussionsschmerz ein Zeichen für eine Entzündung im und um den apikalen Bereich eines Zahnes (Hülsmann, 2008).

Wie bereits erwähnt sind deutliche, sichere Hinweise auf die irreversible Pulpitis oder devitale Pulpa und somit die Notwendigkeit einer Wurzelkanalbehandlung zum einen Nachtschmerzen. Dies sind starke pochende Schmerzen, welche den Patienten vom Schlafen abhalten. In fortgeschrittenem Stadium eine im Röntgenbild erkennbare apikale Aufhellung, welche eine entzündliche Veränderung der apikalen Strukturen, genannt Parodontitis apicalis, verbildlicht.

Bleibt aufgrund der klinischen Symptomatik und der vom Zahnarzt erhobenen Befunde kein Zweifel an einer irreversiblen Entzündung der Pulpa, sind als nächste Behandlungsschritte die Vitalexstirpation und eine sich anschließende Wurzelkanalbehandlung indiziert.

Die Wurzelkanalbehandlung ist ein letzter Versuch der Zahnerhaltung ohne den Einsatz chirurgischer Maßnahmen wie beispielsweise der Durchführung einer Wurzelspitzenresektion. Das primäre Ziel besteht in der möglichst weitgehenden Elimination der im Wurzelkanalsystem befindlichen Mikroorganismen und der Herstellung eines bakteriendichten Verschlusses des Wurzelkanals (DGZMK; Endodontologie; Hülsmann, 2008). Der nach heutiger Lehrmeinung optimale Arbeitsablauf einer Wurzelkanalbehandlung setzt sich aus mehreren Teilschritten zusammen. Zunächst sollten sowohl klinisch als auch röntgenologisch die Befunde und damit die Indikationsstellung zur Durchführung einer Wurzelkanalbehandlung verifiziert werden. Bei Bedarf sollte eine Lokalanästhesie des betreffenden Areals vorgenommen werden. Die Applikation von Kofferdam zur Isolation des Arbeitsfeldes ist als *conditio sine qua non* anzustreben, um eine zusätzliche Kontamination des

Wurzelkanalsystems durch im Speichel befindliche Bakterien auszuschließen. Der nächste Schritt besteht darin, einen Zugang zum Wurzelkanalsystem zu schaffen. Zu diesem Zweck wird bei Prämolaren und Molaren mittels rotierender Instrumente das Dach der Pulpakammer abgetragen und so der Zahn trepaniert. Bei Frontzähnen wird der Zugang direkt zur Pulpa geschaffen. Ein Abtragen des Pulpakammerdachs ist hier nicht nötig, da Frontzähne in der Regel kein Pulpakammerdach aufweisen. Falls vorhanden, wird anschließend das erkrankte vitale oder das nekrotische Gewebe vollständig aus der Pulpakammer entfernt und es werden die Eingänge der Wurzelkanäle dargestellt. Mittels geeigneter Instrumente wird verifiziert, dass die Wurzelkanäle bis in die apikale Region durchgängig sondierbar sind. Nach der sich anschließenden Längenbestimmung der Wurzelkanäle kann die mechanische und chemische Aufbereitung der Wurzelkanäle erfolgen. Die präzise Arbeitslänge, die Länge der Aufbereitung und späteren Wurzelkanalfüllung des Zahnes, sollte bestimmt werden, damit eine regelrechte Aufbereitung des Wurzelkanals bis zum Apex erfolgen kann. Für diesen Schritt haben sich zwei Varianten der Längenbestimmung des Wurzelkanals durchgesetzt. Es gibt einerseits die Möglichkeit der elektrometrischen Längenmessung des Wurzelkanals. Hierbei wird mit einem elektronischen Messgerät der Widerstand zwischen Wurzelhaut und Schleimhaut gemessen. Wird die Wurzelspitze erreicht, fällt dieser Widerstand ab und somit hat das Messgerät die apikale Konstriktion erreicht. Nun kann die Strecke bis zum apikalen Foramen bestimmt werden (D'Assuncao *et al.*, 2014; Gehlot *et al.*, 2016).

Andererseits kann eine Handfeile, mindestens der ISO-Größe 15, nach Gefühl in den Wurzelkanal eingebracht werden. Eine Feile der ISO-Größe 15 ist mindestens erforderlich, da erst ab dieser Größe eine ausreichende Sichtbarkeit der Feile im Röntgenbild gewährleistet werden kann. Wenn der Behandler der Meinung ist, die Feilenspitze habe die apikale Konstriktion erreicht, wird dies röntgenologisch verifiziert. Bestätigt das Röntgenbild das Erreichen des apikalen Foramens, kann auch hier wieder die Länge abgemessen werden.

Anschließend folgt die mechanische und chemische Aufbereitung des Wurzelkanals auf die zuvor bestimmte Länge. Die apikale Konstriktion muss in jedem Fall erhalten bleiben, um ein Überfüllen des Wurzelkanals in das periapikale System zu vermeiden (Peters *et al.*, 2004). Ziele dieser Aufbereitung sind sowohl die Entfernung des

vitalen und nekrotischen Gewebes als auch die Reduzierung der im Wurzelkanal vorhandenen Mikroorganismen. Hierzu sollte mithilfe geeigneter Spülungen der Wurzelkanal und seine eventuellen Seitenkanäle desinfiziert und so die Zahl der vorhandenen Mikroorganismen stark reduziert werden (Safavi *et al.*, 1990; Trope und Debelian, 2009).

Des Weiteren soll der Wurzelkanal so präpariert werden, dass eine randständige Obturation möglich ist (Hülsmann, 2008). Der Wurzelkanal kann nun entweder manuell oder maschinell mit einem Endodontie-Winkelstück und den dazugehörigen Endodontie-Feilen aufbereitet werden. Die manuelle Aufbereitung erfolgt in der Regel mit Handinstrumenten, meist aus Edelstahl, in aufsteigender ISO-Größe, die maschinelle Aufbereitung hingegen wird mit Nickel-Titan-Feilen durchgeführt.

Bei beiden Varianten sollte die chemische Aufbereitung des Wurzelkanals mithilfe von Spüllösungen erfolgen. Natriumhypochlorit hat sich als besonders effektiv zur Auflösung vitalen und devitalen Gewebes bewährt und wirkt zudem antibakteriell. Der Wurzelkanal sollte nach jedem Aufbereitungsschritt ausreichend gespült werden, um Mikroorganismen und Debris aus dem Wurzelkanal zu entfernen. Als Abschlusspülung nach dem Aufbereiten des Wurzelkanals mit der letzten Feile wird mit Ethylendiamintetraacetat (EDTA) gespült. Als Chelator bindet EDTA Calciumionen des Dentins und sorgt somit für ein Entfernen der Schmierschicht, welche die Eingänge der Dentintubuli verschließt, und ermöglicht somit die Freilegung dieser und somit eine erhöhte Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung (M. Hülsmann *et al.*, 2003; Hülsmann, 2008).

Sind die Wurzelkanäle aufbereitet und desinfiziert, können sie mittels geeigneter Materialien bakteriendicht von apikal bis koronal versiegelt werden (Brackett *et al.*, 2006). Als Goldstandard wird heute die Kombination von Guttaperchastiften mit einem dünnfließenden Sealer definiert (Hellwig, 2009). Beide Materialien sind radioopak. Hier wird zwischen Einstifttechnik, lateraler Kompaktion und thermoplastischen Wurzelfüllungen unterschieden. Eine möglichst in Rechtwinkeltechnik aufgenommene Zahnfilmaufnahme dient abschließend der röntgenologischen Kontrolle der Wurzelfüllung und verifiziert somit das Behandlungsergebnis (Hellwig, 2009).

Bei nicht ordnungsgemäßem Vorgehen droht eine Reinfektion des Wurzelkanalsystems durch verbliebene oder wieder eingewanderte Mikroorganismen. Mikroorganismen können infolge einer nicht ausreichenden mechanischen sowie chemischen Aufbereitung im Wurzelkanal verbleiben. Durch eine nicht ordnungsgemäße Wurzelkanalfüllung mit undichtem apikalen und koronalen Verschluss können Mikroorganismen aus der Mundhöhle wieder in den Wurzelkanal einwandern, periapikal ins Gewebe vordringen und dort eine Entzündung hervorrufen (Ray und Trope, 1995; Alves *et al.*, 1998).

Zusätzlich zu den Standardverfahren in der Endodontie gibt es auch regenerative Ansätze bei Wurzelbehandlungen. Diese haben das Ziel, beschädigte oder zerstörte Strukturen der Pulpa und des Dentins im Wurzelkanal mit gesundem Gewebe wieder zu ersetzen, sodass die Funktionen der Pulpa wieder hergestellt werden können und der betroffene Zahn seine Vitalität entweder behält oder wieder erlangt (Murray *et al.*, 2007). Wichtige Faktoren für eine regenerative Wurzelbehandlung sind Stammzellen, Wachstumsfaktoren und ein extrazelluläres Matrixgerüst (Hargreaves *et al.*, 2011). Beide Verfahren verfolgen jedoch dasselbe Ziel und zwar wie von der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) klar vorgegeben: „Eine langfristige Erhaltung des Zahnes als funktionsfähige Kaueinheit und Erhaltung oder Wiederherstellung gesunder periradikulärer Strukturen“ (DGZMK).

1.3 Einsatz des Sealers

1.3.1 Erfolgskriterien einer endodontischen Behandlung

Die Erfolgsquote einer endodontischen Behandlung wird in der Literatur häufig mit der Zehn-Jahres-Überlebensrate der behandelten Zähne angegeben. Einer aktuellen Studie zufolge liegt die Erfolgsquote bei in vivo endodontisch behandelten Zähnen bei 80 % (Landys Boren *et al.*, 2015). Als erfolgreich gilt eine Wurzelkanalbehandlung, wenn es durch die Behandlung zu einem vollständigen Ausheilen der Läsion sowohl klinisch als auch radiologisch kommt (Friedman und Mor, 2004).

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den dauerhaften Therapieerfolg eines endodontisch behandelten Zahnes haben der apikale und koronale Verschluss des Zahnes, der sogenannte apical und coronal seal. Der apical seal wird erreicht durch die regelrechte Aufbereitung und Obturation des Wurzelkanals bis kurz vor das Foramen apicale. Der coronal seal wird erreicht durch den dichten Verschluss der Wurzelkanaleingänge. Dies wird heutzutage meist mit Kunststofffüllungen und dem entsprechenden Dentin-Bonding-Agent gestaltet (Lehmann *et al.*, 2012). Zusätzlich kann anschließend eine Krone auf diesen Zahn zementiert werden, um den Verschleiß und somit die potenzielle Gefahr einer Undichtigkeit der Kunststofffüllung zu vermeiden sowie den Zahn optimal abzudichten und ihn als funktionelle Kaueinheit wiederherzustellen. Dies kann beispielsweise mit sogenannten Endokronen vorgenommen werden. Endokronen sind keramische Vollkronen, deren Form defektorientiert gefertigt wird. Statt eines konventionellen plastischen Aufbaus vor der Kronenversorgung wird die gesamte Kavität durch die Endkrone ausgefüllt. Zudem können Ausläufer modelliert werden. So kann die Krone sowohl im koronalen Teil des Wurzelkanals, als auch an der verbliebenen koronalen Restzahnhartsubstanz adhäsiv befestigt werden (Lehmann *et al.*, 2012)

Zähne, die nach der erfolgten Wurzelkanalbehandlung mit einer Krone versorgt wurden und somit koronal abgedichtet sind, haben eine deutlich höhere Zehn-Jahres-Überlebensrate von 91,3 %, wohingegen die Zähne, die nicht mit einer Krone versorgt wurden, nur eine Überlebensrate von 76 % aufweisen (Landys Boren *et al.*, 2015).

Ein Hauptgrund für den endodontischen Misserfolg liegt in einer möglichen Undichtigkeit des koronalen Verschlusses. Ist dieser nicht oder nicht vollständig erfolgt, können Bakterien von koronal in den Wurzelkanal einwandern und diesen durchdringen. Durch einen nicht regelrechten apikalen Verschluss können diese eingewanderten Bakterien in die periapikalen Strukturen vordringen und diese schädigen (Ray und Trope, 1995; Alves *et al.*, 1998).

Um eine Wurzelkanalfüllung optimal abzudichten und auch die eventuell vorhandenen Seitenkanäle zu verschließen, werden niedrig visköse Füllmaterialien, sogenannte Sealer, verwendet. Auf Grund ihrer hohen Fließfähigkeit erreichen sie die Bereiche, die mit den Guttaperchastiften nicht zu erreichen sind. Sealer sollen Kanalunebenheiten ausgleichen und den Hohlraum zwischen Wurzelfüllmaterial und Wurzelentin abdichten. Dadurch wird die Durchlässigkeit der Wurzelkanalfüllung reduziert und somit auch die Vermehrung von Residualkeimen verhindert (Branstetter und von Fraunhofer, 1982).

Überlebende oder einwandernde Mikroorganismen, vor allem im apikalen Teil des Wurzelkanals, sind der Hauptgrund für einen endodontischen Misserfolg (Stuart *et al.*, 2006). Als Hauptproblemkeim wurde *Enterococcus faecalis* identifiziert. Dieses fakultativ anaerobe, gram-positive Bakterium ist resistent gegen Salze wie gegen Alkohole und kann sowohl einem pH-Wert von bis zu 9,6 als auch einer Temperatur von 60° Celsius für 30 Minuten widerstehen (Stuart *et al.*, 2006). Dadurch ist er kaum zu kontrollieren oder vollständig aus dem Wurzelkanal zu entfernen. Zusätzlich ist *Enterococcus faecalis* Dentintubuli-gängig. Nach drei Wochen dringt er bis zu 1000 µm tief in die Dentintubuli ein und kann von dort aus Entzündungen des Gewebes hervorrufen (Haapasalo und Orstavik, 1987). Aufgrund dieser Eigenschaften von Bakterien ist es essenziell, dass die Sealer die Dentintubuli ausreichend penetrieren. Auf diese Weise können die eventuell noch vorhandenen Mikroorganismen entweder abgetötet oder aber eingeschlossen werden, was eine Reinfektion verhindert (Cobankara *et al.*, 2004; Raina *et al.*, 2007; Balguerie *et al.*, 2011).

1.3.2 Eigenschaften der Sealer

Obwohl die Eigenschaften der heutigen Sealer klinisch als zufriedenstellend gelten, wird in der Forschung immer noch ein besonderes Augenmerk auf die Weiterentwicklung der Sealer und ihrer abdichtenden Eigenschaften gelegt (Balguerie *et al.*, 2011). Viele Sealer weisen heutzutage noch keine zufriedenstellende Abdichtung des Wurzelkanals auf. Hinzu kommt, dass von ihnen eine geringe, meist initiale Zytotoxizität ausgeht (Zhang *et al.*, 2010; Balguerie *et al.*, 2011)

Zu den wünschenswerten Eigenschaften eines Sealers gehören vor allem eine optimale Abdichtungsfähigkeit, eine antibakterielle Wirkung, eine gute Biokompatibilität und eine schnelle und weite Verteilung des Materials. Der Kontaktwinkel gibt an, wie sich eine Flüssigkeit auf einer soliden Fläche verteilt, womit die Interaktion zwischen der Flüssigkeit und dem soliden Material gemessen werden kann (Kontakiotis *et al.*, 2007). Ein geringer Kontaktwinkel bedeutet also eine schnelle und weite Verteilung des flüssigen Materials auf dem festen Material (Abbildung 1).

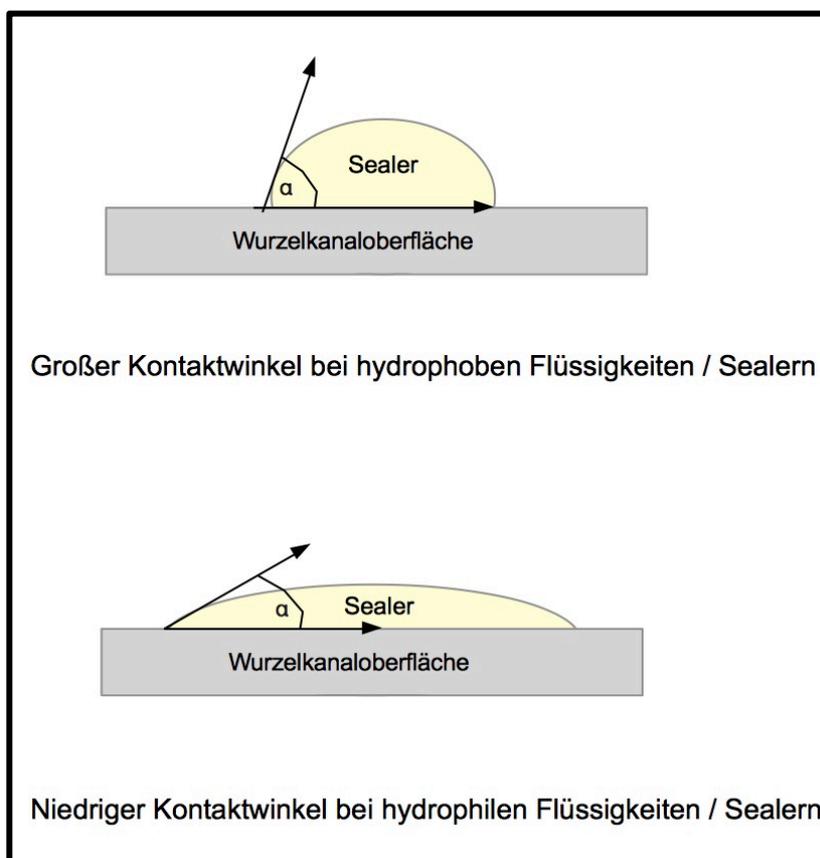


Abbildung 1: Vergleich des Kontaktwinkels

Je nach chemischer Zusammensetzung lassen sich die Sealer in verschiedene Stoffgruppen aufteilen. Eine wesentliche Stoffgruppe bilden die Calciumhydroxid-basierten Sealer wie beispielsweise Apexit® (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Fürstentum Liechtenstein). Ihre Vorteile liegen vor allem in der Gewebeverträglichkeit und der geringen Zytotoxizität (Huang *et al.*, 2002; Desai und Chandler, 2009). Als Nachteil wird bei dieser Sealerklasse die erhöhte Wasserlöslichkeit von Calciumhydroxid beschrieben (Desai und Chandler, 2009).

Zinkoxid-Eugenol-Zemente, wie beispielsweise Tubliseal™ (Kerr Corporation, Kalifornien) bilden eine weitere Stoffgruppe der Sealer. Im Gegensatz zu den Calciumhydroxid-basierten Sealern setzen Zinkoxid-Eugenol-Zemente bei Kontakt mit Wasser Eugenol frei. Ein Vorteil der Zinkoxid-Eugenol-Zemente besteht in einer adäquaten Versiegelung des Wurzelkanals und somit im Verhindern der Penetration von Mikroorganismen aus dem intraoralen Speichelmilieu in den Wurzelkanal (Pashley *et al.*, 1988). Im Gegensatz zu den Calciumhydroxid-basierten Sealern weisen die Zinkoxid-Eugenol-Zemente eine höhere Zytotoxizität auf. Eugenol ist schon bei geringen Konzentrationen in der Lage, die Zellatmung und Zellteilung zu verhindern (Hume *et al.*, 1984). In einer Untersuchung wurde festgestellt, dass Zinkoxid-Eugenol-Zemente entzündetes Gewebe schädigen und somit die Entzündung verstärken können. In einer weiteren Studie wurde gezeigt, dass es in entzündetem Gewebe durch die Präsenz von Zinkoxid-Eugenol-Sealer zu einer schwächeren Fibrinbildung und Fibrinkapselbildung um das entzündete Gewebe kommt. Diese Fibrinkapsel ist jedoch wünschenswert, da sie die Entzündung eingrenzt und somit die Ausbreitung verhindert (Suzuki *et al.*, 1985; Scarparo *et al.*, 2009).

Eine weitere Gruppe der niedrig viskösen Wurzelkanalfüllmaterialien repräsentieren die Epoxidharz-basierten Sealer. Zu dieser Gruppe gehören beispielsweise das weitverbreitete Material AH 26® und dessen Nachfolger AH Plus® (Dentsply Sirona, York, USA). Die Epoxidharz-basierten Sealer sind antibakteriell wirksam. In einer Studie wurde die antibakterielle Wirkung verschiedener Sealmaterialien verglichen. Infizierte Zähne wurden mit verschiedenen Sealern gefüllt und anschließend die verbliebene Bakterienpopulation verglichen. AH Plus® sowie Mineral-Trioxid-Aggregat-basierte Sealer (MTA-Sealer, Erläuterung im nächsten Absatz) wiesen hierbei eine deutlich geringere Bakterienanzahl nach einer Dauer von sieben Tagen

auf (Prestegaard *et al.*, 2014). Als Goldstandard für die in der heutigen Wurzelfülltechnik verwendeten Materialien hat sich aus dieser Gruppe die Kombination von AH Plus® als Sealer in Verbindung mit Guttaperchastiften als Wurzelkanalfüllmaterial etabliert (Carvalho *et al.*, 2014). Als Vorteile der Epoxidharz-basierten Sealer gelten vor allem die überlegenen Abdichtungseigenschaften und die größere Eindringtiefe in die Dentintubuli (Santos *et al.*, 2010; Balguerie *et al.*, 2011). Als nachteilig kann die vor allem initial etwas erhöhte Zytotoxizität dieser Sealer gesehen werden (Camargo *et al.*, 2014; Konjhodzic-Prcic *et al.*, 2015). Am Beispiel von AH Plus® ist diese Zytotoxizität nur initial zu beobachten. In den ersten 48 Stunden nach der Applikation weist AH Plus® eine hohe Zytotoxizität auf. Jedoch kann schon nach sieben Tagen keine Toxizität mehr nachgewiesen werden (Miletic *et al.*, 2005)

Als weitere Stoffgruppe finden hydraulische Silikatzemente auf Mineral-Trioxid-Aggregat-(MTA-)Basis (MTA Sealapex®, Angelus Indústria de Produtos Odontológicos, Londrina, Brazil) Verwendung in der Endodontie. MTA ist ein modifizierter Portlandzement bestehend aus Tricalciumsilikat, Dicalciumsilikat, Tricalciumaluminat und weiteren Mineraloxiden. Im Gegensatz zu den Epoxidharz-basierten Sealern besitzen MTA-basierte Sealer eine sehr gute Biokompatibilität und zeigen kaum oder keine Zelltoxizität (Assmann *et al.*, 2015; Mestieri *et al.*, 2015). Wie bei den Epoxidharz-basierten Sealern lässt sich auch bei der Anwendung MTA-basierter Sealer eine adäquate Abdichtung des Wurzelkanalsystems beobachten (Assmann *et al.*, 2015; McMichael *et al.*, 2016). Es gibt aktuell, trotz der bekannten guten Biokompatibilität von MTA, noch nicht sehr viele MTA-basierte Sealer für Wurzelbehandlungen auf dem Markt. Ein Beispiel hierfür wäre Endoseal MTA (Endocem, Südkorea)

Als abschließende Stoffklasse für die Abdichtung von Wurzelkanälen kommen auch speziell modifizierte Calciumsilikat-basierte Sealer, wie beispielsweise Total Fill® BC Sealer™ in der endodontischen Behandlung zum Einsatz. Diese Sealer werden synonym auch als biokeramische Sealer bezeichnet (Knupfer *et al.*, 2014). Durch eine Imprägnierung mit biokeramischen Nanopartikeln sollen sie sich vor allem durch eine sehr gute Biokompatibilität und eine starke antimikrobielle Wirkung aus und suffiziente Abdichtung des Wurzelkanals auszeichnen (Zhang, Li, *et al.*, 2009; Zhang, Shen, *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010).

1.3.3 Anforderungen an die Wurzelkanalfüllung

Um eine Schädigung periapikaler Strukturen zu vermeiden, muss die Zelltoxizität des Sealmaterials beachtet werden. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass AH Plus® eine deutlich höhere Toxizität aufweist als beispielsweise MTA (ProRoot® MTA) oder Sealer auf Calciumsilikat-Basis wie beispielsweise iRoot SP® (auf dem deutschen Markt Total Fill® BC Sealer™) (Zhang *et al.*, 2010; Knupfer *et al.*, 2014). Sowohl Total Fill® BC Sealer™ als auch MTA-Zemente sind in hohem Maße biokompatibel und regen zusätzlich die Mineralisation von Knochen an, indem sie die Osteoblastenaktivität steigern (W. Zhang *et al.*, 2010; Assmann *et al.*, 2015). Aus diesem Grund scheint es sinnvoll zu untersuchen, inwieweit diese Zementklassen auch die nachgewiesenen guten technischen Materialeigenschaften von AH Plus® als Sealer erreichen oder sogar übertreffen können.

Damit das Ziel eines optimal abgefüllten Wurzelkanals erreicht wird, muss die Wurzelfüllung einerseits eine suffiziente dreidimensionale Abdichtung des Wurzelkanals und andererseits auch einen ausreichenden apikalen Verschluss darstellen (Schilder *et al.*, 1967). Wird dies nicht erreicht, kann es zu einem erneuten Aufflammen der Entzündung innerhalb des Wurzelkanals durch einwandernde Mikroorganismen aus dem intraoralen Milieu kommen (Khayat *et al.*, 1993). Um dies zu verhindern und dem Ziel einer dauerhaft bakteriendichten Wurzelkanalfüllung möglichst nahezukommen, können die für die Wurzelkanalbehandlung existierenden Obturationsmaterialien auf ihre Eigenschaften hinsichtlich des Erreichens einer dreidimensionalen suffizienten Wurzelkanalfüllung untersucht werden.

Um die Durchlässigkeit einer Wurzelfüllung zu überprüfen, stehen unterschiedliche Testverfahren zur Verfügung. Die häufigste Verwendung der durchgeführten Methoden sind der Bakterienpenetrationstest, der Glukosepenetrationstest und der Farbstoffpenetrationstest (De-Deus *et al.*, 2008). Als Maß für die Dichtigkeit einer Wurzelfüllung gelten dann die durch die Wurzelkanalfüllung von koronal nach apikal durchgedrungenen Indikatoren des jeweiligen Tests.

Bei der Durchführung eines Bakterienpenetrationstests werden im Speichel vorkommende Bakterien in Kontakt mit dem koronalen Anteil der Wurzelfüllung gebracht. Apikal befindet sich ein Reservoir mit Phenolrot-Lösung, welche sich durch Kontakt mit Säuren gelb färbt. Die zu untersuchenden Bakterien sollten also

Säurebildner sein. So kann festgestellt werden, nach wie vielen Tagen die Lösung sich verfärbt und somit die Bakterien den Wurzelkanal passiert haben (Torabinejad *et al.*, 1990).

Bei dem Glukosepenetrationstest wird eine Glukoselösung, beispielsweise in einer Konzentration von 1 mol/l unter hydrostatischem Druck von koronal nach apikal in den abgefüllten und zu untersuchenden Wurzelkanal geleitet. An der Wurzelspitze befindet sich ein Reservoir mit Flüssigkeit, beispielsweise Wasser. Anhand der Konzentration von Glucose im Reservoir kann berechnet werden, in welchem Ausmaß die Glukoselösung erfolgreich durch die Wurzelkanalfüllung durchdringen konnte (Xu *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2007).

Wie bei allen Penetrationstests wird auch beim Farbstoffpenetrationstest die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung anhand der Menge des durch die Füllung gelangten Indikators, in diesem Falle des Farbstoffes, bestimmt. Als Farbstoffe für Dichtigkeitsprüfungen in der Endodontie werden vor allem Eosinrot und Methylenblau eingesetzt (Grobe, 2014).

Diese drei beschriebenen Methoden können zur Überprüfung der Dichtigkeit einer Wurzelfüllung sinnvoll eingesetzt werden. Jedoch hat eine Wurzelkanalfüllung nicht nur die Aufgabe einer Abdichtung von koronal nach apikal. Auch die Wände der Wurzelkanäle müssen möglichst suffizient abgedichtet werden, also eine dreidimensionale Abdichtung des Wurzelkanals mit Eindringen des Sealers in die Dentintubuli um dort eventuell verbliebene Mikroorganismen abzutöten oder einzuschließen, sodass eine erneute Vermehrung verhindert werden kann.

Es existieren verschiedene Versuchsaufbauten, um die Penetrationstiefe verschiedener Sealer in die Dentintubuli zu messen. Nach Instrumentierung und abgeschlossener Obturation der Wurzelkanäle und Vorbereiten der zu untersuchenden Proben kann die Eindringtiefe des Sealers in die Dentintubuli bestimmt werden.

Die Eindringtiefe kann mit einem Rasterelektronenmikroskop bestimmt werden. Unter der starken Vergrößerung dieses Mikroskops lässt sich die Penetrationstiefe der Sealer in die Dentintubuli darstellen und anschließend messen (Mader *et al.*, 1984; Kouvas *et al.*, 1998). Ein Vorteil dieser Methode besteht darin, dass der eingedrungene Sealer sichtbar gemacht werden kann, ohne dass seine Konsistenz

oder seine Zusammensetzung vorher verändert werden muss, wie es beispielsweise bei der Beimischung eines Farbstoffes oder Ähnlichem der Fall wäre.

Als weitere Messmethode wird häufig das Laserscanning mit einem Laserscanmikroskop eingesetzt. Bei dieser Vorgehensweise muss schon bei der Probenherstellung, genauer gesagt bei der Obturation, eine Veränderung im Versuchsaufbau vorgenommen werden.

Um den Sealer und seine Eindringtiefe in die Dentintubuli mit dem Laserscanmikroskop sichtbar zu machen, muss der Sealer mit einem Farbstoff vermischt werden. Für diese Färbung wird üblicherweise Rhodamin B eingesetzt. Es ist nicht auszuschließen, dass durch diese Beimischung wesentliche Materialeigenschaften des Sealers, wie das Abbinde- oder Penetrationsverhalten, verändert werden könnten. Durch die Einfärbung des Sealers und die Fähigkeit des Mikroskops, diese Färbung deutlich darzustellen, kann die Eindringtiefe in die Dentintubuli mit hoher Präzision bestimmt werden (Neumann, 2010; Kuci *et al.*, 2014).

In den Vorversuchen dieser Dissertation wurden Proben mit diesen verschiedenen Messmethoden untersucht und analysiert. Es stellte sich ebenfalls heraus, dass sich das Laserscanmikroskop für eine mikrometer-genaue Darstellung der Eindringtiefen eines Sealers in die Dentintubuli am Besten eignet. Durch die Einfärbung des Sealers mit dem Fluoreszenzfarbstoff lässt sich genau feststellen wie weit die Sealer in die Dentintubuli eingedrungen sind.

2 Fragestellung

Die vorliegende Studie untersucht die Penetrationstiefen von verschiedenen Sealern in die Dentintubuli und die prozentuale Benetzung des Wurzelkanalumfangs mithilfe des Fluoreszenzfarbstoffes Rhodamin B und eines konfokalen Laserscanmikroskops (CLSM). Verglichen wurden der Epoxidharz-Sealer AH Plus® und zwei Mineral-Trioxid-Aggregat-Präparate (ProRoot® MTA und Medcem® MTA mit einem modernen, biokeramischen Sealer (Total Fill® BC Sealer™) ebenfalls auf Calciumsilikat-Basis. Die drei erstgenannten Sealer wurden in lateraler Kompaktion verwendet und Total Fill® BC Sealer™ mit dem Einstiftverfahren, mit den dazugehörigen Guttaperchastiften, wie vom Hersteller empfohlen.

Hypothese 1

MTA basierte Sealer weisen eine ähnliche Eindringtiefe in die Dentintubuli auf wie AH Plus®

Hypothese 2

Der biokeramische Total Fill® BC Sealer™ weist eine ähnliche Eindringtiefe in die Dentintubuli auf wie AH Plus®

Hypothese 3

Der biokeramische Total Fill® BC Sealer™ weist eine höhere Eindringtiefe in die Dentintubuli auf als die beiden MTA Präparate

3 Material und Methode

3.1 Versuchsaufbau

3.1.1 Zähne

Es wurden 48 extrahierte menschliche Frontzähne der zweiten Dentition für die Durchführung der Vorversuche und der Hauptversuche in der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Ludwig-Maximilians-Universität München gesammelt.

3.1.2 Längenbestimmung der Wurzelkanäle

Um eine adäquate Wurzelfüllung zu ermöglichen, wurden vor der Aufbereitung der Wurzelkanäle deren Längen bestimmt. Ziel war es, die empfohlene Arbeitslänge von etwa einem Millimeter vor dem röntgenologischen Apex zu erreichen. In dieser Studie wurde die Arbeitslänge zuerst mithilfe des Endo Training Model Castillo with Raypex 6 (VDW Dental, München, Deutschland) elektrometrisch gemessen und anschließend röntgenologisch verifiziert.

3.1.3 Wurzelkanalaufbereitung

Die Wurzelkanäle der extrahierten Frontzähne wurden mithilfe von rotierenden, passiv schneidenden Nickel-Titan-Feilen (Mtwo®, VDW Dental) auf die ISO-Größe 35 mit einem Taper von 04 bis einen Millimeter vor die apikale Konstriktion aufbereitet.

3.1.4 Spüllösungen

3.1.4.1 Natriumhypochlorit (NaOCl)

In jeden Wurzelkanal wurden während der Aufbereitung zehn Milliliter Natriumhypochlorit (3 %) als Spüllösung appliziert. Aufgrund der gewebsauflösenden und der antimikrobiellen Wirkung von Natriumhypochlorit wurde diese Spüllösung gewählt.

3.1.4.2 Ethylendiamintetraacetat (EDTA)

EDTA ist ein flüssiger Chelator. Chelatoren haben demineralisierende Eigenschaften und werden daher zur Entfernung der Schmierschicht im Dentinkanal verwendet. Fünf Milliliter dieser Spüllösung wurden nach der Aufbereitung in jeden Kanal als abschließende Spülung appliziert. Die Spüllösung wurde in einer 17-prozentigen Konzentration gewählt. Durch die kombinierte Anwendung mit Natriumhypochlorit kommt es zu einer vollständigen Entfernung der Schmierschicht.

3.1.5 Verwendete Sealer

Sowohl für ProRoot® MTA als auch Medcem MTA® musste vor dem Versuch das ideale Mischverhältnis bestimmt werden. Anhand eines Tests mit steigender Wassermenge wurde das optimale Mischverhältnis für beide Materialien bestimmt. Hierbei wurde bei gleicher Pulvermenge die zuzufügende Wassermenge mikroliterweise erhöht. Ziel war es, eine mit AH Plus® und Total Fill® BC Sealer™ vergleichbare Konsistenz und Viskosität zu erreichen. Dies wurde in den Vorversuchen eruiert. Für jeden Wurzelkanal wurde im Rahmen der Obturation, materialunabhängig, dieselbe Menge Sealer verwendet.

3.1.5.1 AH Plus®

Laut Herstellerangaben basiert das Wurzelfüllungsmaterial AH Plus® auf Epoxid-Amin-Polymer-Basis (DENTSPLY DETREY GmbH, Konstanz, Germany). Für diesen Versuch wurde eine Doppelkammerspritze mit aufsetzbaren Mischkanülen verwendet, um eine homogene Vermischung der beiden Pasten und somit eine regelrechte Aushärtung des Sealers zu garantieren.

3.1.5.2 ProRoot® MTA

Laut Herstellerangaben basiert ProRoot® MTA auf Mineral-Trioxid-Aggregat. Geliefert wird es portionsweise abgepackt in Pulverform, welches manuell mit sterilem Wasser oder mit dem ProRoot-Liquid angemischt werden muss. Pulver und Liquid sollten eine Minute lang vermischt werden, dann kann das Gemisch appliziert werden (DENTSPLY Tulsa Dental Specialties, Tulsa, Oklahoma).

Ein Päckchen ProRoot® MTA auf enthält 500 mg. Für eine Wurzelkanalfüllung

wurden in dieser Studie 125 mg ProRoot® MTA verwendet. Somit ließen sich mit einem Päckchen ProRoot® MTA vier Wurzelkanäle abfüllen. 125 mg ProRoot® MTA wurden mit 80 µl destilliertem Wasser vermischt und als Sealer für die Wurzelfüllungen dieser Gruppe verwendet. In die Wurzelkanäle eingebracht wurde ProRoot® MTA mithilfe von Papierspitzen, die mit dem Material benetzt wurden und anschließend bis zur festgelegten Arbeitslänge in den Wurzelkanal gesteckt und an den Kanalinnenwänden abgestreift wurden. Anschließend wurde auch der Guttapercha-Point mit ProRoot® MTA benetzt und in den Wurzelkanal auf Arbeitslänge eingebracht.

3.1.5.3 Medcem® MTA

Laut Herstellerangaben basiert Medcem® MTA auf Mineral-Trioxid. Es wird in Kapselform dargereicht, die jeweils 0,35 g enthalten. Das Pulver sollte mit Wasser oder idealerweise mit sterilem Wasser manuell angemischt werden. Dabei ist die gewünschte Konsistenz und Wasserzugabe selbst zu wählen (Medcem GmbH, Weinfelden, Schweiz).

Eine Kapsel Medcem® MTA enthält 350 mg. Es wurden 125 mg Medcem® MTA mit 61 µl destilliertem Wasser vermischt und als Sealer in den Wurzelkanal appliziert. Die beigefügte Wassermenge ist nicht identisch mit der von ProRoot® MTA, da bei Medcem® MTA schon mit 61µl die gewünschte Konsistenz erreicht wurde.

Ebenso wie ProRoot® MTA wurde auch Medcem® MTA mithilfe von Papierspitzen in den Wurzelkanal eingebracht und der Guttapercha-Point mit Medcem MTA® benetzt, bevor auch er in den Wurzelkanal eingebracht wurde.

3.1.5.4 Total Fill® BC Sealer™

Laut Herstellerangaben ist Total Fill® BC Sealer™ ein röntgendichter biokeramischer Sealer auf einer Calciumsilikat-Basis. Dieser Sealer wird gebrauchsfertig in Spritzen geliefert und wird mit den Mischkanülen des Herstellers in den Wurzelkanal appliziert. (BUSA® Dental Instrumentation, One Brasseler Boulevard, Savannah, USA).

3.1.6 Fluoreszenzfarbstoff

Rhodamin B (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, München, Germany) wurde als Fluoreszenzfarbstoff für den Versuch verwendet. Bei jeder Obturation wurde dem Sealmaterial 0,1 % Rhodamin B-Farbstoff hinzugefügt und homogen vermischt, um eine gleichmäßige Verteilung des Farbstoffs zu ermöglichen.

3.1.7 Obturation der Wurzelkanäle

Die Obturation der Wurzelkanäle wurde mit Guttaperchastiften durchgeführt. Hierbei kamen zwei verschiedene Methoden zum Einsatz. Die Kanäle der Materialien ProRoot® MTA, Medcem® MTA und AH Plus® wurden mithilfe von nicht genormten Guttaperchastiften (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Schweiz) in lateraler Kompaktion abgefüllt. Die Kanäle des Materials Total Fill® BC Sealer™ wurden mit den dem Obturationssystem zugehörigen genormten Guttaperchastiften in der Einstifttechnik abgefüllt. Laut Hersteller haften die im Sealer enthaltenen biokeramischen Nanopartikel an den mit diesen Partikeln ummantelten Guttaperchastiften und ermöglichen so eine spaltfreie Obturation.

Abschließend wurde eine Röntgenkontrollaufnahme durchgeführt. Um die vollständige Aushärtung der unterschiedlichen Sealer zu garantieren, wurden die wurzelbehandelten Zähne eine Woche lang in einer feuchten Kammer bei konstanten 37 °C gelagert.

3.1.8 Herstellung der Schnitte

Nach dem Aufbereiten und Abfüllen der Wurzelkanäle wurde aus jedem Wurzelkanal apikal, mittig und koronal mit einem Abstand von vier, acht und zwölf mm ausgehend vom Apex eine einen Millimeter dicke Probe mithilfe einer Diamant-Präzisionssäge (Leco Vari/Cut 50, Leco Instrumente GmbH Mönchengladbach, Deutschland, Abbildung 2) horizontal herausgesägt. Anschließend wurden pro Zahn eine apikale, eine mittige und eine koronale Probe mit dem kaltpolymerisierenden Einbett-Kunststoff TechnoVit 4000 (Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim, Deutschland) nebeneinander auf einem Objektträger fixiert, sodass für jeden Zahn drei Proben auf einem Objektträger vorhanden waren. Fünf Zähne wurden als Kontrollgruppe ausgewählt, um eine Autofluoreszenz während des Laserscannings auszuschließen.

Es sollte gesichert sein, dass von den Zähnen selbst während des Laserscannings keine Fluoreszenz ausgeht, da diese die Messungen und Ergebnisse erheblich verfälschen würden.



Abbildung 2: Diamant-Präzisionssäge Leco Vari/Cut 50

Diese Proben wurden dann mit einem Nassschleif- und Poliersystem (Leco VP 100, Leco Instrumente GmbH Mönchengladbach, Deutschland, Abbildung 3) jeweils 60 Sekunden lang mit Sandpaperscheiben mit den Körnungen 600, 1000 und 1200 poliert. Nach der Politur wurden die Proben eine Woche lang luftgetrocknet, um Verfälschungen der Messung durch eingelagertes Wasser auszuschließen.



Abbildung 3: Nassschleif- und Poliersystem Leco VP 100

Dann wurden die Proben bei fünffacher Vergrößerung unter dem Lasermikroskop (Zeiss LSM 510) betrachtet. Mit einer Laserwellenlänge von 543 nm konnten die vier verschiedenen Sealer vermisch mit dem Fluoreszenzfarbstoff Rhodamin B visualisiert werden. Der Laser des Mikroskops beleuchtet hierbei Stück für Stück die verschiedenen Präparate. Die daraus resultierenden Fluoreszenzen der Präparate werden gemessen und aus diesen Messungen wird dann das Gesamtbild des Präparates erstellt. Damit die Penetrationstiefen genau bestimmt werden konnten, wurde von jedem Präparat das unter dem Lasermikroskop erstellte Bild als digitales Foto gespeichert. Um nun die Penetrationstiefen der verschiedenen Sealer messen zu können, wurde eine einen Millimeter lange Messskala unter derselben Vergrößerung abfotografiert und als Messskala in Adobe Photoshop (Adobe Systems Software Ireland Limited, Dublin, Irland) übernommen. Nun konnten mithilfe dieser Normmessskala und des Längenwerkzeugs von Photoshop die Eindringtiefen in μm gemessen werden.

3.2 Versuchsdurchführung – Vorversuche

Ziel der Vorversuche war es, die optimale Methode zu finden, mit der die Penetrationstiefe verschiedener Sealer in die Dentintubuli gemessen werden kann. Zur Auswahl standen drei verschiedene Methoden:

Das Laserscanning-Mikroskop, das Rasterelektronenmikroskop und die digitale Volumetomografie.

Für die Vorversuche wurden drei extrahierte menschliche Frontzähne benutzt. Jeder Wurzelkanal wurde maschinell mit Nickel-Titan-Feilen (Mtwo, VDW Dental) auf ISO-Größe 35, Taper 04 aufbereitet. Gespült wurde während der Aufbereitung mit zehn ml 3-prozentiger Natriumhypochlorit-Lösung und abschließend mit fünf ml 17-prozentiger EDTA-Lösung, um die Schmierschicht zu entfernen. Anschließend wurden alle Wurzelkanäle mit AH Plus® und Guttapercha in lateraler Kompaktion abgefüllt.

Bei dieser Methode wird ein Guttaperchastift der aufbereiteten ISO-Größe in den Wurzelkanal auf Arbeitslänge eingebracht. Anschließend werden dünnere Guttaperchastifte in den Wurzelkanal eingebracht. Nach jedem zusätzlichen Stift wird mit einem Spreader die Wurzelfüllung verdichtet. Lässt sich nach einer Verdichtung kein zusätzlicher Guttaperchastift suffizient in den Wurzelkanal einbringen, werden die Guttaperchastifte von koronal am Wurzelkanaleingang mit einem heißen Instrument abgetrennt und nach apikal verdichtet.

Anschließend wurde von jeder Wurzel mittig eine einen Millimeter dicke Scheibe als Probe horizontal herausgesägt. Für jede Methode war nun eine Probe vorhanden, die untersucht werden konnte. Bei der digitalen Volumetomografie reichte die Auflösung der Darstellung nicht aus, um die Penetrationstiefe der Dentintubuli zu gewährleisten (Abbildung 4).

Da jedoch die Darstellung des Rasterelektronenmikroskops lediglich in Graustufen funktioniert, war es mitunter schwierig, die mit Sealer gefüllten Dentintubuli von ungefüllten Dentintubuli mit Sicherheit zu unterscheiden (Abbildung 5). Bei der Laserscanning-Methode konnte durch die Mischung des Sealers mit dem Fluoreszenzmittel Rhodamin B deutlich dargestellt werden, wie weit der Sealer in die Dentintubuli eingedrungen war. Dann konnte die genaue Strecke ermittelt werden, auf welcher der Sealer in die Dentintubuli vordringt (Abbildung 6).

Aufgrund dieser Vorteile haben wir uns für die Hauptversuche für das Laserscanning entschieden. In der Literatur wird ebenfalls das Laserscanning als eine sichere Methode mit geringen Fehlerquellen beschrieben (Neumann, 2010).



Abbildung 4: Wurzelkanalfüllung im DVT

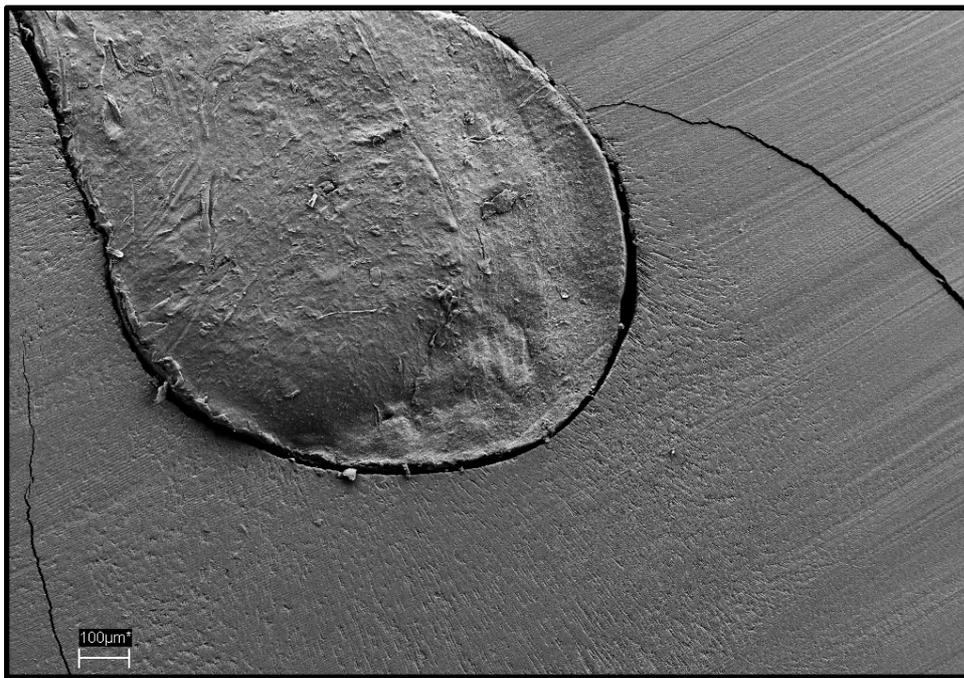


Abbildung 5: Wurzelkanalfüllung unter Rasterelektronenmikroskop

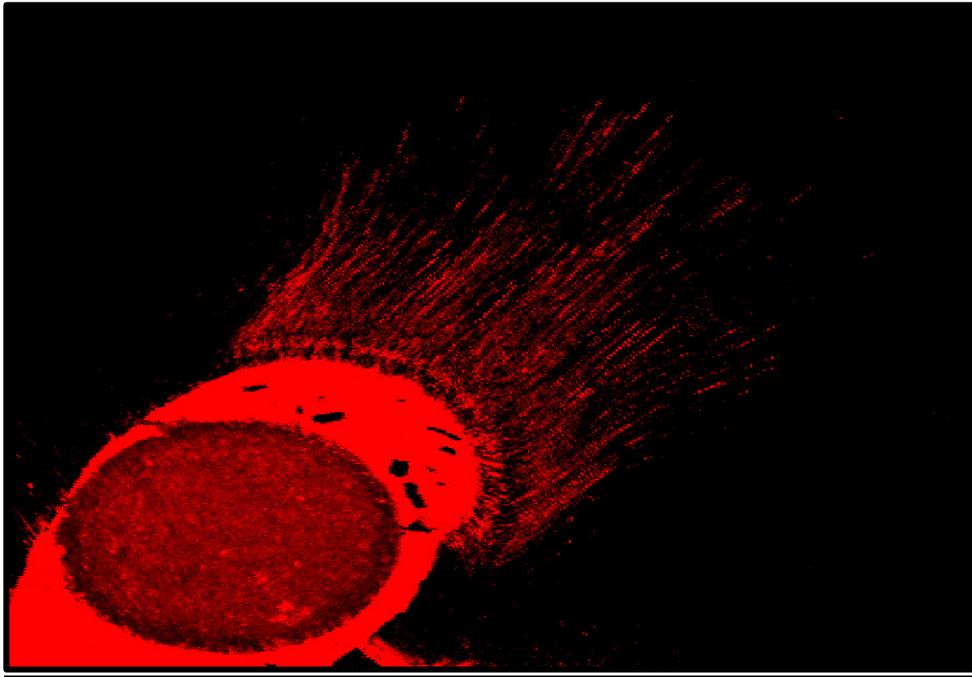


Abbildung 6: Wurzelkanalfüllung unter Lasermikroskop

3.3 Versuchsdurchführung – Hauptversuche

Für die Durchführung der Untersuchung kamen ausschließlich einwurzelige Frontzähne der zweiten Dentition, aus Oberkiefer und Unterkiefer, mit möglichst geraden Wurzelkanälen und ohne eine endodontische Vorbehandlung infrage. Zähne mit großflächigen Restaurationen oder kariösen Kavitäten wurden von dieser Studie ausgeschlossen.

Es wurden 45 Zähne, welche randomisiert in vier Gruppen à zehn Zähne unterteilt wurden, für die Hauptversuche verwendet.

Bis zu ihrer Verwendung wurden die extrahierten Zähne in einer Ringer-Acetat-Lösung mit 2 % Natriumazid bei einer konstanten Temperatur von 4 °C im Kühlschrank gelagert.

Fünf Zähne galten als Kontrollgruppe, um eine Autofluoreszenz der Zähne unter dem Lasermikroskop auszuschließen. Hierbei wurden lediglich die Wurzelkanäle aufbereitet, aber nicht abgefüllt.

Der erste vorbereitende Schritt bestand darin, sich einen Zugang zum Wurzelkanal der Zähne zu verschaffen. An einer zahnärztlichen Behandlungseinheit (KaVo estetica 1066, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß Deutschland) wurden die Zähne mit einem Rotring-Diamantbohrer (Komet Dental) mit einem roten Winkelstück (GENTLEpower, KaVo Dental) bei einer Geschwindigkeit von 200 000 U/min und einer Wasserkühlung von 50 ml/min trepaniert. Danach wurde der Wurzelkanaleingang mithilfe von Gates-Glidden-Bohrern (Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) und Müller-Bohrern (Komet Dental) dargestellt und der Kanal mit einer K-Handfeile ISO-Größe 10 (VDW Dental) vorsichtig auf Gängigkeit überprüft.

Die folgende Längenbestimmung des Wurzelkanals wurde ebenfalls mit einer K-Handfeile ISO-Größe 10 vorgenommen. Die genaue Länge wurde endometrisch abgemessen. Um dies zu ermöglichen, wurde ein endodontisches Trainingsmodell mit Natriumchloritlösung (0,9 %) verwendet, damit die notwendige elektrische Leitfähigkeit gewährleistet ist (Endo Training Model Castillo with Raypex 6, VDW GmbH), und röntgenologisch mit einer K-Handfeile ISO-Größe 15 verifiziert.

Nach der röntgenologischen Verifizierung der endometrisch ermittelten

Wurzelkanallänge wurden die Wurzelkanäle maschinell aufbereitet. Dies wurde ebenfalls an einer zahnärztlichen Behandlungseinheit (KaVo Dental GmbH) durchgeführt. Aufbereitet wurden die Kanäle bis einen Millimeter vor die apikale Konstriktion, auf eine ISO-Größe 35, mithilfe von Nickel-Titan-Feilen (Mtwo® VDW Dental, München, Deutschland).

Während der Aufbereitung wurde pro Kanal nach jeder ISO-Größe mit zwei ml 3-prozentiger Natriumhypochloritlösung gespült. Insgesamt wurden zehn ml Natriumhypochlorit pro Kanal appliziert. Abschließend wurde jeder Kanal mit fünf ml einer 17-prozentigen EDTA-Lösung gespült.

Anschließend erfolgte die Obturation der Wurzelkanäle. Hierbei wurde Guttapercha als Wurzelfüllmaterial verwendet. Für jede Gruppe wurden verschiedene Sealmaterialien eingesetzt. Die Zähne der Kontrollgruppe wurden mit AH Plus® als Sealer und in der lateralen Kompaktion mit Guttaperchastiften abgefüllt. Die zweite Gruppe wurde ebenfalls in lateraler Kompaktion abgefüllt, jedoch wurde hier als Sealer ProRoot® MTA verwendet. Bei der dritten Gruppe wurde Medcem® MTA als Sealer verwendet und die Abfüllmethode war ebenfalls die laterale Kompaktion. Die vierte und letzte Gruppe wurde mit dem Total Fill® BC Sealer™ (BUSA® Dental Instrumentation, Total Fill® BC Sealer™ benutzt und als Obturationsmaterial Total Fill® BC Points™ in der Einstifttechnik.

Bei allen Gruppen wurden die Materialien, welche als Sealer verwendet wurden, mit 0,1 % Rhodamin B vermischt, um eine lasermikroskopische Fluoreszenzmessung zu ermöglichen (Abbildungen 7 und 8).



Abbildung 7: Wurzelkanalbehandelter Unterkieferfrontzahn mit Rhodamin B-Färbung

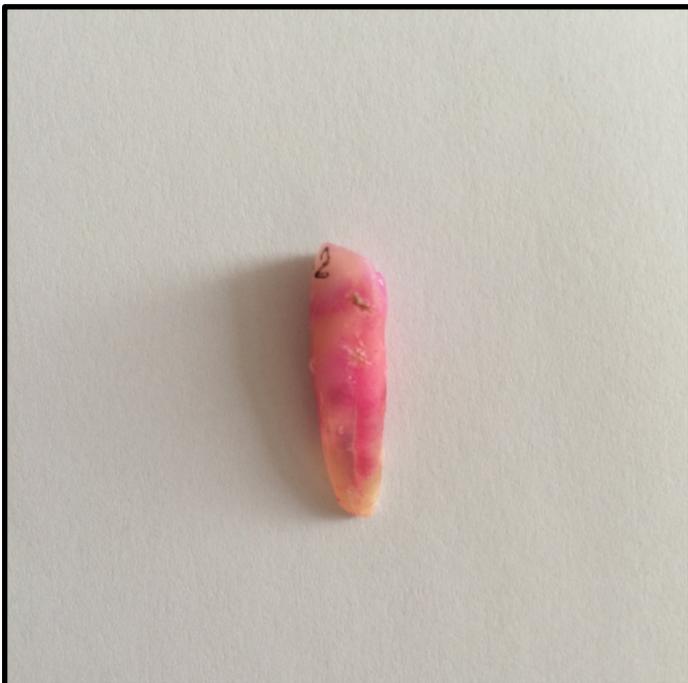


Abbildung 8: Wurzelkanalbehandelter Unterkiefereckzahn mit Rhodamin B-Färbung

Nachdem alle extrahierten Zähne endodontisch behandelt worden waren, wurde jeder einzelne Zahn abschließend geröntgt, um eine in Länge und Dichtigkeit adäquate Wurzelkanalfüllung zu verifizieren.

Um die Aushärtungszeiten der Materialien sicherzustellen, wurden die Zähne anschließend in einer feuchten Kammer bei konstanten 37 °C über 24 Stunden gelagert. Hiermit sollte eine der Mundhöhle ähnliche Umgebung simuliert werden.

Nach 24 Stunden wurden die Zähne aus der Kammer entnommen und für die lasermikroskopische Untersuchung vorbereitet. Vom Apex ausgehend wurden nach vier, acht und zwölf Millimetern jeweils einen Millimeter dicke Scheiben aus den Wurzeln aller Zähne gesägt (Leco Vari/Cut 50, Leco Instrumente GmbH Mönchengladbach, Deutschland), sodass für jeden Zahn drei Proben vorhanden waren (Abbildung 9). Insgesamt wurden also pro Gruppe 240 Proben hergestellt (Abbildung 10).

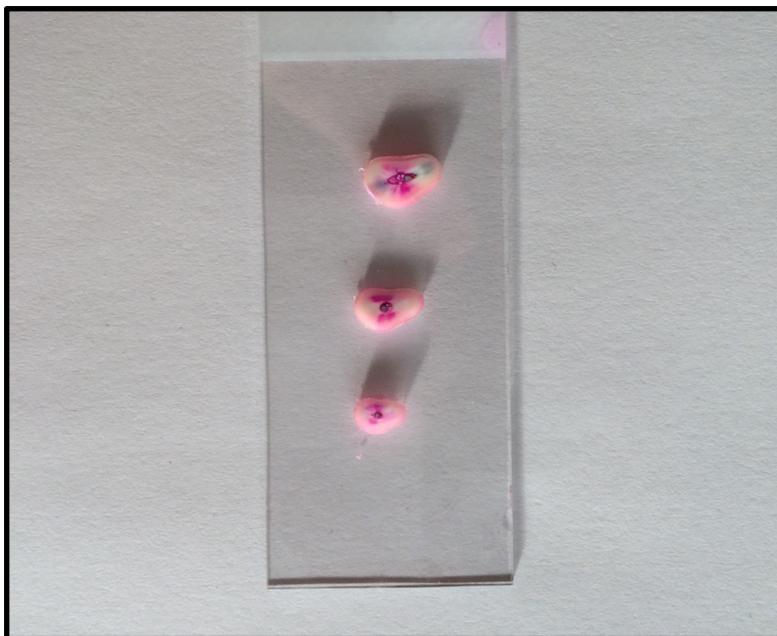


Abbildung 9: Drei Proben eines Zahnes auf einem Objektträger vor Fixierung

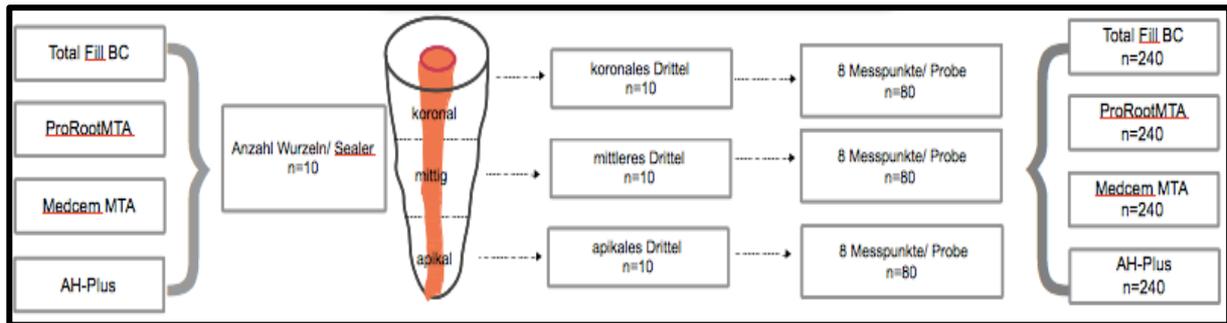


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Probenherstellung

Diese Proben wurden mit Technovit 4000 den Herstellerangaben entsprechend auf einen Objektträger geklebt.

Anschließend wurden die auf den Objektträgern fixierten Proben mit einem Nassschleif- und Poliersystem (Leco VP 100, Leco Instrumente GmbH Mönchengladbach) jeweils 60 Sekunden lang mit Sandpapierscheiben mit den Körnungen 600, 1000 und 1200 poliert (Abbildung 11).



Abbildung 11: Drei Proben nach Fixierung und Politur auf einem Objektträger

Nach der Politur wurden alle Objektträger drei Wochen lang getrocknet, um eine fehlerfreie lasermikroskopische Messung zu garantieren. Dann wurden die Proben aller vier Gruppen unter dem Lasermikroskop (Zeiss LSM 510, Carl Zeiss AG, 73447 Oberkochen Deutschland) mit einer Laserwellenlänge von 543 nm betrachtet und die Penetrationstiefe der verschiedenen Sealer mithilfe des Rhodamins und der Laserfluoreszenz bildlich dargestellt (Abbildungen 12 und 13).

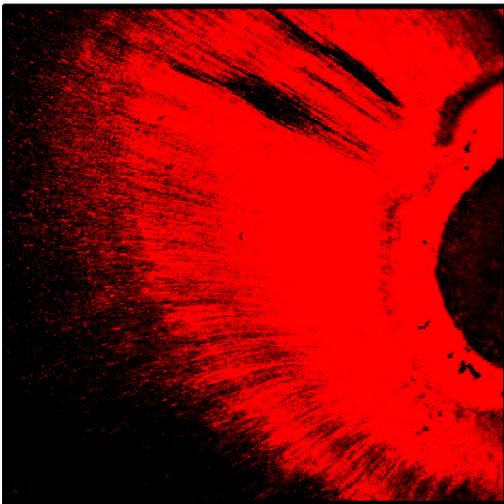


Abbildung 12: Mit Rhodamin visualisierte Sealerpenetration in die Dentintubuli

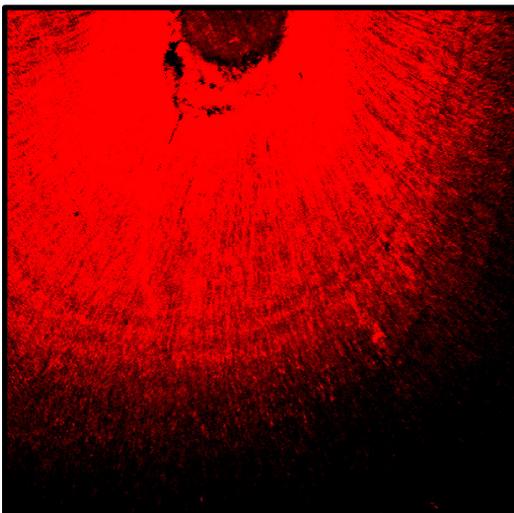


Abbildung 13: Gleichmäßige Sealerpenetration in die Dentintubuli unter dem LSM 510

Das projizierte Bild wurde mithilfe der dem LSM 510 zugehörigen Software gespeichert. In 45°-Schritten wurden insgesamt jeweils acht Messungen pro Probe vorgenommen (siehe Abbildung 14). Mithilfe des Computerprogramms Photoshop CS4 (Adobe Systems Software Ireland Limited, Dublin, Irland) konnten die Streckenlängen bestimmt werden. Unter der für die Proben festgelegten Vergrößerung wurde eine Messskala fotografiert, welche eine Strecke von 1000 μm darstellte. Diese wurde in Photoshop übertragen und die Strecken konnten mit dem Linealwerkzeug abgemessen werden. Für jedes Drittel des Wurzelkanals wurden die durchschnittliche Penetrationstiefe der Sealer mit Minimal- und Maximalwerten sowie die Standardabweichung festgehalten.

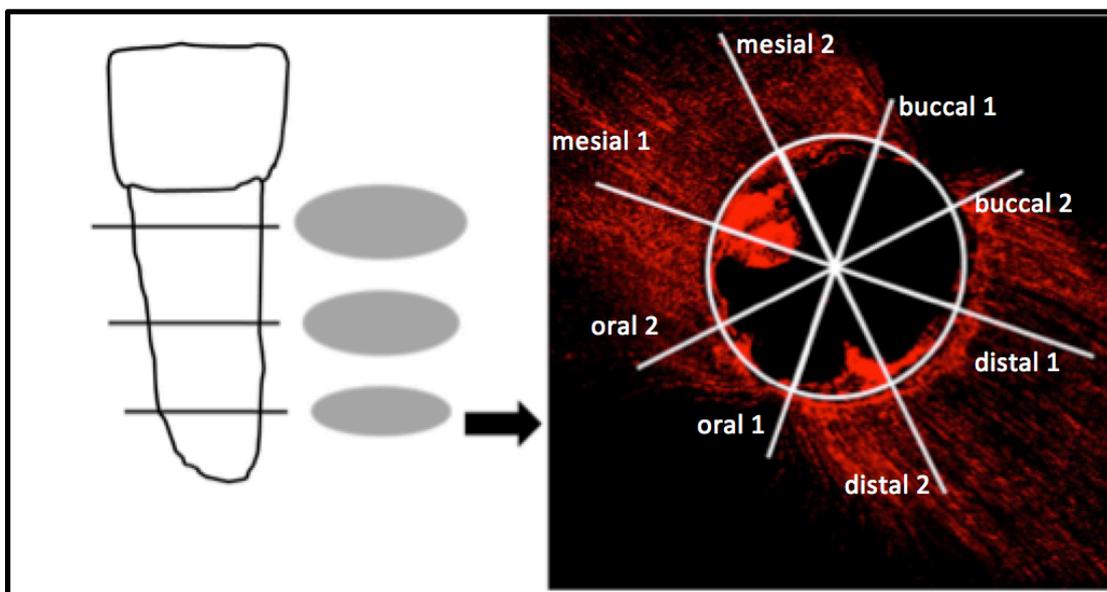


Abbildung 14: Visualisierung der Messpunkte in den Wurzel Dritteln

3.4 Statistische Auswertung

Die Daten wurden mithilfe des Statistikprogramms SPSS 23.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) analysiert. Ermittelt wurde die durchschnittliche Penetrationstiefe der verschiedenen Sealer in den jeweiligen Abschnitten des Wurzelkanals (4 mm, 8 mm und 12 mm vom Apex beginnend) mit Standardabweichung, den Minimal-, Maximal- und Medianwerten. Außerdem wurden der Durchschnitt des Gesamtumfangs und der Durchschnitt des von Sealer penetrierten Umfangs des Wurzelkanals mit Standardabweichungen erhoben. Anhand des Levene-Tests und des Kolmogorow-Smirnow-Tests wurde die Normalverteilung und Varianzhomogenität der ermittelten Daten getestet. Gesamtvergleiche zwischen den einzelnen Gruppen hinsichtlich der Penetrationstiefe und des penetrierten Wurzelkanalumfangs wurden mit dem nonparametrischen Kruskal-Wallis-Test vorgenommen. Paarweise verglichen wurde mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests. Die Bonferroni-Korrektur des Alpha-Levels wurde vorgenommen. Insgesamt wurden sechs Vergleiche durchgeführt (α -Level < 0,00833).

4 Ergebnisse

Eine Autofluoreszenz konnte bei keinem der fünf Zähne aus der Kontrollgruppe nachgewiesen werden. Alle Wurzelkanalfüllungen entsprachen den bereits erwähnten Kriterien von korrekter Länge und Homogenität. Die Ergebnisse zeigten zum Teil keine Normalverteilung oder Varianzhomogenität. Auf Grund dieser Tatsache wurden nonparametrische Tests zur Auswertung durchgeführt.

4.1 Penetrationstiefe in die Dentintubuli

Die Penetrationstiefen der unterschiedlichen Sealer im koronalen, mittleren und apikalen Drittel sind in den Tabellen 1 bis 3 und in Abbildung 15 veranschaulicht.

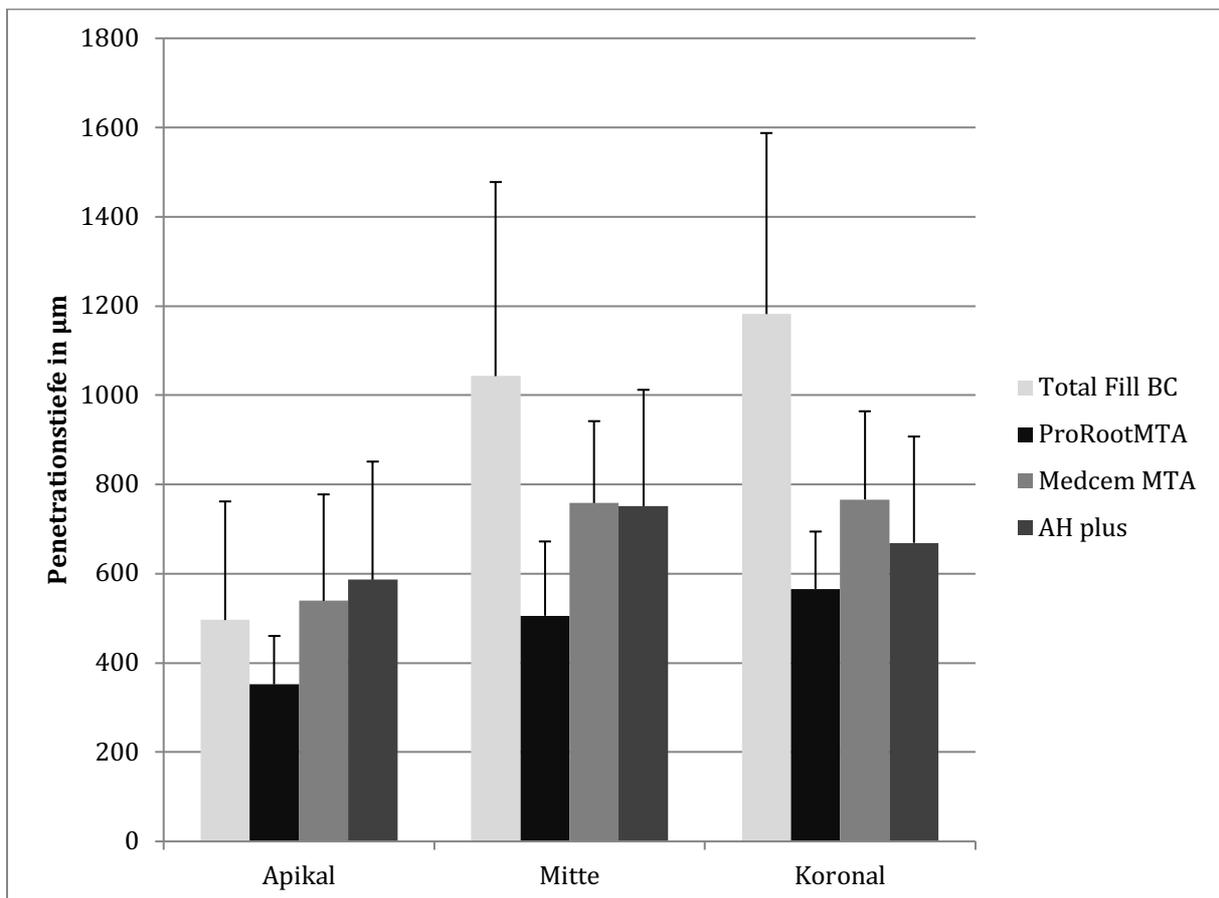


Abbildung 15: Bildliche Darstellung der Penetrationstiefe

Ergebnis der durchschnittlichen Penetrationstiefe der verschiedenen Sealer in die Dentintubuli mit Standardabweichung

<u>Koronal</u>	Total Fill® BC Sealer™	Medcem® MTA	ProRoot® MTA	AH Plus®
Durchschnitt (µm)	1182,11 (a)	766,44 (b)	565,99 (b)	669,11 (b)
Standardabweichung (µm)	405,54	197,63	128,47	238,33
Median (µm)	1235,69	767,19	536,31	616,25
Minimum (µm)	408,00	392,13	415,13	346,75
Maximum (µm)	1847,75	1006,75	826,13	1210,13
Kruskal-Wallis-Test	0,003			
Levene-Test	0,158			
Kolmogorow-Smirnow-Test	0,129			

Tabelle 1: Ergebnisse der Messungen der Penetrationstiefen im koronalen Drittel des Wurzelkanals

Dargestellt ist der durchschnittliche Wert der Penetrationstiefe mit Standardabweichung, Median, Minimum und Maximum in µm der vier Materialien in die Dentintubuli im koronalen Bereich des Wurzelkanals. Zusätzlich dargestellt sind die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests, des Levene-Tests und des Kolmogorow-Smirnow-Tests. Mit (a) gekennzeichnete Werte wiesen im nicht parametrischen Post-hoc Test (Mann-Whitney-U) einen signifikanten Unterschied zu mit (b) gekennzeichneten Werten auf.

<u>Mitte</u>	Total Fill® BC Sealer™	Medcem® MTA	ProRoot® MTA	AH Plus®
Durchschnitt (µm)	1042,89 (a)	758,30 (a)	505,84 (b)	751,45 (a, b)
Standardabweichung (µm)	435,04	183,61	166,41	260,68
Median (µm)	1061,50	794,50	498,06	794,44
Minimum (µm)	368,63	473,13	220,88	288,50
Maximum (µm)	1734,75	1055,25	803,00	1095,00
Kruskal-Wallis-Test	0,008			
Levene-Test	0,011			
Kolmogorow-Smirnow-Test	0.036			

Tabelle 2: Ergebnisse der Messungen der Penetrationstiefen im mittleren Drittel des Wurzelkanals

Dargestellt ist der durchschnittliche Wert der Penetrationstiefe mit Standardabweichung, Median, Minimum und Maximum in µm der vier Materialien in die Dentintubuli im Bereich des mittleren Drittels des Wurzelkanals. Zusätzlich dargestellt sind die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests, des Levene-Tests und des Kolmogorow-Smirnow-Tests. Mit (a) gekennzeichnete Werte wiesen im nicht parametrischen Post-hoc Test (Mann-Whitney-U) einen signifikanten Unterschied zu mit (b) gekennzeichneten Werten auf.

Apikal	Total Fill® BC Sealer™	Medcem® MTA	ProRoot® MTA	AH Plus®
Durchschnitt (µm)	496,28 (a)	539,10 (a)	352,01 (a)	586,41 (a)
Standardabweichung (µm)	265,71	238,66	108,53	264,89
Median (µm)	435,31	546,88	386,38	627,19
Minimum (µm)	135,50	175,75	122,75	164,50
Maximum (µm)	1075,13	880,00	524,38	1092,25
Kruskal-Wallis-Test	0,051			
Levene-Test	0,275			
Kolmogorow-Smirnow-Test	0,200			

Tabelle 3: Ergebnisse der Messungen der Penetrationstiefen im apikalen Drittel des Wurzelkanals

Dargestellt ist der durchschnittliche Wert der Penetrationstiefe mit Standardabweichung, Median, Minimum und Maximum in µm der vier Materialien in die Dentintubuli im apikalen Bereich des Wurzelkanals. Zusätzlich dargestellt sind die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests, des Levene-Tests und des Kolmogorow-Smirnow-Tests. Mit (a) gekennzeichnete Werte wiesen im nicht parametrischen Post-hoc Test (Mann-Whitney-U) einen signifikanten Unterschied zu mit (b) gekennzeichneten Werten auf.

Im **koronalen** Drittel konnten mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests ($p = 0,003$) signifikante Unterschiede der Eindringtiefen der vier Sealer nachgewiesen werden. Total Fill BC Sealer drang signifikant tiefer in die Dentintubuli ein als die restlichen drei Sealer (Mann-Whitney-U, $p < 0,0125$, siehe Tabelle 4). Signifikante Unterschiede zwischen den verbliebenen drei Gruppen konnten nicht ermittelt werden. Die Varianzhomogenität (Levene-Test, $p = 0,158$) und die Normalverteilung (Kolmogorow-Smirnow-Test, $p = 0,129$) wurden überprüft.

Sealer	Sealer	M-W-U-Test
AH Plus®	ProRoot® MTA	0,247
	Medcem® MTA	0,218
	Total Fill® BC Sealer™	0,011*
ProRoot® MTA	AH Plus®	0,247
	Medcem® MTA	0,023
	Total Fill® BC Sealer™	0,003*
Medcem® MTA	AH Plus®	0,218
	ProRoot® MTA	0,023
	Total Fill® BC Sealer™	0,011*
Total Fill® BC Sealer™	AH Plus®	0,011*
	ProRoot® MTA	0,003*
	Medcem® MTA	0,011*

Tabelle 4: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests im koronalen Drittel

Dargestellt sind die Ergebnisse des nicht parametrischen Mann-Whitney-U-Tests der Proben aus dem koronalen Drittel des Wurzelkanals pro Material gegenüber den restlichen drei Materialien. Mit * markierte Werte wiesen signifikante Unterschiede zum untersuchten Material auf.

Im **mittleren** Drittel konnten signifikante Unterschiede der Sealerpenetrationstiefen der vier Gruppen nachgewiesen werden (Kruskal-Wallis-Test, $p = 0,008$). Total Fill BC Sealer und Medcem MTA drangen signifikant tiefer in die Dentintubuli ein als ProRootMTA (Mann-Whitney-U, $p < 0,0125$, siehe Tabelle 5). Die Varianzhomogenität (Levene-Test, $p = 0,011$) und die Normalverteilung (Kolmogorow-Smirnow-Test, $p = 0,036$) wurden überprüft.

Sealer	Sealer	M-W-U-Test
AH Plus®	ProRoot® MTA	0,035
	Medcem® MTA	0,912
	Total Fill® BC Sealer™	0,143
ProRoot® MTA	AH Plus®	0,035
	Medcem® MTA	0,007*
	Total Fill® BC Sealer™	0,005*
Medcem® MTA	AH Plus®	0,912
	ProRoot® MTA	0,007*
	Total Fill® BC Sealer™	0,089
Total Fill® BC Sealer™	AH Plus®	0,143
	ProRoot® MTA	0,005*
	Medcem® MTA	0,089

Tabelle 5: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests im mittleren Drittel

Dargestellt sind die Ergebnisse des nicht parametrischen Mann-Whitney-U-Tests der Proben aus dem mittleren Drittel des Wurzelkanals pro Material gegenüber den restlichen drei Materialien. Mit * markierte Werte wiesen signifikante Unterschiede zum untersuchten Material auf.

Im **apikalen** Drittel konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen allen vier Sealergruppen nachgewiesen werden (Kruskal-Wallis-Test, $p = 0,051$, siehe Tabelle 6). Die Varianzhomogenität (Levene-Test, $p = 0,275$) und die Normalverteilung (Kolmogorow-Smirnow-Test, $p = 0,200$) wurden überprüft.

Sealer	Sealer	M-W-U-Test
AH Plus®	ProRoot® MTA	0,015
	Medcem® MTA	0,739
	Total Fill® BC Sealer™	0,393
ProRoot® MTA	AH Plus®	0,015
	Medcem® MTA	0,029
	Total Fill® BC Sealer™	0,123
Medcem® MTA	AH Plus®	0,739
	ProRoot® MTA	0,029
	Total Fill® BC Sealer™	0,315
Total Fill® BC Sealer™	AH Plus®	0,393
	ProRoot® MTA	0,123
	Medcem® MTA	0,315

Tabelle 6: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests im apikalen Drittel

Dargestellt sind die Ergebnisse des nicht parametrischen Mann-Whitney-U-Tests der Proben aus dem apikalen Drittel des Wurzelkanals pro Material gegenüber den restlichen drei Materialien. Mit * markierte Werte wiesen signifikante Unterschiede zum untersuchten Material auf.

4.2 Anteil des mit Sealer penetrierten Kanalumfangs

Die Messergebnisse des totalen und penetrierten Umfangs der Wurzelkanäle sind in Tabelle 7 dargestellt. Der Vergleich des prozentual penetrierten Umfangs der vier verschiedenen Gruppen zeigte signifikante Unterschiede auf (Kruskal-Wallis-Test, $p = 0,009$, siehe Tabelle 7).

ProRoot® MTA wies im Vergleich zu den drei restlichen Gruppen einen signifikant höheren Prozentsatz der Penetration, bezogen auf den totalen Umfang des Wurzelkanals, auf. Zwischen den drei restlichen Gruppen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

	Total Fill® BC Sealer™	Medcem® MTA	ProRoot® MTA	AH Plus®
Durchschnittlicher Umfang mit Standardabweichung in μm	2,55 \pm 0,84	2,92 \pm 0,85	3,18 \pm 1,24	3,43 \pm 1,29
Penetrierter Umfang in μm	2,14	2,45	3,03	2,90
Penetrierter Umfang in %	79,83	82,87	95,46	82,54

Tabelle 7: Umfang und penetrierter Umfang in μm und %

Dargestellt ist der Durchschnittswert für den Umfang pro Wurzelkanal pro Material mit Standardabweichung in μm . Zudem sind der von Sealer penetrierte Umfang in μm und in % pro Wurzelkanal pro Material aufgeführt.

Somit kann die erste Hypothese bestätigt werden. MTA basierte Sealer weisen eine ähnliche Eindringtiefe in die Dentintubuli auf wie AH Plus®. Lediglich im mittleren Drittel weist ProRoot® MTA eine signifikant geringere Eindringtiefe auf.

Auch die zweite Hypothese hat sich in den Versuchen bestätigt. Total Fill® BC Sealer™ weist eine ähnliche Eindringtiefe wie AH Plus®, in die Dentintubuli, auf. Im koronalen und mittleren Drittel erzielt Total Fill® BC Sealer™ sogar signifikant höhere Eindringtiefen als AH Plus®.

Ebenfalls weist Total Fill® BC Sealer™ eine höhere Eindringtiefe in die Dentintubuli auf als die beiden MTA Präparate. Dies trifft im koronalen Drittel zu. Im mittleren Drittel gibt es keine signifikanten Unterschiede zu MedCem® MTA und im apikalen Drittel sind zwischen allen Gruppen keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Somit bestätigt sich die dritte Hypothese nur zum Teil, da nicht in allen Dritteln des Wurzelkanals eine signifikant höhere Eindringtiefe von Total Fill® BC Sealer™ nachgewiesen werden kann.

	Gruppe				
Eindringtiefe	Koronal	Total Fill® BC Sealer™ (a)	Medcem® MTA (b) AH Plus® (b) ProRoot® MTA (b)		
	Mitte	Total Fill® BC Sealer™ (a) Medcem® MTA (a)	AH Plus® (b)	ProRoot® MTA (c)	
	Apikal	AH Plus® (a)	Medcem® MTA (a)	Total Fill® BC Sealer™ (a)	ProRoot® MTA (a)
Penetrierter Umfang	Gesamt	ProRoot® MTA (a)	Medcem® MTA (b) AH Plus® (b) Total Fill® BC Sealer™ (b)		

Tabelle 8: Vergleich der Sealer

Dargestellt sind die Unterschiede der verschiedenen Sealer untereinander im Bezug auf die Eindringtiefe in die Dentintubuli und den penetrierten Umfang. Signifikanzen wurden fett markiert, gelten jedoch nur horizontal. Mit **(a)** gekennzeichnete Werte wiesen einen signifikanten Unterschied zu mit **(b)** gekennzeichneten Werten auf. Gleiches gilt für **(b)** und **(c)**. Die blauen Pfeile markieren die absteigenden Eindringtiefen und den absteigenden penetrierten Umfang der Gruppen, welche keine Signifikanzen untereinander aufweisen.

5 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, die Penetrationstiefen verschiedener Materialien in die Dentintubuli zu vergleichen. Für jede Gruppe der für den Versuch gesammelten Zähne wurde ein Sealmaterial festgelegt.

Um die Ergebnisse der Studie untereinander und zugleich mit anderen Studien vergleichen zu können, wurde darauf geachtet, für alle Teilschritte des Versuchs gleiche Bedingungen zu schaffen, begonnen bei der Auswahl der Zähne.

Künstliche Wurzelkanäle aus Methacrylat kamen für diesen Versuch nicht infrage, da viele natürliche Einflüsse auf die Wurzelkanalfüllung nicht vorhanden sind, wie beispielsweise der smear layer. Der vorhandene smear layer kann negativen Einfluss auf die Penetrationstiefe der Sealmaterialien haben (Kuci *et al.*, 2014).

Ziel des Versuchsaufbaus war es, eine möglichst einheitliche Wurzelkanalform für jeden Wurzelkanal zu schaffen, damit jeder Wurzelkanal optimal obturiert werden konnte.

In der Literatur wird der kombinierte Gebrauch von Natriumhypochlorit und EDTA als Spüllösungen empfohlen, da sich beide Spüllösungen ideal ergänzen. Die Wirksamkeit beider Spüllösungen wird verstärkt, wenn sie in Kombination benutzt werden. Zum einen das Entfernen der organischen Reste im Wurzelkanal und die zusätzlich starke antimikrobielle Wirkung von Natriumhypochlorit und zum anderen das Entfernen von anorganischen Anteilen in der Schmierschicht (Goldman *et al.*, 1982; Yamada *et al.*, 1983; Bystrom und Sundqvist, 1985).

Daher wurde in dieser Studie jeder Wurzelkanal mit zehn ml Natriumhypochlorit während der Wurzelkanalaufbereitung und abschließend mit fünf ml EDTA nach der Wurzelkanalaufbereitung zum Entfernen der Schmierschicht gespült.

Die Wurzelkanäle wurden nach der abschließenden EDTA-Spülung und Trocknung der Kanäle durch Papierspitzen mit Guttapercha und einem Sealmaterial gefüllt. In der ersten Gruppe wurde AH Plus® als Sealmaterial mit Guttapercha-Points verwendet. Als Abfülltechnik wurde die laterale Kompaktion gewählt. AH Plus® zeigte in vorangegangenen Studien die besten Ergebnisse – sowohl hinsichtlich der Penetrationstiefe in die Dentintubuli (Balguerie *et al.*, 2011) als auch hinsichtlich der Fähigkeit, den Wurzelkanal dicht zu verschließen (Santos *et al.*, 2010). Aufgrund

dieser Eigenschaften hat sich AH Plus® als Standard in der heutigen Wurzelkanalobturation etabliert.

Für die zweite Gruppe wurde ProRoot® MTA als Sealermaterial mit den oben genannten Guttapercha-Points verwendet. Als Abfülltechnik wurde ebenfalls die laterale Kompaktion gewählt.

ProRoot® MTA gilt als in hohem Maße biokompatibel und zeichnet sich besonders durch eine geringe Toxizität aus (Kim *et al.*, 2014).

In der dritten Gruppe wurden die Zähne mit Medcem® MTA als Sealermaterial mit den Guttapercha-Points, die auch in den ersten beiden Gruppen verwendet wurden, in lateraler Kompaktion abgefüllt. Ebenso wie auch ProRoot® MTA ist Medcem® MTA kaum zelltoxisch (Kim *et al.*, 2014).

Sowohl ProRoot® MTA als auch Medcem® MTA wurden für den Gebrauch als Sealer selbst manuell angemischt. Aus Vorversuchen ergab sich das Mischungsverhältnis. Ziel war es, eine Konsistenz und Viskosität ähnlich der von AH Plus® und Total Fill BC Sealer zu erreichen. Es wurde auf kommerziell erhältliche MTA basierte Sealer wie beispielsweise MTA Fillapex verzichtet um zu testen, ob sich auch herkömmliche MTA Präparate erfolgreich als endodontische Sealer verwenden lassen

Die Wurzelkanäle der vierten Gruppe wurden mit dem Total-Fill-BC-System, bestehend aus Total Fill® BC Sealer™ und Total Fill® BC Points™ abgefüllt. Im Gegensatz zu den ersten drei Gruppen wurden die Wurzelkanäle dieser Gruppe in der Einstifttechnik obturiert.

Das biokeramische System von Total Fill BC wurde in der Einstifttechnik verwendet, um die vom Hersteller beworbene Fließfähigkeit und Abdichtungsfähigkeit zu überprüfen. In weiteren Studien könnte geklärt werden, ob die Abfüllmethodik einen Einfluss auf die Penetration des Sealers in die Dentintubuli hat. Es bleibt zu überprüfen, ob bei einer Obturation mittels Einstifttechnik die drei anderen Sealer ebenfalls diese Penetrations- und Benetzungswerte erreichen können.

Des Weiteren könnte geklärt werden, ob die Penetrations- und Benetzungswerte Einfluss auf die Dichtigkeit einer Wurzelfüllung haben. Mittels eines Glukose- oder Bakterienpenetrationstests kann verglichen werden, ob Wurzelfüllungen, deren

Sealer sehr weit in die Dentintubuli penetrieren und eine hohe Oberflächenbenetzung aufweisen, gleichzeitig auch die insgesamt dichtesten Wurzelfüllungen darstellen. Laut De-Deus gibt es keine Korrelation zwischen der Penetrationstiefe eines Sealers in die Dentintubuli und der Dichtigkeit der Wurzelfüllung (De-Deus *et al.*, 2012). ProRoot®MTA, welches in unserem Versuch die höchste Oberflächenbenetzung erzielt hat, das heißt höchster penetrierter Umfang und Total Fill® BC Sealer™, welcher die tiefsten Penetrationstiefen aufwies, wären die potenziell vielversprechendsten Sealer für einen der oben genannten Dichtigkeitstests. Somit könnte bewiesen werden, ob eine dieser beiden Größen einen signifikanten Einfluss auf die Dichtigkeit einer Wurzelkanalfüllung ausübt.

Mithilfe von Röntgenbildern wurde überprüft, ob die Wurzelkanäle sowohl auf eine adäquate Länge als auch im Querschnitt ausreichend gefüllt waren. Zur Kontrolle diente ein Röntgenbild pro Wurzelkanal in orthoradialer Röntgenposition. Proben, deren Wurzelkanalfüllungen auf den Kontroll-Röntgenbildern als klinisch nicht ausreichend eingestuft wurden, wurden von dieser Studie ausgeschlossen.

Es wird vermutet, dass es Total Fill® BC Sealer™, aufgrund eines geringeren Kontaktwinkels und der hydrophilen Eigenschaft des Calciumsilikates gelingt, weit in die Dentintubuli vorzudringen (Zhang, Shen, *et al.*, 2009; Nagas *et al.*, 2012). Total Fill® BC Sealer™, erreicht für die Penetrationstiefe Höchstwerte von über 2000 µm, wohingegen alle restlichen Sealer deutlich unter 2000 µm bleiben.

Etablierte Sealer auf Epoxidharz-Basis, beispielsweise AH Plus®, weisen ähnliche Penetrationseigenschaften wie Total Fill® BC Sealer™ und zudem eine hohe Adhäsionsfähigkeit an Dentin wie an Guttapercha auf (Wu *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2002).

Beim Einsatz von MTA liegt der Fokus nicht nur auf der Adhäsions- und Penetrationseigenschaft, sondern zusätzlich auch auf der regenerativen Wirkung des Materials auf Knochengewebe, was besonders bei apikalen Ostitiden vorteilhaft wäre. Versuche, in denen MTA als Wurzelfüllmaterial benutzt wurde, zeigten, dass weniger periapikale Entzündungen als beispielsweise bei Amalgam zu erkennen waren (Torabinejad *et al.*, 1995). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass vor allem die Regenerationsfähigkeit von Knochen durch MTA gefördert wird (Economides *et al.*, 2003). Regan und Mitarbeiter (Regan *et al.*, 2002) zeigten am Beispiel von

ProRoot® MTA, dass MTA als Wurzelendfüllmaterial eine komplette Regeneration des periapikalen Gewebes bewirkt. In Verbindung mit Calciumhydroxid kann die Regeneration des periapikalen Gewebes sogar noch beschleunigt werden (Ham *et al.*, 2005).

Im Unterschied dazu wurde in unserer Studie untersucht, wie sich die Penetrationstiefe von MTA in Dentintubuli im Vergleich zu einem etablierten (AH Plus®) sowie einem neuen (Total Fill® BC Sealer™) Sealer darstellt.

Insgesamt zeigt ProRoot®MTA die geringsten Eindringtiefen in die Dentintubuli. Die größten Eindringtiefen wurden bei Total Fill® BC Sealer™ gemessen. Eine Übersicht über die genauen Messwerte der verschiedenen Sealer ist in den Tabellen 1 bis 3 gezeigt.

In der aktuellen Literatur werden verschiedene Methoden dargestellt, um die Penetrationstiefe von Sealern in die Dentintubuli zu messen. Häufig werden die Eindringtiefen mit einem Rasterelektronenmikroskop oder mit dem Lasermikroskop, welches auch in unserem Versuch benutzt wurde, bestimmt.

Balguerie und Mitarbeiter (Balguerie *et al.*, 2011) haben anhand von 52 extrahierten einwurzeligen Zähnen fünf verschiedene Sealerarten hinsichtlich ihrer Penetrationstiefen in die Dentintubuli mithilfe des Rasterelektronenmikroskops untersucht. Unter anderem wurde in diesem Versuch auch AH Plus® verwendet. In drei verschiedenen Abschnitten der Wurzel wurden die Messungen durchgeführt. Die für AH plus gemessenen Werte unterscheiden sich deutlich von den in unserem Versuch eruierten Werten für die Penetrationstiefe (siehe Tabellen 1–3). Begründet werden kann dies durch die ungenauere Darstellung der Eindringtiefen der Sealer in die Dentintubuli. Durch die Laserfluoreszenzmessung kann genau visualisiert werden, sofern eine Autofluoreszenz ausgeschlossen wurde, bis wohin der mit Fluoreszenzfarbstoff vermischte Sealer in die Dentintubuli eingedrungen ist. Dies ist bei einem Rasterelektronenmikroskop nicht möglich.

Kuci und Mitarbeiter (Kuci *et al.*, 2014) untersuchten ebenfalls die Eindringtiefe verschiedener Sealer in die Dentintubuli. In diesem Versuch wurde ebenfalls das Laserscanning-Mikroskop verwendet, um die Penetrationstiefen der Sealer zu bestimmen. Keines der untersuchten Materialien findet sich in unserem Versuch

wieder, jedoch liegen die bestimmten Werte für die Penetrationstiefen der Sealer näher an den Werten, die in unserem Versuch für die Penetrationstiefen der von uns untersuchten Sealer festgestellt wurden. Die von Kuci und Mitarbeitern untersuchten Materialien waren das ebenfalls auf Epoxidharz basierende AH 26® und das Mineral-Trioxid-Aggregat-Präparat MTA Fillapex. Die Proben wurden ebenfalls vier mm, acht mm und zwölf mm ausgehend vom Apex hergestellt. Im mittleren Drittel des Wurzelkanals wurde jeweils die höchste durchschnittliche und im apikalen Drittel die niedrigste durchschnittliche Eindringtiefe erreicht.

Es scheint, dass die modernere Methode des Laserscannings ein präziseres Verfahren als die Messung durch ein Rasterelektronenmikroskop darstellt, um die Penetrationstiefen von Sealern in die Dentintubuli genau zu bestimmen. Die im Rasterelektronenmikroskop bestimmten Werte von Balguerie und Mitarbeitern weichen stark von den im Lasermikroskop bestimmten Werten von Kuci und Mitarbeitern ab. Die Abweichung ist so deutlich, dass nicht von Differenzen in der Methodik der Aufbereitung und des Abfüllens der Wurzelkanäle als Ursache ausgegangen werden kann.

In einer zweiten Untersuchung wurde die prozentuale Oberflächenbenetzung der Wurzelkanalinnenwand durch die verschiedenen Sealer bestimmt.

Mit einer durchschnittlichen prozentualen Benetzung von 95,46% pro Wurzelkanal fanden sich für ProRoot®MTA die höchsten Werte. Die drei anderen Sealer weisen einander ähnliche Werte auf, mit Medcem MTA (82,87%), AH Plus® (82,54%) und Total Fill® BC Sealer™ (79,83%). Vor allem im apikalen Drittel zeigen diese drei Sealer eine im Vergleich zu ProRoot®MTA wesentlich geringeren penetrierten Umfang (siehe Tabelle 7).

Setzt man die Werte der Oberflächenbenetzung mit den Penetrationstiefen der verschiedenen Sealer in Beziehung, so wird deutlich, dass ProRootMTA in allen drei Abschnitten die geringsten Eindringtiefen in die Dentintubuli vorweisen kann. Bei der Oberflächenbenetzung jedoch liegt ProRootMTA im apikalen und mittleren Drittel der Wurzelkanäle deutlich vor AH Plus®, Medcem® MTA und Total Fill® BC Sealer™. Lediglich im koronalen Abschnitt zeigten Medcem® MTA und Total Fill® BC Sealer™ bessere Ergebnisse. Insgesamt kann ProRoot®MTA die höchsten prozentualen Benetzungswerte vorweisen.

De-Deus und Mitarbeiter (De-Deus *et al.*, 2012) untersuchten ebenfalls die prozentuale Oberflächenbenetzung und Penetrationstiefe von AH Plus®, in die Dentintubuli. 60 extrahierte menschliche Unterkieferfrontzähne wurden wurzelkanalbehandelt und anschließend in drei Abschnitte (drei mm, sechs mm, acht mm vom Apex) unterteilt. Mithilfe des Laserscanning-Mikroskops wurde die Penetration des Sealers untersucht. Die Ergebnisse variierten hier von 5,6 % bis zu 42,21 % und als durchschnittlicher Wert wird $13,7 \% \pm 17,2 \%$ angegeben. Diese Ergebnisse zeigen deutlich geringere Werte für die Oberflächenbenetzung als die von uns gemessenen Werte (82,54 %). Offensichtliche Ursachen für die unterschiedlichen Ergebnisse liegen nicht vor. Als Erklärung könnten Differenzen in der Methodik von Aufbereitung und Abfüllen der Wurzelkanäle oder in der Auswertungssystematik liegen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es bei dieser Art von Untersuchungen entscheidend ist, welche Methodik für den Versuch gewählt wird. Zum einen kann es Unterschiede in der Methodik in der Vorbereitung der Proben, wie beispielsweise die Aufbereitung und Obturation der Wurzelkanäle geben, zum anderen in der Methodik der Auswertung, die in diesem Versuch mit dem Lasermikroskop vorgenommen wurde, es aber unter anderem auch die Möglichkeit gibt, dies mit einem Rasterelektronenmikroskop zu bestimmen. Je nach Auswahl der Methoden differieren die Ergebnisse der Versuche.

Die von uns gefundenen Ergebnisse zeigen, dass die drei von uns untersuchten neuen Sealer in Bezug auf die für einen endodontischen Behandlungserfolg relevanten Parameter ‚Penetrationstiefe‘ und ‚prozentuale Benetzung‘ die Werte des etablierten Sealmaterials AH Plus® erreichten und zum Teil übertrafen. Dies weist darauf hin, dass die Sealer ProRootMTA, Medcem® MTA und Total Fill BC Sealer möglicherweise für den klinischen Einsatz Vorteile aufweisen können. Weitere insbesondere klinische Studien sind wünschenswert, um die von uns gefundenen Ergebnisse zu verifizieren und die Sealmaterialien auf ihre klinische Anwendbarkeit zu untersuchen.

Zwei der Hypothesen haben sich bestätigt. Die dritte Hypothese kann nur teilweise bestätigt werden.

MTA basierte Sealer weisen ähnliche Eindringtiefen in die Dentintubuli auf wie AH

Plus®. Im koronalen und apikalen Drittel gibt es keine signifikanten Unterschiede zu AH plus. Lediglich im mittleren Drittel weist ProRoot® MTA eine signifikant geringere Eindringtiefe zu AH Plus® und Medcem® MTA auf.

Total Fill® BC Sealer™ weist eine ähnliche Eindringtiefe auf wie AH Plus®. Im koronalen und mittleren Drittel übertraf Total Fill® BC Sealer™ signifikant die Eindringtiefen von AH Plus® in die Dentintubuli. Im apikalen Drittel konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Im koronalen Drittel konnte nachgewiesen werden, dass Total Fill® BC Sealer™ eine höhere Eindringtiefe erzielen kann als beide MTA Präparate. Im mittleren und apikalen Drittel gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Sealern. Somit bestätigt sich die dritte Hypothese nur zum Teil, da Total Fill® BC Sealer™ lediglich im koronalen Drittel signifikant höhere Eindringtiefen in die Dentintubuli aufweisen konnte.

Die Ergebnisse sollten auch an mehrwurzeligen Zähnen verifiziert werden. Weiterhin wurde in dieser Studie das Total-Fill-BC-System im Gegensatz zu den anderen drei Sealertypen in der Einstifttechnik verwendet. Vergleichende Untersuchungen mit lateraler Kompaktionstechnik sind wünschenswert.

6 Zusammenfassung

Die moderne Endodontie ist heute in der Lage, auch stark geschädigte Zähne dauerhaft zu erhalten. Eine wichtige Rolle für den Erfolg einer endodontischen Behandlung kommt dem Sealermaterial zu, da es die zwischen Guttaperchastift und Wurzelkanalinnenwand verbliebenen Hohlräume und Unebenheiten möglichst weitgehend versiegeln soll. Eine weite Penetration des Sealers in die Dentintubuli ist wünschenswert, da sie die Versiegelungsqualität und Retention der Wurzelfüllung verbessert. Zusätzlich können so verbliebende Bakterien eingeschlossen und gegebenenfalls abgetötet werden.

Ziel dieser Arbeit war es, drei neue Sealermaterialien auf Portlandzement-Basis (ProRoot® MTA, Medcem® MTA) beziehungsweise auf Calciumsilikat-Basis (Total Fill® BC Sealer™) mit einem etablierten Epoxidharz-Sealer (AH Plus®) hinsichtlich der Penetrationstiefen in Dentintubuli sowie der prozentualen, durch Sealer benetzten Wurzelkanaloberfläche zu vergleichen. Zu diesem Zweck untersuchten wir 40 extrahierte menschliche einwurzelige Frontzähne mittels Laserfluoreszenzmessung. Die Zähne wurden trepaniert, mit einem gängigen Aufbereitungsprotokoll bearbeitet und anschließend mit Guttapercha-Stiften und den verschiedenen mit dem Laserfluoreszenzfarbstoff Rhodamin B versetzten Sealermaterialien in lateraler Kompaktion beziehungsweise Einstifttechnik (Total Fill System) abgefüllt. Ausgehend vom Apex wurden die Wurzeln horizontal nach vier mm, acht mm und 12 mm geschnitten. Mithilfe des Lasermikroskops konnten die Penetrationstiefen visualisiert und gemessen werden. Vornehmlich konnte der Calciumsilikat-Sealer Total Fill® BC Sealer™ die größten Eindringtiefen vorweisen (koronal: 1182 µm, Mitte: 1043 µm, apikal: 496 µm) und AH Plus® (koronal: 669 µm, Mitte: 751 µm, apikal: 586 µm) und die beiden MTA-Materialien ProRoot® MTA (koronal: 566 µm, Mitte: 506 µm, apikal: 352 µm) und Medcem® MTA (koronal: 766 µm, Mitte: 758 µm, apikal: 539 µm) übertreffen. Im Detail zeigte sich, dass Total Fill® BC Sealer™ im *koronalen Drittel* signifikant höhere Eindringtiefen im Vergleich zu den drei anderen Gruppen erzielen konnte. Zwischen den MTA Präparaten und AH Plus® gab es hierbei keine signifikanten Unterschiede. Medcem® MTA erreichte nach Total Fill® BC Sealer™ die höchsten Eindringtiefen, gefolgt von AH Plus® und ProRoot MTA. Im *mittleren Drittel* konnten sowohl bei Total Fill® BC Sealer™ als

auch bei Medcem® MTA signifikant höhere Eindringtiefen als bei ProRoot®MTA und AH Plus® festgestellt werden. Zwischen Total Fill® BC Sealer™ und Medcem® MTA wurde kein signifikanter Unterschied nachgewiesen. Im *apikalen Drittel* konnten zwischen allen vier Gruppen keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. AH Plus® erzielte hier die höchsten Eindringtiefen, gefolgt von Medcem® MTA, Total Fill® BC Sealer™ und ProRoot®MTA.

Bei der Messung des penetrierten Umfangs wies ProRoot®MTA die höchsten Werte (95,46 %) auf, vor Medcem® MTA (82,87 %), AH Plus® (82,54 %) und Total Fill® BC Sealer™ (79,83 %). Total Fill® BC Sealer™ erreichte zwar die größten Eindringtiefen, zeigte aber die geringsten Werte für den penetrierten Umfang der Wurzelkanalinnenwand. Weitere Studien sollten klären, inwieweit die untersuchten Materialien Vorteile für den klinischen Einsatz gegenüber etablierten Sealermaterialien aufweisen.

7 Literaturverzeichnis

- Alves, J., Walton, R., & Drake, D., Coronal leakage: endotoxin penetration from mixed bacterial communities through obturated, post-prepared root canals. *J Endod*, 1998. 24(9): 587-591.
- Assmann, E., Bottcher, D. E., Hoppe, C. B., Grecca, F. S., & Kopper, P. M., Evaluation of bone tissue response to a sealer containing mineral trioxide aggregate. *J Endod*, 2015. 41(1): 62-66.
- Balguerie, E., van der Sluis, L., Vallaey, K., Gurgel-Georgelin, M., & Diemer, F., Sealer penetration and adaptation in the dentinal tubules: a scanning electron microscopic study. *J Endod*, 2011. 37(11): 1576-1579.
- Bergenholtz, G., Inflammatory response of the dental pulp to bacterial irritation. *J Endod*, 1981. 7(3): 100-104.
- Bjorndal, L., & Darvann, T., A light microscopic study of odontoblastic and non-odontoblastic cells involved in tertiary dentinogenesis in well-defined cavitated carious lesions. *Caries Res*, 1999. 33(1): 50-60.
- Bjorndal, L., Darvann, T., & Thylstrup, A., A quantitative light microscopic study of the odontoblast and subodontoblastic reactions to active and arrested enamel caries without cavitation. *Caries Res*, 1998. 32(1): 59-69.
- Brackett, M. G., Martin, R., Sword, J., Oxford, C., Rueggeberg, F. A., Tay, F. R., & Pashley, D. H., Comparison of seal after obturation techniques using a polydimethylsiloxane-based root canal sealer. *J Endod*, 2006. 32(12): 1188-1190.
- Branstetter, J., & von Fraunhofer, J. A., The physical properties and sealing action of endodontic sealer cements: a review of the literature. *J Endod*, 1982. 8(7): 312-316.

- Bystrom, A., & Sundqvist, G., The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *Int Endod J*, 1985. 18(1): 35-40.
- Camargo, C. H., Oliveira, T. R., Silva, G. O., Rabelo, S. B., Valera, M. C., & Cavalcanti, B. N., Setting time affects in vitro biological properties of root canal sealers. *J Endod*, 2014. 40(4): 530-533.
- Carvalho, C. N., Martinelli, J. R., Bauer, J., Haapasalo, M., Shen, Y., Bradaschia-Correa, V., . . . Gavini, G., Micropush-out dentine bond strength of a new gutta-percha and niobium phosphate glass composite. *Int Endod J*, 2014.
- Cobankara, F. K., Adanr, N., & Belli, S., Evaluation of the influence of smear layer on the apical and coronal sealing ability of two sealers. *J Endod*, 2004. 30(6): 406-409.
- Cooper, P. R., Holder, M. J., & Smith, A. J., Inflammation and regeneration in the dentin-pulp complex: a double-edged sword. *J Endod*, 2014. 40(4 Suppl): S46-51.
- D'Assuncao, F. L., Sousa, J. C., Felinto, K. C., de Medeiros, T. C., Leite, D. T., de Lucena, R. B., & de Oliveira Lima, J., Accuracy and repeatability of 3 apex locators in locating root canal perforations: an ex vivo study. *J Endod*, 2014. 40(8): 1241-1244.
- De-Deus, G., Brandao, M. C., Leal, F., Reis, C., Souza, E. M., Luna, A. S., . . . Fidel, S., Lack of correlation between sealer penetration into dentinal tubules and sealability in nonbonded root fillings. *Int Endod J*, 2012. 45(7): 642-651.
- De-Deus, G., Leal, F., Soares, J., Luna, A. S., Murad, C., Fidel, S., & Fidel, R. A., Dye extraction results on bacterial leakproof root fillings. *J Endod*, 2008. 34(9): 1093-1095.
- Desai, S., & Chandler, N., Calcium hydroxide-based root canal sealers: a review. *J Endod*, 2009. 35(4): 475-480.

DGZMK, "Good clinical practice": Die Wurzelkanalbehandlung.

Economides, N., Pantelidou, O., Kokkas, A., & Tziafas, D., Short-term periradicular tissue response to mineral trioxide aggregate (MTA) as root-end filling material. *Int Endod J*, 2003. 36(1): 44-48.

Endodontologie, E. G. f., Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung: Konsenzpapier der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie.

Friedman, S., & Mor, C., The success of endodontic therapy--healing and functionality. *J Calif Dent Assoc*, 2004. 32(6): 493-503.

Gehlot, P. M., Manjunath, V., & Manjunath, M. K., An in vitro evaluation of the accuracy of four electronic apex locators using stainless-steel and nickel-titanium hand files. *Restor Dent Endod*, 2016. 41(1): 6-11.

Goldman, M., Goldman, L. B., Cavaleri, R., Bogis, J., & Lin, P. S., The efficacy of several endodontic irrigating solutions: a scanning electron microscopic study: Part 2. *J Endod*, 1982. 8(11): 487-492.

Grobe, S., Einfluss verschiedener Obturationstechniken und Sealer auf die koronale Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen ovaler Wurzelkanäle. 2014.

Haapasalo, M., & Orstavik, D., In vitro infection and disinfection of dentinal tubules. *J Dent Res*, 1987. 66(8): 1375-1379.

Hahn, C. L., Falkler, W. A., Jr., & Minah, G. E., Microbiological studies of carious dentine from human teeth with irreversible pulpitis. *Arch Oral Biol*, 1991. 36(2): 147-153.

Ham, K. A., Witherspoon, D. E., Gutmann, J. L., Ravindranath, S., Gait, T. C., & Opperman, L. A., Preliminary evaluation of BMP-2 expression and histological characteristics during apexification with calcium hydroxide and mineral trioxide aggregate. *J Endod*, 2005. 31(4): 275-279.

- Hargreaves, K. M., Cohen, S., & Berman, L. H. (2011). *Cohen's Pathways of the Pulp*: Mosby Elsevier.
- Hellwig, E. K., J; Attin, T, Einführung in die Zahnerhaltung. 2009.
- Huang, F. M., Tai, K. W., Chou, M. Y., & Chang, Y. C., Cytotoxicity of resin-, zinc oxide-eugenol-, and calcium hydroxide-based root canal sealers on human periodontal ligament cells and permanent V79 cells. *Int Endod J*, 2002. 35(2): 153-158.
- Hülsmann, Checklisten der Zahnmedizin: Endodontie. 2008.
- Hülsmann, M., Heckendorff, M., & Lennon, A., Chelating agents in root canal treatment: mode of action and indications for their use. *Int Endod J*, 2003. 36(12): 810-830.
- Hume, W. R., Effect of eugenol on respiration and division in human pulp, mouse fibroblasts, and liver cells in vitro. *J Dent Res*, 1984. 63(11): 1262-1265.
- Khayat, A., Lee, S. J., & Torabinejad, M., Human saliva penetration of coronally unsealed obturated root canals. *J Endod*, 1993. 19(9): 458-461.
- Kim, M., Yang, W., Kim, H., & Ko, H., Comparison of the biological properties of ProRoot MTA, OrthoMTA, and Endocem MTA cements. *J Endod*, 2014. 40(10): 1649-1653.
- Knupfer, D. W. H., Ein universelles biokeramisches Obturationsmaterial. *Endodontie Journal*, 2014. 1/2014.
- Konjhodzic-Prcic, A., Jakupovic, S., Hasic-Brankovic, L., & Vukovic, A., In vitro comparison of cytotoxicity of four root canal sealers on human gingival fibroblasts. *Med Arch*, 2015. 69(1): 24-27.

- Kontakiotis, E. G., Tzanetakis, G. N., & Loizides, A. L., A comparative study of contact angles of four different root canal sealers. *J Endod*, 2007. 33(3): 299-302.
- Kouvas, V., Liolios, E., Vassiliadis, L., Parissis-Messimeris, S., & Boutsoukis, A., Influence of smear layer on depth of penetration of three endodontic sealers: an SEM study. *Endod Dent Traumatol*, 1998. 14(4): 191-195.
- Kuci, A., Alacam, T., Yavas, O., Ergul-Ulger, Z., & Kayaoglu, G., Sealer penetration into dentinal tubules in the presence or absence of smear layer: a confocal laser scanning microscopic study. *J Endod*, 2014. 40(10): 1627-1631.
- Landys Boren, D., Jonasson, P., & Kvist, T., Long-term survival of endodontically treated teeth at a public dental specialist clinic. *J Endod*, 2015. 41(2): 176-181.
- Lee, K. W., Williams, M. C., Camps, J. J., & Pashley, D. H., Adhesion of endodontic sealers to dentin and gutta-percha. *J Endod*, 2002. 28(10): 684-688.
- Lehmann, K. M., Hellwig, E., & Wenz, H. J. (2012). *Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde ; mit 32 Tabellen*: Dt. Zahnärzte-Verlag.
- Mader, C. L., Baumgartner, J. C., & Peters, D. D., Scanning electron microscopic investigation of the smeared layer on root canal walls. *J Endod*, 1984. 10(10): 477-483.
- McMichael, G. E., Primus, C. M., & Opperman, L. A., Dentinal Tubule Penetration of Tricalcium Silicate Sealers. *J Endod*, 2016.
- Mestieri, L. B., Gomes-Cornelio, A. L., Rodrigues, E. M., Salles, L. P., Bosso-Martelo, R., Guerreiro-Tanomaru, J. M., & Tanomaru-Filho, M., Biocompatibility and bioactivity of calcium silicate-based endodontic sealers in human dental pulp cells. *J Appl Oral Sci*, 2015. 23(5): 467-471.

- Miletic, I., Devcic, N., Anic, I., Borcic, J., Karlovic, Z., & Osmak, M., The cytotoxicity of RoekoSeal and AH plus compared during different setting periods. *J Endod*, 2005. 31(4): 307-309.
- Murray, P. E., Garcia-Godoy, F., & Hargreaves, K. M., Regenerative endodontics: a review of current status and a call for action. *J Endod*, 2007. 33(4): 377-390.
- Nagas, E., Uyanik, M. O., Eymirli, A., Cehreli, Z. C., Vallittu, P. K., Lassila, L. V., & Durmaz, V., Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers. *J Endod*, 2012. 38(2): 240-244.
- Neumann, T., *Dissertation*, 2010.
- Pashley, E. L., Tao, L., & Pashley, D. H., The sealing properties of temporary filling materials. *J Prosthet Dent*, 1988. 60(3): 292-297.
- Peters, O. A., Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod*, 2004. 30(8): 559-567.
- Prestegard, H., Portenier, I., Orstavik, D., Kayaoglu, G., Haapasalo, M., & Endal, U., Antibacterial activity of various root canal sealers and root-end filling materials in dentin blocks infected ex vivo with *Enterococcus faecalis*. *Acta Odontol Scand*, 2014. 72(8): 970-976.
- Raina, R., Loushine, R. J., Weller, R. N., Tay, F. R., & Pashley, D. H., Evaluation of the quality of the apical seal in Resilon/Epiphany and Gutta-Percha/AH Plus-filled root canals by using a fluid filtration approach. *J Endod*, 2007. 33(8): 944-947.
- Ray, H. A., & Trope, M., Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration. *Int Endod J*, 1995. 28(1): 12-18.

- Regan, J. D., Gutmann, J. L., & Witherspoon, D. E., Comparison of Diaket and MTA when used as root-end filling materials to support regeneration of the periradicular tissues. *Int Endod J*, 2002. 35(10): 840-847.
- Safavi, K. E., Spangberg, L. S., & Langeland, K., Root canal dentinal tubule disinfection. *J Endod*, 1990. 16(5): 207-210.
- Santos, J., Tjaderhane, L., Ferraz, C., Zaia, A., Alves, M., De Goes, M., & Carrilho, M., Long-term sealing ability of resin-based root canal fillings. *Int Endod J*, 2010. 43(6): 455-460.
- Scarparo, R. K., Grecca, F. S., & Fachin, E. V., Analysis of tissue reactions to methacrylate resin-based, epoxy resin-based, and zinc oxide-eugenol endodontic sealers. *J Endod*, 2009. 35(2): 229-232.
- Schilder, H., Filling root canals in three dimensions. *Dent Clin North Am*, 1967: 723-744.
- Stuart, C. H., Schwartz, S. A., Beeson, T. J., & Owatz, C. B., Enterococcus faecalis: Its Role in Root Canal Treatment Failure and Current Concepts in Retreatment. *J Endod*, 2006. 32(2): 93-98.
- Suzuki, Y., Sugiyama, K., & Furuta, H., Eugenol-mediated superoxide generation and cytotoxicity in guinea pig neutrophils. *Jpn J Pharmacol*, 1985. 39(3): 381-386.
- Torabinejad, M., Hong, C. U., Pitt Ford, T. R., & Kettering, J. D., Antibacterial effects of some root end filling materials. *J Endod*, 1995. 21(8): 403-406.
- Torabinejad, M., Ung, B., & Kettering, J. D., In vitro bacterial penetration of coronally unsealed endodontically treated teeth. *J Endod*, 1990. 16(12): 566-569.
- Trope, M., & Debelian, G., Microbial control: the first stage of root canal treatment. *Gen Dent*, 2009. 57(6): 580-588.

- Weber, T., *Memorix Zahnmedizin*. 2010. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage.
- Wu, M. K., de Gee, A. J., & Wesselink, P. R., Effect of tubule orientation in the cavity wall on the seal of dental filling materials: an in vitro study. *Int Endod J*, 1998. 31(5): 326-332.
- Xu, Q., Fan, M. W., Fan, B., Cheung, G. S., & Hu, H. L., A new quantitative method using glucose for analysis of endodontic leakage. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2005. 99(1): 107-111.
- Xu, Q., Ling, J., Cheung, G. S., & Hu, Y., A quantitative evaluation of sealing ability of 4 obturation techniques by using a glucose leakage test. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2007. 104(4): e109-113.
- Yamada, R. S., Armas, A., Goldman, M., & Lin, P. S., A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3. *J Endod*, 1983. 9(4): 137-142.
- Zhang, Li, Z., & Peng, B., Assessment of a new root canal sealer's apical sealing ability. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2009. 107(6): e79-82.
- Zhang, Li, Z., & Peng, B., Ex vivo cytotoxicity of a new calcium silicate-based canal filling material. *Int Endod J*, 2010. 43(9): 769-774.
- Zhang, Shen, Y., Ruse, N. D., & Haapasalo, M., Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *J Endod*, 2009. 35(7): 1051-1055.
- Zhang, W., Li, Z., & Peng, B., Effects of iRoot SP on mineralization-related genes expression in MG63 cells. *J Endod*, 2010. 36(12): 1978-1982.

8 Anhang

8.1 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Ergebnisse der Messungen der Penetrationstiefen im koronalen.....</i>	35
<i>Tabelle 2: Ergebnisse der Messungen der Penetrationstiefen im mittleren.....</i>	36
<i>Tabelle 3: Ergebnisse der Messungen der Penetrationstiefen im apikalen Drittel.....</i>	37
<i>Tabelle 4: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests im koronalen Drittel</i>	38
<i>Tabelle 5: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests im mittleren Drittel</i>	39
<i>Tabelle 6: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests im apikalen Drittel.....</i>	40
<i>Tabelle 7: Umfang und penetrierter Umfang in μm und %</i>	41
<i>Tabelle 8: Vergleich der Sealer.....</i>	43

8.2 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Vergleich des Kontaktwinkels.....</i>	10
<i>Abbildung 2: Diamant-Präzisionssäge Leco Vari/Cut 50.....</i>	21
<i>Abbildung 3: Nassschleif- und Poliersystem Leco VP 100.....</i>	22
<i>Abbildung 4: Wurzelkanalfüllung im DVT</i>	24
<i>Abbildung 5: Wurzelkanalfüllung unter Rasterelektronenmikroskop</i>	24
<i>Abbildung 6: Wurzelkanalfüllung unter Lasermikroskop.....</i>	25
<i>Abbildung 7: Wurzelkanalbehandelter Unterkieferfrontzahn mit Rhodamin B-Färbung</i>	28
<i>Abbildung 8: Wurzelkanalbehandelter Unterkiefereckzahn mit Rhodamin B-Färbung</i>	28
<i>Abbildung 9: Drei Proben eines Zahnes auf einem Objektträger vor Fixierung.....</i>	29
<i>Abbildung 10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Probenherstellung.....</i>	30
<i>Abbildung 11: Drei Proben nach Fixierung und Politur auf einem Objektträger</i>	30
<i>Abbildung 12: Mit Rhodamin visualisierte Sealerpenetration in die Dentintubuli.....</i>	31
<i>Abbildung 13: Gleichmäßige Sealerpenetration in die Dentintubuli unter dem LSM 510.....</i>	31
<i>Abbildung 14: Visualisierung der Messpunkte in den Wurzel Dritteln</i>	32
<i>Abbildung 15: Bildliche Darstellung der Penetrationstiefe.....</i>	34

8.3 Detaillierte Versuchsergebnisse mit Einzelwerten

Im Folgenden sind die Einzelwerte der acht Messpunkte im apikalen, mittleren und koronalen Drittel des jeweiligen Zahnes und Materials aufgelistet.

Gruppe	Zahn	Region	1	2	3	4	5	6	7	8
AH+	1	apikal	0	0	292	0	547	716	427	460
	1	mittig	442	312	400	341	855	1145	729	990
	1	koronal	473	535	0	0	803	706	875	787
	2	apikal	0	0	0	646	1188	911	1282	1431
	2	mittig	874	768	753	869	1356	1244	580	349
	2	koronal	543	518	583	751	842	982	560	750
	3	apikal	490	396	395	463	903	927	1036	1058
	3	mittig	817	582	996	920	1147	1062	1352	1410
	3	koronal	1085	1359	1138	1272	1548	1789	698	792
	4	apikal	793	778	244	330	1502	1476	1770	1845
	4	mittig	673	286	342	349	2106	1874	1629	1501
	4	koronal	0	0	0	0	1153	1221	1138	1023
	5	apikal	79	65	0	0	198	229	453	292
	5	mittig	0	0	0	0	301	0	0	0
	5	koronal	127	340	131	209	613	786	212	356
	6	apikal	367	282	444	349	1078	1272	555	497
	6	mittig	576	916	685	532	1040	1192	1266	1253
	6	koronal	727	523	553	618	1237	888	1003	1208
	7	apikal	0	0	0	0	550	432	1665	1707
	7	mittig	516	0	229	0	1097	1239	1423	1414
	7	koronal	545	380	521	398	721	786	570	547
	8	apikal	361	425	93	0	762	625	645	538
	8	mittig	263	279	196	150	903	599	673	390
	8	koronal	368	364	443	343	771	745	442	471
	9	apikal	403	290	378	318	1196	965	922	719
	9	mittig	411	452	301	327	1398	1389	1571	1295
	9	koronal	522	450	436	499	802	619	915	926
	10	apikal	227	212	397	343	573	632	652	429
	10	mittig	197	180	217	172	609	410	297	226
	10	koronal	632	457	411	462	944	708	719	358
ProRootMTA	1	apikal	382	379	408	440	517	488	850	731
	1	mittig	447	428	480	393	936	972	624	621
	1	koronal	397	456	545	470	475	530	389	449
	2	apikal	143	167	411	252	474	598	525	489
	2	mittig	203	273	316	237	346	361	527	599
	2	koronal	383	458	290	455	605	538	474	537
	3	apikal	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	mittig	0	0	0	0	491	603	447	226
	3	koronal	482	434	411	702	615	645	530	638
	4	apikal	0	0	0	0	354	346	474	481
	4	mittig	320	306	341	309	1049	747	764	665
	4	koronal	538	681	410	463	774	652	578	571

Anhang

	5	apikal	197	224	218	326	389	280	239	320
	5	mittig	285	385	508	409	708	660	446	683
	5	koronal	474	518	546	563	547	588	842	742
	6	apikal	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	mittig	0	0	0	0	731	848	664	947
	6	koronal	335	341	344	450	609	649	705	518
	7	apikal	190	98	306	248	362	452	918	549
	7	mittig	235	213	190	254	688	781	721	803
	7	koronal	298	231	307	235	473	464	618	695
	8	apikal	342	293	150	260	417	407	373	300
	8	mittig	336	677	584	804	1300	1039	870	814
	8	koronal	554	584	705	579	836	877	855	889
	9	apikal	0	0	137	232	682	840	689	656
	9	mittig	0	0	0	0	826	941	897	837
	9	koronal	513	427	290	292	610	576	697	719
	10	apikal	68	86	98	117	150	154	166	143
	10	mittig	490	523	401	483	772	790	918	975
	10	koronal	n.v	nv	nv	nv	nv	nv	nv	nv
MedcemMTA	1	apikal	0	0	0	0	1403	1421	1103	1132
	1	mittig	547	398	411	251	1279	1449	960	1217
	1	koronal	861	638	863	731	1146	1070	1395	1350
	2	apikal	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	mittig	483	389	570	0	564	565	592	622
	2	koronal	430	251	957	683	858	1137	1218	1075
	3	apikal	0	0	0	0	341	243	309	513
	3	mittig	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	koronal	269	406	476	321	446	544	375	300
	4	apikal	226	352	262	390	651	906	962	831
	4	mittig	901	829	912	857	1386	1196	1073	1288
	4	koronal	781	970	1301	946	717	877	1203	1049
	5	apikal	225	266	683	499	902	870	658	716
	5	mittig	628	585	490	497	1237	1229	898	881
	5	koronal	525	526	601	547	1040	875	889	798
	6	apikal	714	736	624	429	1153	1165	1282	937
	6	mittig	565	493	667	848	1720	1550	970	837
	6	koronal	720	840	647	873	1051	1220	1373	1106
	7	apikal	324	358	317	253	624	705	783	806
	7	mittig	586	622	589	432	1462	1294	880	847
	7	koronal	464	545	511	507	813	1087	1030	971
	8	apikal	118	153	116	124	830	728	674	858
	8	mittig	380	421	390	377	1199	1297	984	1219
	8	koronal	587	573	498	469	1147	1568	951	861
	9	apikal	652	485	540	400	1440	1454	976	1070
	9	mittig	345	444	467	446	1061	1166	1000	1025
	9	koronal	676	517	710	743	1053	1120	718	810
	10	apikal	0	0	0	0	771	700	0	0
	10	mittig	401	363	283	275	774	701	603	1139
	10	koronal	283	595	401	242	412	423	1076	1033

TotalFill BC	1	apikal	72	81	133	153	128	124	207	186
	1	mittig	1385	1468	1416	1375	1905	2149	2008	2172
	1	koronal	1314	1371	841	1360	1135	1055	1743	1933
	2	apikal	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	mittig	0	0	0	0	1206	1183	995	1194
	2	koronal	1741	1383	1654	1776	1893	2006	2029	2300
	3	apikal	285	0	260	0	426	515	493	465
	3	mittig	721	642	536	565	1425	1384	1214	1584
	3	koronal	280	598	483	385	793	576	1171	875
	4	apikal	489	514	493	419	606	498	429	438
	4	mittig	829	768	633	853	1613	1533	1470	1214
	4	koronal	984	903	898	843	1528	1627	1757	1575
	5	apikal	895	894	645	884	1285	1348	1393	1257
	5	mittig	992	1085	998	855	1538	1808	1768	1786
	5	koronal	865	791	905	1040	1543	1492	1067	1180
	6	apikal	130	85	469	163	624	573	649	523
	6	mittig	509	523	725	523	805	736	463	491
	6	koronal	538	297	393	230	482	384	425	515
	7	apikal	435	375	555	500	1022	1282	1051	1246
	7	mittig	1340	1105	1114	1002	2096	1859	1350	1780
	7	koronal	1150	976	1080	746	1497	1232	1477	1498
	8	apikal	396	360	0	0	667	614	432	397
	8	mittig	343	733	963	734	1418	1334	808	1101
	8	koronal	1081	1094	1137	1058	1768	1773	1994	2007
	9	apikal	0	0	0	0	840	859	888	794
	9	mittig	1145	1025	891	921	1673	1859	1493	1350
	9	koronal	1144	939	1444	1039	1609	1720	1264	1322
	10	apikal	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	mittig	325	305	395	379	384	409	373	379
	10	koronal	698	1140	1194	609	1919	2194	900	909

Im Folgenden sind die Einzelwerte der Umfänge der Wurzelkanäle und der von Sealer benetzten Oberfläche in µm und % aufgelistet.

AH +	Umfang in µm	Penetrierter Umfang in µm	Penetrierter Umfang in %
Zahn 1			
apikal	1875,27	1061,61	56,61
mittig	2306,97	1659,14	71,92
koronal	2939,79	2265,83	77,07
Zahn 2			
apikal	2769,52	1363,57	49,23
mittig	3078,75	3078,75	100
koronal	4229,56	4229,56	100

Zahn 3			
apikal	3084,91	1781,88	57,76
mittig	4574,31	3684,81	80,56
koronal	4587,14	3024,83	65,94
Zahn 4			
apikal	2018,72	1306,76	64,73
mittig	2161,9	1638	75,77
koronal	3059,8	3059,8	100
Zahn 5			
apikal	2181,74	1406,02	64,44
mittig	1934,23	1463,42	75,65
koronal	4212,56	2851,64	67,7
Zahn 6			
apikal	2456,62	2092,41	85,17
mittig	3809,33	3513,19	92,23
koronal	5040,27	5040,27	100
Zahn 7			
apikal	2235,71	556,11	24,87
mittig	2645,27	1717,96	64,94
koronal	4163,49	3992,04	95,88
Zahn 8			
apikal	3348,93	3348,93	100
mittig	3480,66	3480,66	100
koronal	5120,5	4718,05	92,14
Zahn 9			
apikal	2184,71	2184,71	100
mittig	2867,31	2867,31	100
koronal	4575,85	4575,85	100
Zahn 10			
apikal	2120,39	2120,39	100
mittig	2599,96	2599,96	100
koronal	6315,98	6315,98	100
ProRoot MTA			
Zahn 1			
apikal	2471,13	2471,13	100
mittig	2749,97	2749,97	100
koronal	5462,41	5462,41	100
Zahn 2			
apikal	2734,52	2624,28	95,97
mittig	3241,94	3241,94	100
koronal	3998,42	3998,42	100

Zahn 3			
apikal	2349,76	2349,76	100
mittig	3041,85	3041,85	100
koronal	4577,11	4577,11	100
Zahn 4			
apikal	2034,51	2034,51	100
mittig	2520,65	2520,65	100
koronal	4381,82	4381,82	100
Zahn 5			
apikal	1542,64	1542,64	100
mittig	2079,71	2079,71	100
koronal	3509,88	3509,88	100
Zahn 6			
apikal	1810,91	1605,79	88,67
mittig	2050,27	2050,27	100
koronal	3089,93	2769,81	89,64
Zahn 7			
apikal	2018,51	2018,51	100
mittig	2263,47	2029,36	89,66
koronal	4795,87	4795,87	100
Zahn 8			
apikal	3152,86	3067,63	97,3
mittig	3758,02	3690,31	98,2
koronal	4967,94	4967,94	100
Zahn 9			
apikal	1426,12	1426,12	100
mittig	2251,11	2251,11	100
koronal	4737,33	4737,33	100
Zahn 10			
apikal	1975,92	1385,96	70,14
mittig	2070,97	1569,83	75,8
koronal	4851,71	2150,11	44,32
MedCem MTA			
Zahn 1			
apikal	1953,99	1485,01	75,99
mittig	2182,45	2127,3	97,47
koronal	3169,48	3169,48	100
Zahn 2			
apikal	1533,59	313,5	20,44
mittig	1950,16	1340,57	68,74
koronal	2520,72	2507,2	99,46
Zahn 3			

apikal	2888,18	744,77	25,79
mittig	2624,91	1827,95	69,64
koronal	5795,42	5795,42	100
Zahn 4			
apikal	3600,9	1717	47,68
mittig	2697,33	2697,33	100
koronal	4514,69	3040,77	67,35
Zahn 5			
apikal	1777,72	1777,72	100
mittig	1988,93	1988,93	100
koronal	3135,94	2948,73	94,03
Zahn 6			
apikal	2575,49	1992,63	77,37
mittig	2897,38	2897,38	100
koronal	3674,5	3674,5	100
Zahn 7			
apikal	2282,97	2201,87	96,45
mittig	2591,73	2591,73	100
koronal	3044,69	3044,69	100
Zahn 8			
apikal	2141,27	754,86	35,25
mittig	2430,51	1282,55	52,77
koronal	3993,84	3593,5	89,98
Zahn 9			
apikal	2331,17	1801,34	77,27
mittig	2716,67	2295,04	84,49
koronal	3327,17	3327,17	100
Zahn 10			
apikal	2137,16	1105,47	51,73
mittig	2673,15	1148,96	42,98
koronal	3395,55	3395,55	100
Total Fill BC			
Zahn 1			
apikal	1422,91	1422,91	100
mittig	2853,51	2853,51	100
koronal	4035,2	4035,2	100
Zahn 2			
apikal	1638,21	518,24	31,63
mittig	2485,22	1492,22	60,04
koronal	3871,06	2484,52	64,18
Zahn 3			
apikal	2041,52	1719,32	84,21

mittig	3111,99	3050,27	98,02
koronal	3395,76	2928,8	86,25
Zahn 4			
apikal	1897,14	824,15	43,44
mittig	3492,34	2242,04	64,2
koronal	2964,3	2964,3	100
Zahn 5			
apikal	1875,55	1666,6	88,86
mittig	1975,64	1975,64	100
koronal	4072,81	4072,81	100
Zahn 6			
apikal	1314,94	634,45	48,25
mittig	2091,78	1395,97	66,74
koronal	1948,92	1518,69	77,92
Zahn 7			
apikal	1311,4	736,13	56,13
mittig	2618,57	2618,57	100
koronal	3180,69	3180,69	100
Zahn 8			
apikal	1761,76	1235,14	70,11
mittig	2892,16	2892,16	100
koronal	2602,09	2602,09	100
Zahn 9			
apikal	1341,56	598,41	44,61
mittig	2428,93	1672,78	68,87
koronal	3445,03	3445,03	100
Zahn 10			
apikal	2166,03	898,34	41,47
mittig	2867,45	2867,45	100
koronal	3525,65	3525,65	100

9 Danksagungen

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich auf dem Weg bis zur Fertigstellung meiner Dissertation begleitet haben und mich in dieser Zeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt:

Frau Prof. Dr. med. dent. Huth, die mir diese Dissertation überhaupt erst ermöglicht hat, mir alle benötigten Ressourcen zur Verfügung gestellt hat und mich durch ständige Motivation immer wieder zum Durchhalten ermutigt hat.

Herrn Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel, der mir die Möglichkeit gegeben hat, in der Abteilung für Zahnerhaltung und Parodontologie der Ludwig-Maximilians-Universität München eine Dissertation verfassen zu dürfen.

Herrn Prof. Dr. Dr. Folwaczny für die Bereitstellung des Lasermikroskops, welches ein wichtiges Element in der Auswertung der Versuche darstellte.

Meinen Mitbetreuern Dr. med. dent. Stefan Kist und Dr. med. dent. Maximilian Kollmuß für die Begleitung und Hilfe bei allen Arbeitsschritten und die Unterstützung beim Auswerten und Fertigstellen der Dissertation.

Meiner Freundin und meiner gesamten Familie, die mir viel Kraft gegeben haben und es so ermöglicht haben, dass ich meine Motivation nicht verloren habe und die Dissertation fertigstellen konnte.

Eidesstattliche Versicherung

Frisch, Nicolas Maximilian

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Untersuchung des Penetrationsverhaltens von AH Plus®, Medcem MTA®, ProRootMTA® und Total Fill BC Sealer® in Dentintubuli mittels konfokalem Laserscanning-Mikroskops

selbstständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Berlin, den 06.08.2018

Ort, Datum

Nicolas Maximilian Frisch

Unterschrift Doktorandin/Doktorand