**Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie**

**der Ludwig-Maximilians-Universität München**

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

# Experimentelle Studie zur Untersuchung der Dichtigkeit verschiedener Wurzelkanalsealer anhand einer quantitativen Glucose-Penetrations-Methode

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Giorgio Dennis Merten

aus Berlin

2018

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität München

| | |
|---|---|
| Berichterstatter: | Prof. Dr. med. dent. Karin C. Huth, MME |
| Mitberichterstatter: | Prof. Dr. Dr. Johannes Randzio |
| Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter: | Dr. med. dent. Maximilian Kollmuß |
| Dekan: | Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 14.06.2018 |

**Carpent tua poma nepotes**

## Inhaltsverzeichnis


**1 Einleitung.....6**

1.1 Ätiologie der Karies.....6

1.1.1 Mikrobiologische Aspekte.....7

1.1.2 Zeit und Zucker (Substrat).....7

1.1.3 Wirtsfaktoren.....8

1.2 Ätiologie der apikalen Parodontitis.....8

1.3 Pathomechanismus der apikalen Parodontitis.....10

1.4 Therapie der apikalen Parodontitis.....12

1.4.1 Chemo-mechanische Wurzelkanalaufbereitung.....13

1.4.2 Wurzelkanalfüllung.....16

1.5 Mineral Trioxide Aggregate.....21

1.6 In-vitro Analyse der Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen.....22

1.6.1 Farbstoffpenetrationstest.....23

1.6.2 Glucosepenetrationstest.....24

**2 Fragestellung und Studienziele.....25**

**3 Material und Methode.....26**

3.1 Vorversuche zum Mischungsverhältnis von MTA.....27

3.2 Auswahl der Versuchszähne.....28

3.3 Vorbereitung der Versuchszähne.....28

3.4 Löslichkeitsprüfung der verwendeten Werkstoffe.....29

3.5 Reaktionsfähigkeit Sealer/Glucose.....30

3.6 Aufbereitung der Wurzelkanäle.....30

3.7 Wurzelkanalfüllung.....31

3.8 Versuchsaufbau.....34

3.9 Glucose Assay zum Nachweis der Dichtigkeit.....37

3.10 Statistische Auswertung.....38

**4 Ergebnisse.....40**

4.1 Mischungsverhältnis MTA.....40

4.2 Löslichkeit nach DIN-ISO-Norm.....40

4.3 Reaktionsfähigkeit zwischen Sealer und Glucose.....41

4.4 Auswertung des Experimentes zur Glucose Penetration.....41

**5 Diskussion.....45**

**6 Zusammenfassung.....56**

**7 Literaturverzeichnis.....58**

**8 Abbildungsverzeichnis.....71**

**9 Tabellenverzeichnis.....73**

**10 Danksagung.....74**

**11 Lebenslauf.....75**

# 1 Einleitung

In der kontemporären Zahnerhaltung stellt die Behandlung eines infizierten Wurzelkanalsystems und der apikalen Parodontitis zum langfristigen Erhalt von Zähnen einen zentralen Inhalt dar (DGZMK). Eine angefertigte Studie belegt, dass durchschnittlich pro Erwachsenem 2,2 Zähne eine endodontische Behandlung aufweisen (Eriksen, 1998). Die Bedeutung der Endodontologie für die Zahnmedizin wird durch die Abrechnungszahlen der Kassenzahnärztlichen Bundesvereinigung deutlich, aus denen ersichtlich wird, dass allein in Deutschland im Jahr 2015 insgesamt 7,029 Millionen Wurzelkanalfüllungen abgerechnet wurden (KZVB Jahrbuch 2015). In einer Studie von 2011 wurde dargelegt, dass die Langzeitprognose (5 Jahre) eines aufgrund von apikaler Parodontitis behandelten Zahnes bei durchschnittlich 82,7% liegt (Ricucci *et al.*, 2011). Eine andere Studie gibt eine Erfolgsquote im Bereich von 68-86% bei Zähnen mit apikaler Parodontitis an (Trope und Debelian, 2009). Die Interpretation dieses Wertes in Verbindung mit der hohen Summe an abgerechneten Wurzelkanalfüllungen zeigt, dass es im Interesse der minimalinvasiven Zahnerhaltung liegt, die Langzeitprognose von endodontisch behandelten Zähnen zu verbessern.

Die eigentliche Obturation des chemo-mechanisch aufbereiteten Wurzelkanalsystems bestimmt entscheidend über den Therapieerfolg mit (Oddoni *et al.*, 2008). Denn als Ergebnis wird ein dauerhafter, flüssigkeits- und bakteriendichter Verschluss des gesamten Wurzelkanalsystems mit biokompatiblen, unlöslichen Materialien angestrebt (DGZMK). Dieser Verschluss beinhaltet standardmäßig zumeist ein ausfüllendes Kernmaterial, wie zum Beispiel Guttapercha (Hellwig, 2007). Ebenso notwendig ist ein visköses Sealermaterial zum Ausgleich kleinster Unebenheiten, Füllung kleinster Seitenkanäle sowie um einen Verbund zwischen Kernmaterial und Kanalwand zu erzielen (McMichen *et al*., 2003). Durch die stetige Neu- und Weiterentwicklung solcher Sealer ist es von größtem Interesse für den langfristigen Therapierfolg und die Optimierung der Langzeitprognose über die beschriebenen 82,7% hinweg, deren Eigenschaften genauer zu untersuchen und neue Werkstoffe zu testen.

## 1.1 Ätiologie der Karies

Die Schädigung der Pulpa durch eine bakterielle Infektion des pulpalen Gewebes auf Basis einer tiefen kariösen Läsion, ist die wohl häufigste Ursache für die Erkrankungen des apikalen Parodontiums.

Neben zahlreichen möglichen Mechanismen, ist eine der Hauptursachen zur Gefährdung der Pulpa durch Mikroorganismen vor allem eine tiefe kariöse Dentinläsion, die zur Nekrose der Pulpa führt (Fabricius *et al.*, 1982). Wie in Abbildung 1 dargestellt, entsteht Karies durch das Zusammenwirken

von vier zentralen Faktoren, gegen die das Immunsystem oftmals chancenlos ist und es somit zur Erkrankung kommt. Von hoher Bedeutung sind hierbei allen voran niedermolekulare Kohlenhydrate, welche Bakterien als Substrat zur Stoffwechseltätigkeit dienen. Durch die bakterielle Stoffwechseltätigkeit werden organische Säuren gebildet, welche bei ausreichender Konzentration und Wirkungsdauer auf die mineralisierten Zahnhartsubstanzen wirken. Daraus resultiert ein fortschreitendender Strukturverlust, hervorgerufen durch die Auflösung der Hydroxylapatitkristallstruktur im Schmelz und Dentin (Miller, 1899).

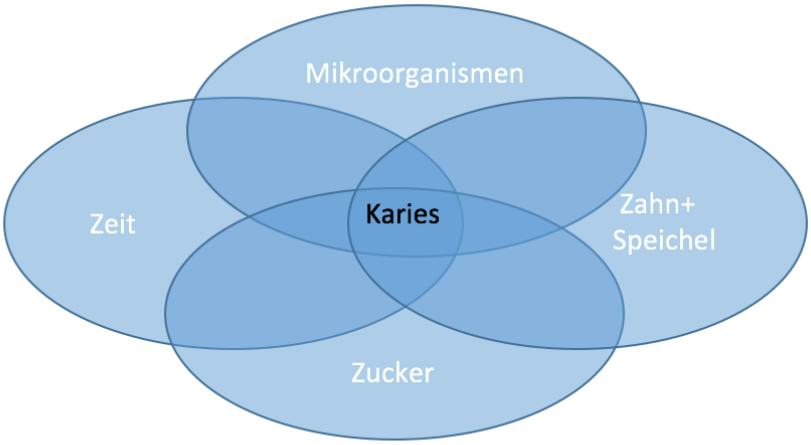


*Abbildung 1: Faktoren für die Entstehung einer Karies (Model nach König, 1971)*

### 1.1.1 Mikrobiologische Aspekte

Bereits vor mehr als 50 Jahren wurde experimentell gezeigt, dass das Vorkommen von Mikroorganismen für die Entstehung von Karies unabdingbar ist (Orland *et al.,* 1955; Orland *et al.,* 1994). In den Versuchen wurden Ratten, die zuvor keimfrei aufgezogen wurden sowie nachträglich oral bakteriell infizierte Ratten über einen Zeitraum von 150 Tagen mit einer besonders kohlenhydratreichen Kost ernährt. Dabei wurde festgestellt, dass die keimfrei aufgezogenen Ratten kariesfrei waren und die zuvor infizierten Ratten eine hohe Rate an kariösen Läsionen aufwiesen. Ein mögliches Modell der Ätiologie von Karies und das Zusammenwirken von Zahn, Mikroorganismen und Substrat wurde circa 70 Jahre nach Millers Tierversuchen aufgestellt (Miller 1899). Durch Anfertigen weiterer Tierstudien entwickelte Keyes ein gemeinsames Wirkungsprinzip dieser einzelnen Faktoren untereinander (Keyes, 1960; Keyes, 1968).

### 1.1.2 Zeit und Zucker (Substrat)

Zahlreiche Untersuchungen der Universität Turku in Finnland beschäftigten sich über zwei Jahre hinweg mit den Auswirkungen von Fructose (Monosaccharid), Saccharose (Disaccharid bestehend aus je einem Molekül Glucose und Fructose) und von Xylit (Zuckeraustauschstoff) an 125 Probanden im Jugend- bis ins Erwachsenenalter. Die Teilnehmer wurden randomisiert auf drei Gruppen aufgeteilt. Diese Gruppen unterschieden sich durch eine Ernährung mit lediglich je einer der drei Zuckersorten. Als Abschlussergebnis konnte beobachtet werden, dass gemessen anhand des DMFT-Index die Xylit Gruppe einen Wert von 0 und die Gruppen Saccharose und Fruktose jeweils einen Wert von 7,2 und 3,8 aufwiesen (Scheinin *et al.*, 1975a; Scheinin *et al.*, 1975b).

### 1.1.3 Wirtsfaktoren

Der Zahn selbst und der ihn umgebende antibakteriell wirkende Speichel, stellen den Faktor Wirt dar. Der physiologische Speichel, produziert durch die im Kopfbereich befindlichen unterschiedlichen Speicheldrüsen, hat eine serös-muköse Zusammensetzung. Er zeigt durch chemische Prozesse eine Bikarbonatpufferwirkung im Sinne des Massenwirkungsgesetzes (Bardow *et al.*, *2000*) sowie eine Remineralisationswirkung an der Oberfläche der Zahnhartsubstanz. Diese Remineralisationswirkung ist schematisch in Abbildung 2 skizziert. Durch diese Mechanismen wird die Zahnhartsubstanzen geschützt und ein kariostatischer Einfluss auf die Zahnhartsubstanz ausgeübt.

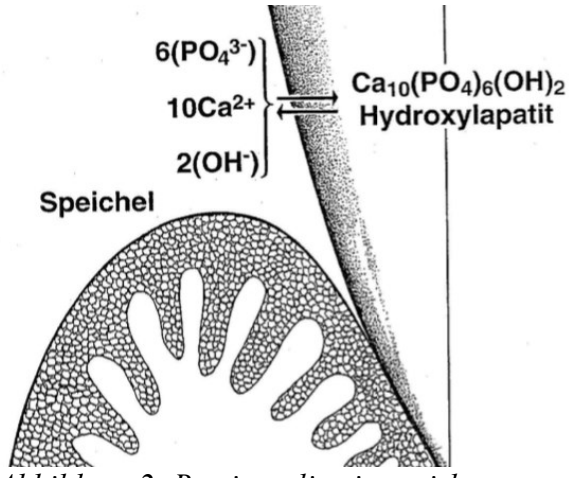


*Abbildung 2: Remineralisationswirkung-kung an der Zahnoberfläche (Zimmer, 2000)*

## 1.2. Ätiologie der apikalen Parodontitis

Schreitet eine Kariöse Läsion in die Tiefe fort, kann es zu einer Infektion des pulpalen Gewebes mit Mikroorganismen kommen. Die Mechanismen für ein Eindringen in die Pulpa sind zahlreich; tiefe kariöse Dentinläsionen stellen dabei eine der häufigsten Ursachen dar (Fabricius *et al.*, *1982*). Belegt wurde dieser bakteriell bedingte Pathomechanismus durch eine oftmals zitierte Studie, in denen zwei Rattenpopulationen untersucht wurden. In der Studie wurde die Pulpa von keimfrei aufgezogenen Ratten, sowie die Pulpa von Ratten mit physiologischer Mundflora artifiziell eröffnet und in situ belassen. Die Gruppe der sterilen Ratten zeigte im Verlauf keinerlei Symptome, die auf eine apikale Parodontitis deuten ließen (Kakehashi *et al.,* 1965).

Jedoch kann die Pulpa nicht nur durch die Auflösung der Zahnhartsubstanz und damit durch eine direkte Eröffnung des Pulpencavums infiziert werden (Bergenholtz, 1977; Pissiotis und Spångberg, 1944). Ein weiterer Mechanismus ist die Passage der im Durchmesser 1-2 µm breiten Dentintubuli durch Bakterien (Reeves und Stanley, 1966), welche die Wahrscheinlichkeit einer Pulpitis erheblich steigert. Dieser Prozess kann aktiv durch das Vordringen dieser Bakterien bis in das Cavum selbst geschehen, wie auch durch den passiven Transport von ihren Toxinen, zum Beispiel Lipoteichonsäure, über den Dentinliquor. Das chronisch längere Bestehen einer Pulpitis führt über das Stadium der irreversiblen Pulpitis zwangsläufig zur Pulpanekrose und letztendlich zur Ausbreitung der Infektion über den Apex hinaus in das periapikale Gewebe. Dies führt zur Osteolyse wie in Abbildung 3 dargestellt.

*Abbildung 3: Radiologischer Befund mit apikaler Aufhellungszone*

In der Praxis kommt es aber auch gelegentlich zu Fällen, in denen der Zahn keine kariöse Lasion aufweist, jedoch Symptome einer apikalen Parodontitis zeigt. Dieses klinische Bild untersuchte

Love in einer *In*-Vitro Studie, in der er auf 20 Testzähne über einen Zeitraum von 7 Tagen eine mit *Streptococcus gordonii versetzte* Suspension wirken lies. Es zeigte sich, dass 16 Zähne nicht infiziert wurden. Auf diese 16 Zähne ließ er durch einen Schlag geringfügig mechanische Kraft wirken und testete sie nach 7 Tagen erneut. Als Ergebnis konnte er feststellen, dass 7 der 16 Zähne nach dieser Zeit nun infiziert waren und schloss daraus, dass kleinste Schmelz- und Dentinfrakturen eine mögliche Invasionsquelle für Bakterien darstellen können (Love, 1996).

Die Entität der marginalen Parodontitis kann eine weitere Ursache für die Ausbildung einer apikalen Parodontitis darstellen. Durch die marginale Parodontitis nimmt diese Ursache stetig an medizinischer Relevanz zu. Dies wird durch die Betrachtung der Verbreitung der Krankheit innerhalb der Bevölkerung ersichtlich. In der mittleren Altersgruppe (35 bis 44-Jährige) leiden 52,7% an einer mittelschweren und 20,5% an einer schweren Parodontitis (Micheelis und Schiffner, 2006). Vergleichend mit der Gruppe der Senioren, in der 48% an einer mittelschweren und 39,8% an einer schweren Parodontitis leiden wird deutlich, dass die Anzahl der Patienten mit einer schweren Form der Parodontitis mit zunehmendem Alter ansteigt. Begründend auf dem vertikalen Knochenabbau können Bakterien das Wurzelkanalsystem auf diesem Weg infizieren. Dabei schaffen sie sich durch kleinste laterale Dentinkanäle oder das Foramen apikale einen Zugang zum Wurzelkanalsystem (Siqueira, 2011a). In einer durchgeführten Studie wurde dieser Aspekt weiterführend untersucht, die Infektion des Foramen apicale führte hierbei zu einer Nekrose der Pulpa und damit zur Ausbildung einer apikalen Parodontitis (Langeland *et al.*, 1974).

Die Erkrankungen des periapikalen Gewebes wurde wie folgt von der World Health Organization 1995 in fünf Kategorien unterteilt (ICD-10-GM Version 2013) und sind in Tabelle 1 dargestellt.

| |
|---|
| K04.4 Akute apikale Parodontitis ausgehend von der Pulpa |
| K04.5 Chronische apikale Parodontitis ausgehend von der Pulpa |
| K04.6 Periapikaler Abszess mit Fistel |
| K04.7 Periapikaler Abszess ohne Fistel |
| K04.8 Radikuläre Zyste |

*Tabelle 1: Die Erkrankung des periapikalen Gewebes (nach WHO ICD-10-GM Version 2013)*

## 1.3 Pathomechanismus der apikalen Parodontitis

Aufgrund der Penetration von Bakterien oder deren Toxine in das pulpale Gewebe erwidert das unspezifische Immunsystem als erste Abwehrreaktion des Organismus (Behrends *et al.*, 2010; Siqueira, 2011b). Durch bakterielle Stoffwechselprodukte wie z.B. Lipoteichonsäure, welche an zellmembranständige Toll-like-Rezeptoren bindet, kommt es zur zellulären Immunantwort. Hierbei wirken zelluläre Bestandteile wie z.B. Monozyten, Granulozyten und Makrophagen durch Phagozytose sowie die Ausschüttung von Zytokinen und vasoaktiv wirkenden Substanzen wie Prostaglandinen und Thromboxanen der Bakterieninvasion entgegen. Diese Mechanismen sorgen für eine Erhöhung der Anzahl von neutrophilen Granulozyten am Entzündungsort und einen verlangsamten Blutfluss, wodurch Leukozyten verstärkt aus den Kapillargefäßen austreten können. Insbesondere durch die unspezifische humorale Immunantwort, dessen Bestandteile Lysozyme, Zytokine, Akut-Phase Proteine sowie das Komplementsystem sind, kommt es zu einer Lyse der Bakterien.

Bei einer länger bestehenden Entzündung kommt es verzögert auch zu einer Aktivierung des spezifischen Immunsystems mit einer humoralen sowie zellulären Komponente. Durch das Aktivieren von B- und T-Lymphozyten kommt es zu einer Bildung von Antikörpern und Zytokinen.

Die zuvor beschriebenen Mechanismen einer akuten Entzündung erklären auch, weshalb es infolge einer länger anhaltenden Entzündung letztendlich zur Pulpanekrose kommt. Aufgrund der entzündungsbedingten Ausschüttung von Prostaglandinen und Thromboxanen kommt es zu einer erhöhten Durchblutung innerhalb des Zahnes (Siqueira, 2011c). In Folge dessen es entlang des Konzentrationsgefälles zu einer verstärkten Flüssigkeitsansammlung im pulpalen Gewebe kommt und der Druck innerhalb des Zahnes erheblich steigt. Aus der fortschreitenden Kompression und der kaum vorhandenen Ausdehnungsmöglichkeiten des entzündeten Gewebes innerhalb der Zahnhartsubstanz resultiert eine Strangulation der versorgenden Blutgefäße. Das für den Zahn folgenschwere Ergebnis ist die Pulpanekrose.

Die weitere Ausbreitung der Bakterien in Richtung des apikalen Parodontiums erfolgt vorrangig anhand zweier Mechanismen. Zum einen ist es möglich, dass sich die Bakterien planktonisch ausbreiten. Dies tritt meist bei hoch virulenten Bakterien in der ersten akuten Phase der apikalen Parodontitis auf (Siqueira, 2011d). Eine andere Ausbreitungsform ist die Organisation von zumeist weniger virulenten Bakterien, zu einem sich ausbreitenden chronisch existenten Biofilm. Das Entstehen solch eines Biofilms bietet den Bakterien eine Vielzahl an zusätzlichen Vorteilen. Sie sind dadurch wesentlich resistenter gegenüber Angriffen des Immunsystems und etwaiger Medikamente und können darüber hinaus miteinander über Signalmoleküle kommunizieren (Siqueira, 2011d).

Die sich nach apikal ausbreitende Entzündung bewirkt eine Knochenresorption. Das mit dem Knochenstoffwechsel in Verbindung stehende RANK/RANKL-System (receptor activator of nuclear factor Kappa-B/receptor activator of nuclear factor Kappa-B ligand) wird durch die Entzündung gestört. Im gesunden Organismus steuern die Osteoblasten über das Sezernieren von Osteoprotegerin und RANKL den Knochenauf- und abbau. Jedoch können, dargestellt in Abbildung 4, zuvor aktivierte T-Zellen ebenso RANKL ausschütten (Kong *et al.*, 1999). Auf diesem Weg binden diese an Osteoklasten Progenitorzellen ständige RANK Rezeptoren und beeinflussen eine Differenzierung zu Osteoklasten (Lacey *et al.*, 1998).

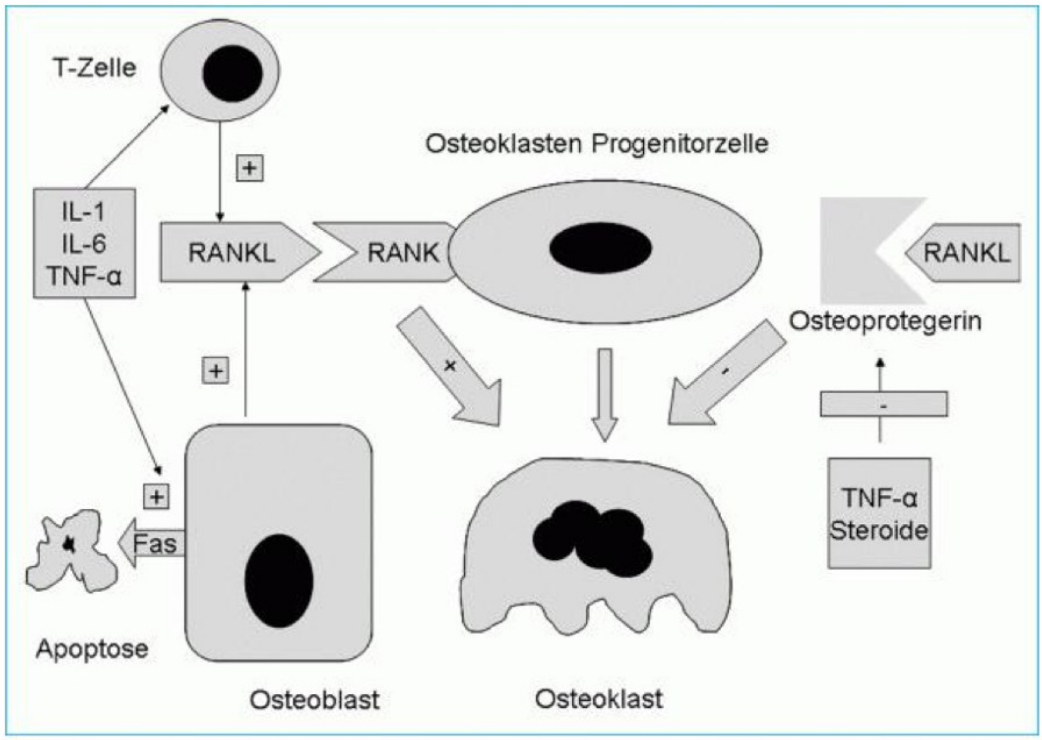


*Abbildung 4: Mineralstoffwechsel des Knochens (nach Eser und Vogelsang 2008)*

Zusätzlich kann es durch Stimulation von Monozyten durch bakterielle Lipopolysaccharide zu einer Sezernierung von Tumornekrosefaktor-α, Interleukinen und Prostaglandin $E_1$ und $E_2$ kommen, welche die Osteoklasten über RANKL und Osteoprotegerin stimulieren und über vermehrte Expression von alkalischer Phosphatase, zu einer Auflösung des periapikalen Knochens führen (Klein und Raisz, 1970; Bertolini *et al.*, 1986; Nguyen *et al.*, 1991).

Abschließend ist weiterhin auf die Unterscheidung zwischen Mischinfektion und Monoinfektionen hinzuweisen, die einen erheblichen Einfluss auf den Krankheitsverlauf und die Ausprägung der apikalen Parodontitis haben. Gezeigt wurde unter anderem, dass eine Infektion durch eine Mischinfektion eine ausgedehntere apikale Resorption verursacht (Fabricius *et al.*, 1982). In ihren Untersuchungen an Affen analysierten sie röntgenologische Aufnahmen und stellten fest, dass Mischinfektionen zu ausgedehnteren apikalen Transluzenzen führten.

## 1.4 Therapie der apikalen Parodontitis

Bei einem erhaltungswürdigen Zahn mit apikaler Parodontitis ist die Therapieempfehlung eine chemo-mechanische Wurzelkanalaufbereitung, gegebenenfalls eine Medikamenteneinlage und letztendlich die anschließende Obturation durch Sealer und Guttapercha durch laterale Kompaktion (DGZMK 2007). Diese Behandlung hat eine chemo-mechanische Eliminierung des pulpalen Gewebes und der Mikroorganismen im Wurzelkanalsystem zum Ziel (Pitt Ford, 2002). Um dieses Behandlungsziel zu erreichen, sollten folgende Aspekte beachtet werden. Es wird eine vollständige Entfernung des vitalen als auch des nekrotischen Pulpagewebes vorausgesetzt sowie eine vollständige Eliminierung der Mikroorgansimen (ESE 2006). Ein Erhalt der physiologischen apikalen Konstriktion und des natürlichen Wurzelkanalverlaufes sollte angestrebt werden. Die spätere dicht abschließende Wurzelkanalfüllung mittels Sealer und Guttapercha (Apical Sealing) sollte durch eine bestmöglich dichte koronale Restauration (Coronal Sealing) komplettiert werden (Ray und Trope, 1995). Die Durchführung der Wurzelkanalbehandlung in einer einzigen Sitzung oder mehrzeitig unter Verwendung einer kalziumhydroxidhaltigen ($Ca(OH)_2$) Medikamenteneinlage sind beides adäquate Therapieformen.

### 1.4.1 Chemo-mechanische Wurzelkanalaufbereitung

Der Schaffung einer Zugangskavität, Darstellung der Kanaleingänge und der Herstellung einer initialen Kanalgängigkeit folgt die Arbeitslängenbestimmung. Aufgrund der Variabilität in Bezug auf Form und Lokalisation der apikalen Konstriktion waren oftmals Schwierigkeiten bei der korrekten Definition der Arbeitslänge festzustellen (Gyorfi und Fazekas, 2006). Die Lokalisierung der apikalen Konstriktion (Foramen physiologicum) sollte die Arbeitslänge limitieren und unter zur Hilfenahme einer röntgenologischen, sowie vor allem der ihr deutlich überlegenen endometrischen Diagnostik, bestimmt werden (Pratten *et al.*, 1996; De Moor *et al.*, 1999; Pitt Ford, 2002). Durch die Kombination beider Verfahren ist einerseits eine bildliche Darstellung des Wurzelkanals möglich, die unter anderem Aufschluss über die Anzahl der Wurzelkanäle und deren Krümmung gibt. Zusätzlich gibt die über eine Elektrodenimpedanz funktionierende endometrische Längenbestimmung innerhalb geringster Toleranzen die exakte Arbeitslänge bis auf Zehntel Millimeter genau an (Haffner, 2005). Ein weiterer medizinischer Vorteil ist die erfolgreiche Durchführbarkeit dieser Methode, selbst bei Verwendung kleiner Feilen der Größen ISO 06 bis ISO 10 (Kim, 2010). Dabei kann die Endometrie beliebig oft am Patienten ohne schädliche Strahleneinwirkung wiederholt werden. Nach der definitiven Bestimmung der Arbeitslänge beginnt die eigentliche Aufbereitung des Wurzelkanalsystems.

Nickel-Titan Instrumente

Die mechanische Aufbereitung des Wurzelkanals erfolgt unter zur Hilfenahme von Feilen aus einer NiTi-Legierung. Hierdurch wird das Kanallumen erweitert, sowie infiziertes Gewebe abgetragen und damit die Bakterienlast enorm reduziert (Bystrom und Sundqvist, 1981; Shuping *et al.*, 2000; Kist *et al.*, 2016). Die in Abbildung 5 und 6 bespielhaft dargestellten Nickeltitan-Feilen zeichnen sich durch besondere Eigenschaften aus, die eine erleichterte und weniger traumatische Aufbereitung gekrümmter Kanäle ermöglichen (Mounce, 2004). Die in der Literatur vielmals beschriebenen Eigenschaften wie Formgedächtnis und ein pseudoelastisches Verhalten sind auf die Materialeigenschaften der Nickel-Titan-Legierungen zurückzuführen (Baumann, 2004; Pitt Ford, 2002; Kazemi, 2000). Auch ermöglichen solche Legierungen den Einsatz einer rotierenden maschinellen Aufbereitungsmethode, zum Beispiel das Mtwo System (VDW, München, Deutschland). Diese Methode ermöglicht es dem Behandler einen gleichmäßigeren Dentinabtrag zu erreichen und gleichzeitig aktiv das Debris aus dem Kanal nach koronal zu befördern. Die nicht schneidende Instrumentenspitze reduziert zusätzlich die Gefahr einer möglichen Perforation (Hülsmann, 2002; Inan und Gonulol, 2009; Tepel, 1998) oder einer Via Falsa. Für den bestmöglichen Einsatz dieser Instrumente und die Verminderung der erhöhten Gefahr einer Instrumentenfraktur (Sattapan, 2000) ist es nötig, sie nach Angaben der Hersteller unter zur Hilfenahme eines drehmomentbegrenzten Motors einzusetzen (Tepel, 1998; Yared, 2002).

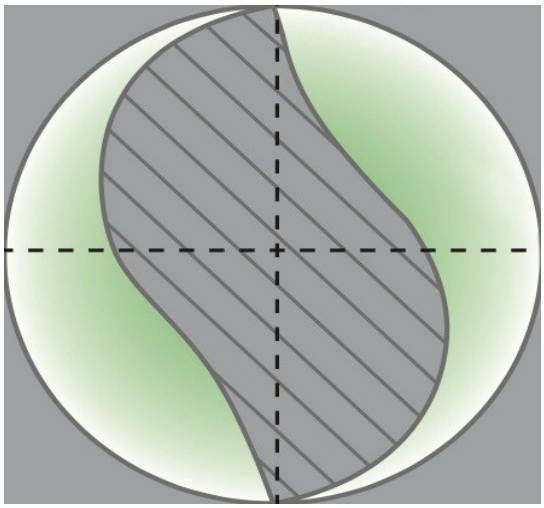

*Abbildung 5: Aufbau einer NiTi Feile / Querschnitt*

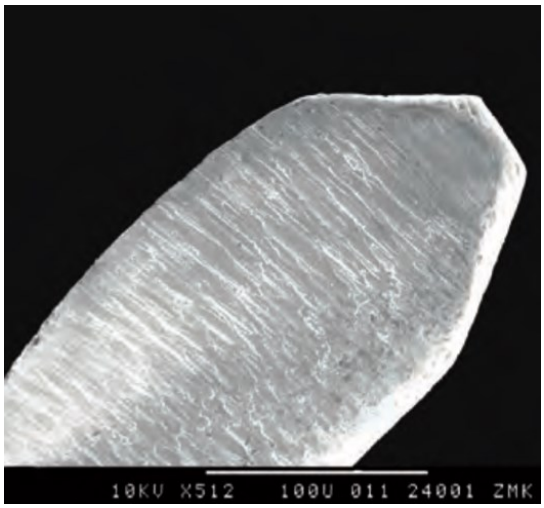


*Abbildung 6: Aufbau einer NiTi Feile / nicht schneidende Spitze*

Durch die alleinige mechanische Aufbereitung unter Verwendung von Feilen aufsteigender Größe, insbesondere im apikalen Drittel, kann die Bakterienanzahl effektiv dezimiert werden (Bystrom und Sundqvist, 1981; Dalton *et al.*, 1998; Siqueira *et al.*, 1999; Shupping *et al.*, 2000; Kist *et al.,* 2016). Eine alleinige Aufbereitung durch Feilen wäre jedoch mit einem erhöhten Dentinabtrag gekennzeichnet und würde die Zahnwurzel zu sehr schwächen. Zusätzlich ist zu beachten, dass

auch nicht alle Seitenkanäle sowie Dentintubuli von Mikroorganismen befreit werden könnten. Daher erfolgt zusätzlich zur Steigerung der Effektivität, eine chemische Aufbereitung durch Verwendung antimikrobieller Spülflüssigkeiten (Shuping *et al.*, 2000; Kvist *et al.*, 2004).

Chemische Aufbereitung

In den meisten Fällen der Endodontologie werden hierfür Natriumhypochlorit (NaOCl) sowie Ethylendiamintetraacetat (EDTA) verwendet. Durch eine zusätzliche Aktivierung der Spüllösung mittels Ultraschall kann der antimikrobielle Effekt im apikalen Drittel deutlich erhöht werden (Gutarts *et al.*, 2005; Burleson und Nusstein, 2007; Van der Sluis *et al.*, 2007; Herrera *et al.*, 2013).

Der Einsatz von Natriumhypochlorit in der Wurzelkanalaufbereitung erfolgt bereits seit 1950. Es stellt heutzutage im Bereich einer Konzentration von 0,5–6% (Torabinejad, 2003) den Goldstandard in der Endodontie dar und wird am häufigsten genutzt (Dammaschke *et al.,* 1999; Clarkson *et al.,* 2003; Vianna *et al.,* 2006). Diese Chemikalie wirkt desinfizierend durch die $OCL^-$-Moleküle über Oxidation der Zellmembran und eine chlorierende Wirkung (Okino *et al.,* 2004) sowie gewebsauflösend (Andersen at al., 1992; Naenni *et al.*, 2004). Dies wird deutlich durch Betrachtung der Dissoziationsgleichung:

$$OCl^- + H_2O \leftrightarrow HClO + OH^-$$

Die Kontaktzeit und vor allem das Volumen limitieren die Wirkung der chemischen Aufbereitung. In der Literatur ist als Empfehlung eine Spülzeit pro Kanal von 5 Minuten angegeben (Tronstad, 2003). In einer durchgeführten Studie wurde zusätzlich gezeigt, dass die Reinigungsleistung bei großem Volumen besser ist (Siqueira *et al.*, 2000). Die Verwendung von 2-5 ml Natriumhypochlorit nach jeder Feile und 10-20 ml als abschließende Spülung haben sich hierbei etabliert.

Ethylendiamintetraessigsäure ist ein Chelatbilder, der in der Lage ist die, Dentinoberfläche über Komplexbildung mit Kalziumionen zu demineralisieren und somit die Oberfläche weniger wiederstandsfähig für die mechanische Aufbereitung zu machen (Di Lenarda *et al.*, 2000). Ein weiterer wichtiger Faktor ist es, die bei der mechanischen Aufbereitung entstehende Schmierschicht zu entfernen. Nur durch die Entfernung ist eine antimikrobiell wirkende Spülung in den Dentintubuli und Seitenkanälen im apikalen Delta möglich (Nygaard Östby, 1957; Ørstavik und Haapasalo, 1990; Takeda *et al.*, 1999; Khademi und Feizianfard, 2004). Für die vollständige Auflösung des Smear layers empfehlen unterschiedliche Autoren eine kombinierte Anwendung der gängigen Substanzen (McComb und Smith, 1975; Baumgartner *et al.*, 1984; Karagöz-Kücükay und Bayirli, 1994; Sen *et al.*, 1995).

### 1.4.2 Wurzelkanalfüllung

Die Füllung der zuvor aufbereiteten und desinfizierten Wurzelkanäle stellt einen erheblichen Faktor für den Erfolg der endodontischen Therapie dar (Ray und Trope, 1995). Um eine Re-Invasion des Wurzelkanalsystems durch Mikroorganismen zu verhindern, sollte die Wurzelkanalfüllung und die anschließende restaurative koronale Versorgung das Kanalsystem mit sämtlichen Dentintubuli und akzessorischen Kanälen bakteriendicht verschließen (Heidemann, 1989). Der optimale Endpunkt der Obturation sollte stets die apikale Konstriktion sein (DGZMK). Vor allem auch überstopftes Wurzelfüllmaterial kann, eine erneute Abwehrreaktion und damit eine neue Entzündung des periapikalen Gewebes zu initiieren (Ricucci, 1998). Dabei sollte das Material biokompatibel, dimensionsstabil und undurchlässig für Gewebsflüssigkeiten sein. Eine weitere wünschenswerte Anforderung wäre das möglichst einfache Entfernen der Wurzelkanalfüllung bei einer Revision. Diesen idealen Anforderungen kann bis heute kein Material vollständig gerecht werden. Daher ist der Goldstandard laut den Richtlinien der DGZMK für eine adäquate Wurzelkanalfüllung die Kondensationstechnik mittels einer Kombination aus Guttapercha und einem cremigen, im Verlauf vollständig erhärtenden Sealer.

Für die abschließende Obturation eines Wurzelkanals werden in der Literatur verschiedene Methoden beschrieben. Diese lassen sich in zwei große Gruppen unterteilen, die sich in ihrer Methodik grundlegend voneinander unterscheiden. Zum einen ist die laterale Kondensation und die Single Cone Technik erwähnen, die zu den sogenannten Kaltfülltechniken zählen. Zum anderen existieren die vertikale Kondensation und das Thermafil-System, als Methode einer Warmfülltechnik des Wurzelkanals (Hellwig *et al.*, 2007). Das trägerbasierte Thermafil-System bietet durch seine einfache Anwendung eine Obturationsmethode mit einer erheblichen Zeitersparnis für den Behandler, welche auch in Bezug auf die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung eine Alternative zur lateralen Kompaktion darstellt (Haikel *et al.,* 2000; Chu *et al.*, 2005). Als negativ zu beurteilen ist das erhöhte Risiko, Wurzelkanalfüllmaterial in das periapikale Gewebe zu pressen (Clark und El Deeb, 1993; Kytridou *et al.*, 1999). Die vertikale Kompaktion wurde als Methode entwickelt, die eine dreidimensionale Füllung schwieriger Wurzelkanalanatomien möglich machen sollte (Schilder, 1967). Sie wurde dabei stetig weiterentwickelt und damit stetig einfacher in ihrer Handhabung (Buchanan, 1994; Buchanan, 1996; Nahmias *et al.*, 2001; Buchanan, 2004). Vergleichende Studienergebnisse mit der lateralen Kompaktion in Bezug auf die Dichtigkeit liegen mit gleichwertigen (Madison und Krell, 1984) sowie überlegenden Resultaten vor (DuLac *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 2001; Jacobsen *et al.*, 2002; Gencoglu *et al.*, 2002). Jedoch ist auch hier das Risiko einer Materialüberpressung im Vergleich zur lateralen Kompaktion erhöht (Kececi *et al.*, 2005).

Begründend mit der Vielzahl an Methoden zur Obturation werden im Folgenden nur die in der

Studie angewandten Methoden im Detail beschrieben.

Die **laterale Kompaktion** unter Verwendung von Guttapercha und Sealer ist der momentan bestehende Standard in der Endodontie. Mit einer klinischen Erfolgsrate von 90% (Seltzer, 1988) wurde über Jahre hinweg gezeigt, dass hiermit langfristig hervorragende Ergebnisse erzielt werden können (Kuttler, 1979). Die Methode hat sich im Vergleich zur Single Cone Technik vor allem auch bei nierenförmigen oder ovalen Wurzelkanallumina etabliert (Heidemann, 1989). Das Prinzip der lateralen Kompaktion ist es, zusätzlich zu dem zuvor angepassten und mit Sealer bestrichenen Mastercone aus Guttapercha, durch laterale Komprimierung mittels Spreadern, möglichst viele akzessorische Guttapercha-Stifte in den Kanal einzubringen. Dabei sollte der Wurzelkanal möglichst vollständig mit Guttapercha gefüllt sein und nur zusätzlich minimal mit Sealer ergänzt werden (Weine, 1996). In Studien wurde gezeigt, dass die beim lateralen Verdichten ausgeübte Kraft keinen Einfluss auf die abschließende Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung hat (Hatton *et al.*, 1988). Hierdurch konnte die oftmals diskutierte Gefahr einer Wurzelfraktur als Begleiterscheinung bei der lateralen Verdichtung, durch Nutzung von Finger Spreadern aus NiTi Legierungen reduziert werden. (Lertchirakarn *et al.*, 1999; Joyce *et al.*, 1998). Als nachteilig zu bewerten ist der im Vergleich erhöhte Zeitaufwand bei der Abfüllung der Kanäle im Vergleich zur Single Cone Technik.

Bei der **Single Cone Technik** besteht die Wurzelkanalfüllung nur aus einem volumenstabilen, genormten, mit Sealer bestrichenen Guttaperchastift und setzt eine möglichst hohe Kongruenz des aufbereiteten Wurzelkanals mit dem Guttaperchastiftes voraus. Da es sich jedoch in den wenigsten Fällen um geradlinig runde Wurzelkanallumina handelt, ist der Sealeranteil prozentual in den nierenförmigen Lumen größer als der Anteil von Guttapercha. Dieses Missverhältnis zwischen Guttapercha- und Sealeranteil führt zu inhomogenen, porösen und gering randständigen Wurzelkanalfüllungen. Dieses Phänomen lässt sich durch die in der Abbindephase stattfindende Schrumpfung der Füllpaste beschreiben (Petschelt und Oberschachtsiek, 1985; Zidan *et al.*, 1987). Studien zur Überprüfung der Dichtigkeit zeigten deutlich, dass die Single Cone Technik zu schlechteren oder selten vergleichbar guten Ergebnissen führte im Vergleich zu anderen Wurzelkanalfülltechniken (Barthel *et al.*, 1994; Pommel und Camps, 2001). Insgesamt vorteilig zu benennen sind die Zeitersparnis und die einfache Durchführung dieser Methode.

Jedoch liegen auch Studien vor, die Gegenteiliges zeigten und somit einen sehr unausgewogenen wissenschaftlichen Standpunkt offenbaren. Keine der beiden Methoden konnte beispielsweise in einer 2007 angefertigten Studie signifikante Unterschiede im Bereich der Dichtigkeit aufzeigen (Wu, 2007).

Wurzelkanalfüllmaterialien

Wurzelkanalfüllstifte aus Guttapercha, ein durch Eindickung des Milchsaftes der Baumspezies *Palaquium gutta* kautschukähnliches Material, stellen heute den Goldstandard unter den Wurzelkanalfüllstiften dar und dienen als Vergleichsmaterial für zahlreiche Studien (El Ayouti *et al.*, 2005; Tay *et al.*, 2005; Baumgartner *et al.*, 2007; Schäfer *et al.*, 2007; Verissimo *et al.*, 2007; Monticelli *et al.*, 2007). Die in der Zahnmedizin verwendeten Guttaperchastifte enthalten zu circa 20% Guttapercha und weitere Komponenten, wie zum Beispiel zu 75% Zinkoxid und Bariumsulfat als röntgenopakes Kontrastmittel. Guttapercha zeichnet sich durch seine plastische Verformbarkeit bei hohen Temperaturen, seine Dimensionsstabilität bei niedrigeren Temperaturen sowie seine Biokompatibilität aus. Aufgrund der Eigenschaft, dass Guttapercha jedoch keinen Haftverbund mit der Wurzelkanalwand eingeht (Skinner und Van Himmel, 1987), wird von der DGZMK der zusätzliche Einsatz einer Wurzelfüllpaste empfohlen (DGZMK).

Sealer

Der zusätzliche Einsatz von Sealern ermöglicht dem Behandler auch kleinste Inkongruenzen innerhalb des Kanals auszugleichen und einen dichten Verbund zwischen Guttapercha und Dentin einzugehen (DeDeus *et al.*, 2006). Kleinste akzessorische Kanäle, laterale Kanäle, sowie auch Dentintubuli können so zusätzlich versiegelt werden. Ein alleiniger Einsatz von Wurzelfüllpasten ist aufgrund ihrer Schrumpfungstendenz während der Abbindereaktion und eventuell auftretenden Porositäten (Mutal *et al.*, 2005) kontraindiziert und nicht ausreichend (DGZMK). Diesen Aufgaben und den bisher beobachteten Nachteilen entsprechend, sollten die folgenden Anforderungen an einen optimalen Sealer gestellt werden. Die genutzten Sealer sollten in erster Linie biokompatibel, bakteriostatisch, dimensionsstabil sowie röntgenopak sein und dabei einen festen Verbund zwischen Guttapercha und Dentin erzeugen. Dabei sollte der Sealer Inkongruenzen entlang des Kanallumens ausgleichen und später unlöslich entgegen der Einwirkung von physiologischen Flüssigkeiten sein. Eine zusätzlich anzustrebende Eigenschaft ist das einfache Entfernen bei einer notwendigen Revision.

Die ersten entwickelten Sealer basieren auf einem Zinkoxid-Eugenol Stoffgemisch. Das bei der Abbindereaktion entstandene Zinkeugenolat ist chemisch jedoch vergleichbar leicht löslich und konnte nicht suffizient gegen eine erneute Bakterienpenetration schützen. Dieses freie Eugenol gilt als zytotoxisch (Wolf *et al.,* 2008). Wie Abbildung 7 zu entnehmen ist, weist ein Epoxidharz basierter Sealer im Vergleich keine Gewebsreaktion auf.

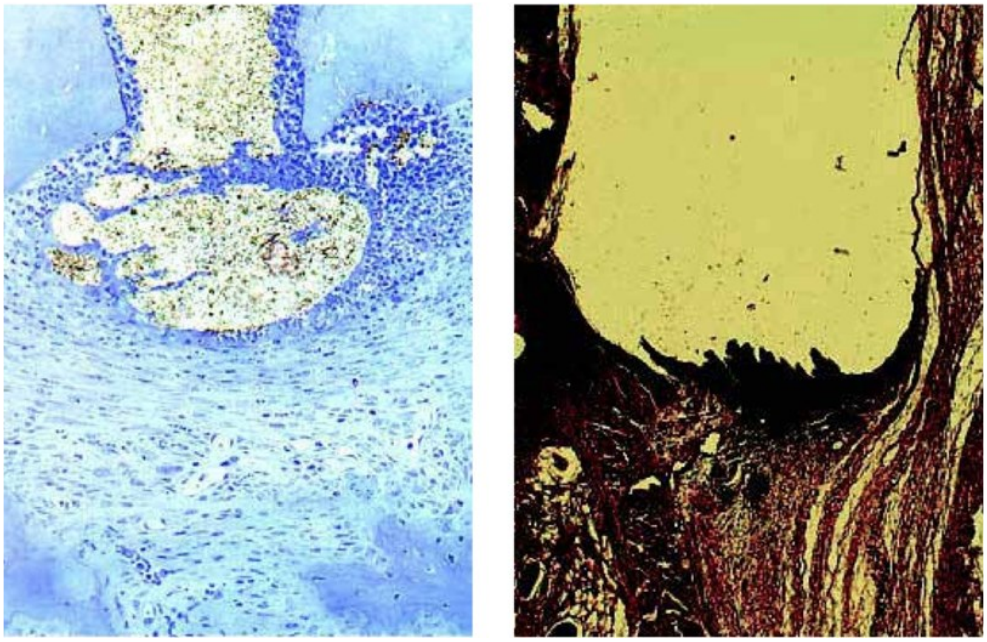

*Abbildung 7: Biokompatibilität von Sealern (links: Epoxidharzbasis; rechts: Zinkoxideugenolbasis) nach Wolf et al., 2008*

Patienten mit bestehender Allergie gegen einen der Bestandteile unterlagen dem Risiko, eine anaphylaktische Reaktion zu erleiden (Grade, 1995). Die Ansatzpunkte bei der Entwicklung von neuartigen Sealern basieren auf stetig anderen chemischen Grundlagen. Daher lassen sich die erhärtenden Wurzelkanalpasten entsprechend ihrer Stoffbasis in unterschiedliche Gruppen einteilen. Nachfolgend sollen nur die in der angefertigten Studie verwendeten Präparate genauer beschrieben werden. Es folgten Entwicklungen wie Calciumhydroxid-basierte Präparate, die eine Gewebsneubildung mit dem Ziel einer apikalen Ossifikation anregen sollten (Tronstad *et al.*, 1988). Am Beispiel von Sealapex (Kerr GmbH, CA, USA) konnten in Bezug auf Dichtigkeit, Volumenbeständigkeit und Biokompatibilität bessere Ergebnisse beobachtet werden. Diese Präparate neigten jedoch bei Kontakt mit Gewebsflüssigkeit zur Auflösung (Siqueira, 1999). Auf die Entwicklung von glasionomerzementbasierten Sealern, die einen verbesserten chemischen Haftverbund mit der Dentinoberfläche (Weiger *et al.*, 1995) zeigten, folgten epoxidharzbasierte Sealer.

Sealer auf Basis von Epoxidharz

Das entwickelte Präparat AH 26 setzte infolge einer Kondensationsreaktion kurzzeitig Formaldehyd bei der Abbindephase frei (Spångberg *et al.,* 1993) und wies damit eine initiale Zytotoxizität auf (Leonardo *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2002). Das weiterentwickelte AH Plus, welches ebenfalls auf Epoxidharz-Basis beruht, setzt aufgrund einer Additionsreaktion und das Fehlen des Stoffes Hexamethylentetraamin so gut wie kein Formaldehyd mehr frei. Eine Übersicht der vollständigen Inhaltstoffe ist in Tabelle 2 dargestellt. Verantwortlich für den Haftverbund und die geringe Löslichkeit sind die Epoxidaminpolymere, die während der Polyadditionsreaktion aus Diepoxiden

und Mono- sowie Diaminen entstehen. In einer durchgeführten Studie wurde bestätigt, dass die Biokompatibilität als besser einzustufen ist als bei AH 26 (Rödig *et al.*, 2005). Jedoch zeigte auch AH Plus keine vollkommen zufriedenstellende Biokompabilität (Huang *et al.,* 2002). Beide Präparate zeigen in zahlreichen Studien überlegene Ergebnisse in Bezug auf Löslichkeit (Schäfer und Zandbigari, 2003) und den Verbund zwischen Dentin und Guttapercha (Lee *et al.*, 2002).

Ungeachtet der zuvor positiv beschriebenen Materialeigenschaften zeigten die Dichtigkeitsuntersuchungen von DeDeus und Mitarbeiter, dass nach 9 Wochen 30% der untersuchten Wurzelkanalfüllungen nicht länger absolut undurchlässig waren (DeDeus *et al.*, 2007). Insgesamt jedoch ist zu betonen das AH Plus mit seinen klinisch guten Eigenschaften den Goldstandard in der Endodontologie darstellt (Leonardo *et al.*, 1999; Lertchirakarn *et al.*, 2002; Schäfer und Zandbiglari, 2003; Sevimay und Kalayci, 2005).

| Paste A | Paste B |
|---|---|
| Bisphenol-A Epoxidharz<br>Bisphenol-F Epoxidharz<br>Calciumwolframat<br>Zirkoniumoxid<br>Hochdisperses Siliciumdioxid<br>Eisenoxid | Dibenzyl-Diamin<br>Aminoadamantan<br>Tricyclodecan-Diamin<br>Calciumwolframat<br>Zirkoniumoxid<br>Hochdisperses Siliciumdioxid<br>Silikonöl |

*Tabelle 2: Zusammensetzung von AH Plus*

BC Total Fill

Der von der Firma Brassler USA entwickelte Sealer BC Total Fill soll einen neuen Standard in der Endodontologie formulieren. Es handelt sich hierbei um einen keramikbasierten Wurzelkanalsealer, bestehend aus Kalziumsilikat, Kalziumdihydrogenphosphat, Zirkoniumdioxid und Verdickungsmitteln. Durch seinen hoch alkalischen pH-Wert ist dieser Sealer antibakteriell und soll zugleich keine Zytotoxizität aufweisen (Zhang *et al.*, 2010). Da bei der Obturation immer eine gewisse Restfeuchtigkeit im Wurzelkanalsystem herrscht, wurden Studien zur Haftkraft im hydrophilen Milieu durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass Total Fill BC eine bessere Haftkraft am Dentin aufwies, als zum Beispiel AH Plus (Nagas *et al.*, 2011). Dieses Produkt, dargestellt in

Abbildung 8, wird mit dem dazugehörigen Obturation Kit geliefert und entsprechend der Single Cone Technik verwendet. Der Hersteller verspricht ein Produkt, welches die natürlich vorhandene Restfeuchtigkeit für die Aushärtung nutzt und darüber hinaus bei der Abbindephase Hydroxylapatit bildet. Ein weiterer Vorteil soll die Bildung einer chemischen Bindung zwischen Dentin und dem keramisch imprägnierten Point sein, sowie eine antibakterielle Wirkung. Da dies ein relativ neues Produkt auf dem Markt ist, gibt es wenige Untersuchungen, die diese zahlreichen Attribute verifizieren.

*Abbildung 8: Sealer BC Total Fill*

## 1.5 Mineral Trioxide Aggregate

Die Entwicklung hydrophiler Portlandzementderivate, wie zum Beispiel ProRoot MTA (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Schweiz), bestehend aus einer Mischung von modifiziertem Portlandzement (75%), Bismutoxid (20%) für eine gute Röntgenopazität und Kalziumsulfat (5%) für das Abbindeverhalten (Roberts *et al.*, 2008; Steffen und van Waes, 2009), stellt einen zusätzlichen Fortschritt in der Endodontie und dentalen Traumatologie dar. Die Indikationsbereiche sind breit gefächert. So findet es Verwendung bei der direkten Überkappung, der Pulpotomie, der Deckung von Perforationen, der Versorgung von internen und externen Resorptionen, als retrograder Wurzelkanalverschluss, sowie als Material für die Apexifikation. Durch das Anmischen mit Wasser reagieren die Bestandteile und es entsteht eine kolloidale Paste, die weiter zu einer kalziumhydroxidhaltigen kristallinen Matrix reagiert (Roberts *et al.*, 2008). Während der Entstehung dieser Matrix kommt es zu einer Volumenausdehnung, die für eine zusätzliche Adaption an das Dentin sorgt und damit die Dichtigkeitseigenschaften der Substanz erhöht (Srinivasan *et al.*, 2009). Für die gute Verträglichkeit mit dem periapikalen Gewebe wird das beim Abbindevorgang gebildete Kalziumhydroxid verantwortlich gemacht (Camilleri und Pitt Ford, 2006). Dabei steigt der pH-Wert entsprechend der nachfolgenden Reaktionsgleichung (Duarte *et al.*, 2003) durch Dissoziation des Kalziumhydroxids in der wässrigen Peristase der Gewebsflüssigkeit von 10,2 auf 12,5. Dadurch entwickelt sich eine antimikrobielle sowie

gewebsregenerierende Wirkung durch eine verstärkte Sekretion von Wachstumsfaktoren, wie Vascular Endothelial Growth Factor (Paranjpe *et al.*, 2010).

$$Ca(OH)_2 \leftarrow\rightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$$

Durch Studien konnte den Mineral Trioxide Aggregaten nicht nur eine sehr gute Biokompatibilität nachgewiesen (Saidon *et al.*, 2003; Gorduysus *et al.*, 2007), sogar eine osteoinduktive Wirkung konnte aufgezeigt werden (Steffen und van Waes, 2009; Srinivasan *et al.,* 2009). Ein weiteres Produkt aus der Gruppe der Portlandzementderivate ist MedCem MTA (MedCem, Weinfelden, Schweiz). Es basiert annähernd auf der Stoffzusammensetzung von ProRoot MTA und besteht aus Kalzium, Siliziumoxid, Aluminiumoxid und Zirkoniumdioxid für die Röntgenopazität. Auch hier kommt es im Rahmen der Abbindereaktion zur Ausbildung einer festen Kristallstruktur durch eine Hydratisierung mit Wasser (Camilleri, 2007). Die wenigen vorliegenden Studien hinsichtlich der Eigenschaften legen keine signifikanten Unterschiede offen, da die Stoffkomponenten bis auf das durch Zirkoniumdioxid ersetzte Bismutoxid identisch sind. Eine 2014 angefertigte Studie gibt sogar an, dass Bismutoxid die biologischen und physikalischen Eigenschaften teilweise verschlechtert (Grazziotin-Soares *et al.*, 2014). Beide Produkte dieser Stoffgruppe binden unter Feuchtigkeit ab, sind antibakteriell, selbstdichtend und besitzen eine eingeschränkt bioinduktive Wirkung (Steffen *et al.*, 2014).

## 1.6 In-vitro Analyse der Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen

Um die Dichtheit einer Wurzelkanalfüllung zu verifizieren, muss sichergestellt sein, dass weder Flüssigkeiten und Bakterien, noch Luft in oder entlang des gefüllten Wurzelkanalsystem penetrieren können (Schilder, 1967). Diese Definition kann durch verschiedenste Penetrationstests wie zum Beispiel einen Bakterienpenetrationstest, einen Farbstoffpenetrationstest, einen Penetrationstest mit radioaktiven Isotopen oder einen Glucosepenetrationstest untersucht werden. Hierbei kann die Passage der verschiedenen Penetrationsindikatoren entlang der Wurzelkanalfüllung quantitativ oder semi-quantitativ untersucht werden. Diese Testverfahren haben jeweilige Vor- und Nachteile, die es für die enge Indikationsstellung zu berücksichtigen gilt. So benötigt eine Überprüfung mit radioaktiven Isotopen, wie zum Beispiel Jod I 131, einen sehr aufwendigen und komplizierten Versuchsaufbau. Ein weiterer Nachteil einer solchen Testmethode ist die verhältnismäßig geringere Penetrationstiefe im Vergleich zu Methylenblau (Matloff *et al.*, 1982). Durch eine Überprüfung mit Bakterienpenetrationstests, lässt sich mit Hilfe von Mikroorganismen wie *Klebsiella pneumoniae* (Jakobsen *et al.*, 2002), *Enterococcus faecalis* oder *Streptococcus mutans* (Shipper *et al.*, 2004) eine Aussage über die qualitative Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung treffen. Durch die mögliche Penetration entlang der Wurzelkanalfüllung

kommt es zu einer Trübung des Nährmediums in der Auffangkammer. Eine quantitative Aussage ist nur schwer möglich, da durch das Auffangen der Bakterien im Nährmedium ein nicht zu messendes bakterielles Wachstum zu einer erhöhten Trübung der Lösung führt. Darüber hinaus ist zu beachten, dass negative Ergebnisse hierbei nicht immer auch eine absolute Dichtheit des Untersuchten Objekts bedeuten. Andere Moleküle wie Glucose können persistierenden Bakterien als Stoffwechselgrundlage dienen und somit als Konsequenz einen späteren klinischen Misserfolg bedeuten (Wu *et al.*, 1994).

Um ein experimentell sicheres Ergebnis zu erhalten, haben sich die lang bewährten Farbstoffpenetrationstests und das relativ neu entwickelte Glucose-Penetrationsmodell (Xu *et al.*, 2005) etabliert.

### 1.6.1 Farbstoffpenetrationstest

Anhand von schwarzer Tusche, Eosin-Rot, Fuchsinlösung und dem am häufigsten verwendeten Indikator Methylenblau lässt sich der Undichtigkeitsgrad in Korrelation zur Penetrationstiefe bestimmen (Wu und Wesselink, 1993). Dabei erreicht man unter Verwendung von Methylenblau die präzisesten Ergebnisse, da es dem Farbstoff aufgrund seines geringen Molekulargewichtes möglich ist noch tiefer in den Wurzelkanal einzudringen als zum Beispiel schwarze Tusche (Ahlberg *et al.*, 1995). Das Ergebnis ist jedoch als kritisch zu interpretieren, da bisher wissenschaftlich nicht untersucht ist, ob und inwiefern die Eindringtiefe eines Farbstoffes mit der klinischen Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung korreliert (Al-Dewani *et al.*, 2000).

Für die Auswertung dieser Methode muss jedoch im Anschluss an die Testreihe die Wurzelkanalfüllung invasiv oder nicht-invasiv sichtbar gemacht werden. Dies erreicht man zum Beispiel, durch ein spezielles Entkalkungsverfahren (Gilhooly *et al.*, 2000) oder Konzentrationsmessungen der durch Säuren wieder entzogenen Farbstoffe mittels Photospektrometrie (Douglas und Zakariasen, 1981; Beatty *et al.,* 1986). Die Darstellung anhand invasiver Methoden besteht im Allgemeinen aus einer Anfertigung von Längs- und Querschnitten und einer anschließenden mikroskopischen Betrachtung. Die Untersuchungen von Wu und Wesselink (1993) zeigten, dass die Methoden der Auswertung und die Rahmenbedingungen durch zu viele Variationen nicht zu vergleichen sind. Sie wiesen außerdem darauf hin, dass der vielmals nicht angegebene pH-Wert des in den verschiedensten Studien verwendeten Methylenblau einen hohen Einfluss auf die Penetrationstiefe hat. In der Schlussfolgerung zeigten Indikatoren mit geringeren pH-Werten eine erhöhte Penetrationstiefe aufgrund einer voranschreitenden Demineralisierung des Dentins (Wu und Wesselink, 1993). Auch die Tatsache, dass hiermit eine klinisch relevante Aussage über den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung oder ein theoretisches Mikroleakage von Bakterien entlang der periapikalen Region getroffen werden kann, wurde

verneint (Susini *et al.*, 2006).

### 1.6.2 Glucosepenetrationstest

Das durch Xu beschriebene Modell bewertet die Penetration einer Glucoselösung entlang der Wurzelkanalfüllung (Xu *et al.*, 2005). Hierbei herrscht von koronal ein konstanter Druck einer Glucose-Lösung direkt auf die Wurzelkanalfüllung (Van der Sluis *et al.*, 2007). Glucosemolekülen denen es möglich ist, Richtung apikal entlang der Wurzelkanalfüllung zu penetrieren, werden in einer weiteren natriumazidhaltigen Ringerstandardlösung aufgefangen. Nach verschiedenen Zeitpunkten werden Proben entnommen und mittels eines enzymatischen Tests und eines Photospektrometers später ausgewertet. Mit diesem Verfahren lassen sich während eines definierten Zeitraums die Konzentration sowie etwaige Konzentrationsänderung ersehen und in Bezug auf die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung quantitative sowie qualitative Rückschlüsse ziehen. Im Vergleich zu den Farbstoffpenetrationstests scheint Glucose als Indikator sehr geeignet. Im Kanal resistent verbleibende Bakterien und deren Stoffwechseltätigkeit werden durch koronal eindringende Glucose ebenfalls erfasst (Xu *et al.*, 2005).

Auch nachfolgende Studien bewerten diese quantitative Bestimmung als sehr sensibel und hilfreich in der Dichtigkeitsprüfung von Wurzelkanalfüllungen (Zou *et al.*, 2007; Shemesh *et al.*, 2007; Kaya *et al.*, 2007; Ozok *et al.*, 2008). Sie geben einen Rückschluss auf die Qualität der verwendeten endodontischen Materialien oder Methoden.

# 2 Studienziele und Fragestellung

Da stetig neue Sealer-Präparate verschiedener Hersteller wie zum Beispiel Total Fill BC entwickelt werden, ist es von großer Bedeutung, diese neuen Präparate hinsichtlich ihrer Dichtigkeit als Wurzelkanalsealer zu überprüfen. Die Indikationsbereiche für Mineral Trioxid Aggregate in der Endodontologie und Traumatologie sind breit gefächert. Daher ist es von wissenschaftlichem Interesse, die chemisch-physikalischen Eigenschaften hinsichtlich der Dichtigkeit von ProRoot MTA und Medcem MTA als mögliche Sealer zu untersuchen und gegebenenfalls neue Indikationsbereiche zu definieren.

Als Ziel dieser in-vitro Studie sollen die Eigenschaften in Bezug auf Dichtigkeit der verwendeten Präparate anhand einer quantitativen Glucose-Penetrations-Testung untersucht werden. Hierbei soll das Verhalten von Total Fill BC, sowie den Portlandzement-Derivaten ProRoot MTA und MedCem MTA mit dem derzeit geltenden Goldstandard AH Plus verglichen werden. Dieser Vergleich zielt darauf eine wissenschaftlich fundierte Aussage in Bezug auf eine mögliche Indikationserweiterung in Verwendung als Wurzelkanalsealer treffen zu können.

Die Studienhypothese ist zum einen, dass bei der Wurzelkanalfüllung mittels lateraler Kompaktion und einem Mineral Trioxid Aggregate als Sealer keine signifikanten Dichtigkeitsunterschiede im Vergleich zum geltenden Goldstandard AH Plus in der Endodontie feststellbar sind. Zum anderen, das Total Fill BC mittels der empfohlenen Single Cone Technik und AH Plus in lateraler Kompaktion eingebracht, mindestens gleichwertige Ergebnisse in Bezug auf die Dichtigkeit aufweisen.

# 3 Material und Methoden

In Abbildung 9 ist der Studienverlauf in Form eines Flussdiagrammes dargestellt.

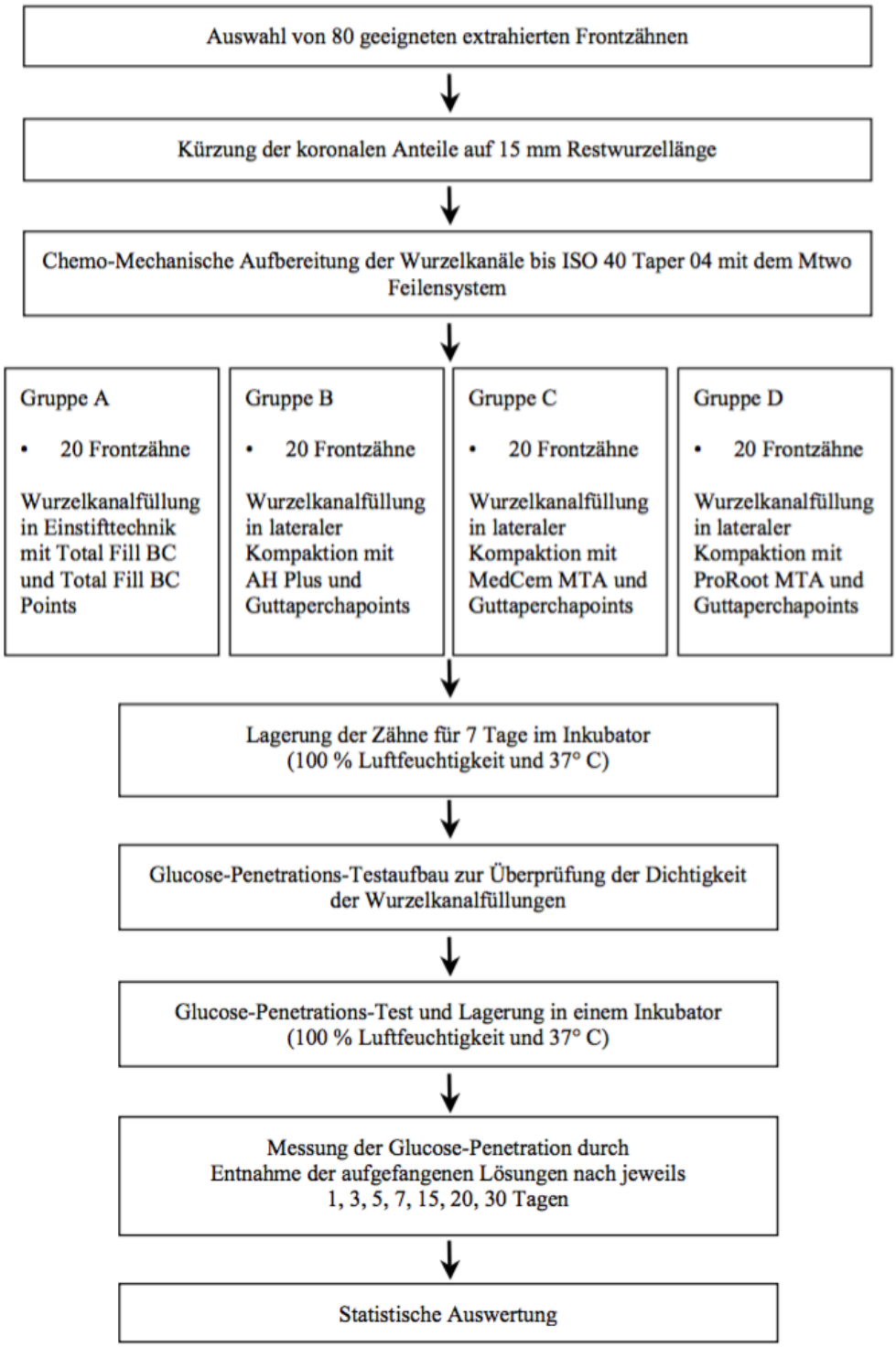


*Abbildung 9: Flussdiagramm Studienverlauf*

## 3.1 Vorversuche zum MTA Mischungsverhältnis

Zur Vergleichbarkeit der werkstoffkundlichen Eigenschaften der MTA Präparate und der Sealer wurde zunächst ein Versuch durchgeführt, um eine annährend gleiche Konsistenz der angemischten Substanzen zu erreichen.

Die Konsistenz von angemischtem ProRoot MTA (Dentsply De Trey GmbH, Konstanz, Deutschland) und Medcem MTA (Medcem GmbH, Weinfelden, Schweiz) ist ähnlich einer Paste. Im Vergleich dazu sind die Sealer AH Plus (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland) und Total Fill BC (Busa-Brasseler, GA, USA) dünnflüssig und nicht formbar. Um eine vergleichbare Konsistenz des MTA gegenüber den Sealern in Plastizität und Fließfähigkeit zu erhalten wurde ein neues Mischungsverhältnis von Pulver und destilliertem Wasser experimentell bestimmt.

*Abbildung 10: Mischungsverhältnis MedCemMTA nach Herstellerangaben (links) und experimentell bestimmt(rechts)*

Dazu wurde das Pulver aus einer Medcem MTA Kapsel (0,35 g) auf eine Glasplatte gebracht, mit einem Heidemannspatel (Henry Schein, Langen, Deutschland) zu einem Block verdichtet und schließlich in drei identische Proben aufgeteilt. Mit einer 10 µl Mikropipette (Eppendorf AG, Hamburg, Deutschland) und dem Heidemannspatel wurde unter permanentem Anmischen stetig je 1 µl destilliertes Wasser zugegeben, bis die gewünschte Konsistenz erreicht war. Zur Kontrolle wurden auch die verbliebenen Proben mit der jeweilig zuvor experimentell bestimmten Menge an destilliertem Wasser angemischt und auf ihre Konsistenz und Reproduzierbarkeit hin verglichen. Das Experiment wurde unter den gleichen Versuchsbedingungen für das luftdicht verschlossene Pulver aus einem ProRoot MTA Päckchen (1 g) durchgeführt. Der auf der Glasplatte mit einem Heidemannspatel verdichtete Block wurde hierbei in vier gleiche Proben aufgeteilt und nach dem gleichen Ablauf angemischt. Nachdem auch hier die gewünschte Konsistenz erreicht wurde, die sowohl den Sealern sowie auch der neu festgelegten Konsistenz des Medcem MTA entsprach,

wurden die verbliebenen drei Blöcke ebenfalls zur Kontrolle mit der zuvor bestimmten Menge an destilliertem Wasser angemischt.

### 3.2 Auswahl der Versuchszähne

Für die Studie wurden 110 extrahierte Frontzähne des Ober- und Unterkiefer gesammelt, die zum einen durch nur eine Wurzel charakterisiert waren und zum anderen einen gradlinigen Wurzelverlauf aufwiesen. Die Zähne wurden nach der Extraktion in einer Ringer-Standard-Infusionslösung (Braun AG, Melsungen, Deutschland) mit Natriumazid 0,2% (Sigma-Aldrich, München, Germany) gelagert, um das Wachstum von Mikroorganismen sowie ein Austrocknen der Zähne zu verhindern. Das Aufbewahrungsmedium sorgte für eine Keimfreiheit der Studienzähne über den gesamten Versuchszeitraum.

Die Zähne wurden anschließend hinsichtlich ihrer Eignung visuell überprüft und mussten die folgenden Kriterien erfüllen: Die Studienzähne durften nicht kariös zerstört sein, keine endodontische Vorbehandlung, keine Wurzelfrakturen oder Wurzeldefekte aufweisen und mussten ein abgeschlossenes Wurzelwachstum zeigen. Abbildungen 10 und 11 zeigen die Anfertigung von digitalen Röntgenkontrollbildern (Heliodent DS, Sirona, Wals bei Salzburg, Österreich) in mesial-distaler Richtung, bei 65 kV mit einer Belichtungszeit von 0,06 s in Paralleltechnik. Hierdurch wurde überprüft, dass die Zähne nur einen Kanal aufweisen.

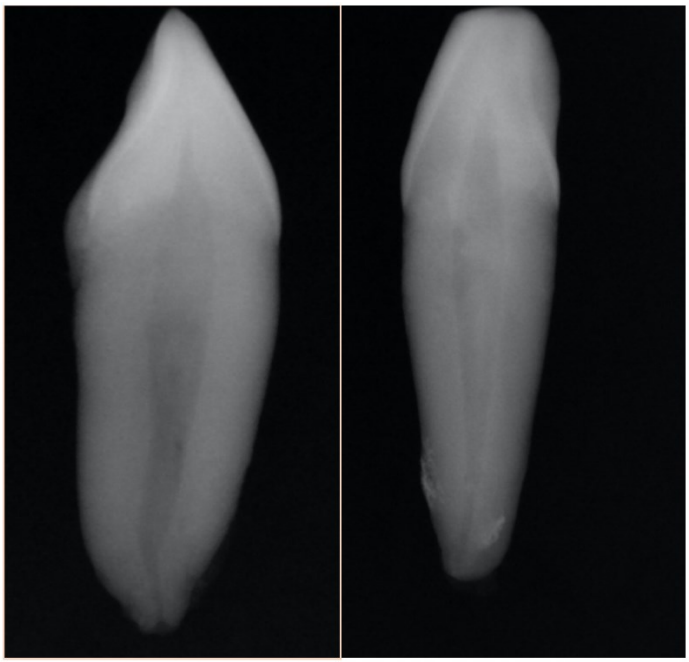

*Abbildung 11 und 12: Röntgenbilder zur Diagnose*

### 3.3 Vorbereitung der Versuchszähne

Es wurden 80 geeignete Zähne zufällig ausgewählt und oberflächlich mit Scalern (Hu-Friedy, Frankfurt am Main, Deutschland) und Gracey Küretten (Hu-Friedy) von Konkrementen und Bindegewebsresten gereinigt. Danach wurden alle Versuchszähne mit einer Diamantrennscheibe Vari/Cut VC-50 (Lecco Corporation, MI, USA) auf genau 15 mm Restwurzellänge gekürzt und auf die vier Versuchsgruppen zu je 20 Zähnen randomisiert verteilt, welche je einem Testpräparat zugewiesen wurden: Gruppe A (Total Fill BC), Gruppe B (AH Plus), Gruppe C (MedCem MTA) und Gruppe D (ProRoot MTA).

### 3.4 Löslichkeitsprüfung der verwendeten Werkstoffe

Für die Untersuchung einer möglichen Lösungsfähigkeit der Präparate in destilliertem Wasser und damit einer Verfälschung des Studienergebnisses, wurden die jeweiligen Zemente sowie Sealer zuvor über eine Dauer von 7 Tagen getestet. Hierfür wurden die Sealer AH Plus und Total Fill BC anhand der Herstellerangaben angemischt und unter Verwendung einer Ringform aus Stahl (Lederer GmbH, Ennepetal, Deutschland) mit einem Innendurchmesser von d = 10 mm und einer Materialstärke von s = 2 mm je 2 identische Prüfkörper hergestellt. Die Zemente MedCem MTA und ProRoot MTA wurden entsprechend der zuvor experimentell bestimmten Mischungsverhältnisse angemischt und ebenfalls in je 2 identische Ringformen (Lederer GmbH) gefüllt. Anschließend wurden die Prüfkörper zum vollständigen Abbinden der Präparate in einem Innovens 77 EB2 Inkubator (Thermo Fisher Scientific GmbH, Schwerte, Deutschland) für 24 Stunden bei 37° C und 100% Luftfeuchtigkeit gelagert.

Für den Versuchsaufbau wurden vier Petrischalen (Sarstedt AG & Co., Nümbrecht, Deutschland) mit 3 ml bidestilliertem Wasser (Braun, Melsungen, Deutschland) befüllt. Die abgebundenen Proben wurden aus den Ringformen entnommen und unter Verwendung einer Feinwaage (Nimbus Analysewaage, Adam Equipment CoLtd., Danbury, USA) das Gewicht auf 10 mg genau erhoben. Das jeweilig gleiche Paar der Proben wurde in ein Petrischale A gelegt und diese unter Angabe des Präparates beschriftet. Der Versuchsaufbau wurde nun bei 37° C und 100% für 7 Tage inkubiert. Zur Bestimmung der gelösten Masse wurde die Probeflüssigkeit sowie die Probekörper der einzelnen Schalen gefiltert. Das Gewicht der auffangenden Petrischale B wurde ebenfalls zuvor auf 10 mg genau bestimmt, um nachfolgend die Differenz aus Auffanggefäß und Proberückständen zu bestimmen. Nach Filterung der Lösung wurde das Auffanggefäß bei 85° C inkubiert, bis eine vollständige Verdampfung der Lösung erreicht wurde und erneut das Gewicht bis auf 10 mg genau bestimmt. Die daraus resultierende Differenz des Auffanggefäßes vor und nach dem Versuch gibt den Wert an, des in Lösung gegangenen Anteils der jeweiligen Materialproben:

$$m_{Gefäß\,vorher} + m_{Gefäß\,nachher} = m_{Stoffe\,(aq)}$$

Die entstehende Differenz wurde durch nachfolgende Formel ins Verhältnis mit der am Anfang bestimmten Maße des Probenkörpers gebracht.

$$Löslichkeit = \frac{m_{Stoffe\,(aq)}}{m_{Probekörper}} \times\ 100\%$$

### 3.5 Reaktionsfähigkeit Sealer/Glucose

Für den Ausschluss einer Reaktionsfähigkeit der untersuchten Präparate mit der Glucoselösung wurden die einzelnen Studienpräparate über eine Dauer von 30 Tagen getestet. Die Sealer AH Plus und Total Fill BC wurden entsprechend der Herstellerangaben angemischt und mit Hilfe einer Ringform aus Stahl (Lederer GmbH, Ennepetal, Deutschland) mit einem Innendurchmesser von d = 10 mm und einer Materialstärke von s = 2 mm in je 3, identische Prüfkörper überführt. Die Studienpräparate MedCem MTA und ProRoot MTA wurden unter Verwendung der neu bestimmten Anmischverhältnisse ebenfalls in je 3 identische Ringformen (Lederer GmbH) gebracht. Zum vollständigen Abbinden der Präparate wurden diese simultan in einem Innovens 77 EB2 Inkubator (Thermo Fisher Scientific GmbH, Schwerte, Deutschland) für 24 Stunden bei 37° C und 100% Luftfeuchtigkeit inkubiert.

Für den Versuchsaufbau wurde eine Glucose Lösung mit der Konzentration 1 mol/L (pH 7) hergestellt. Zwei 6-Well Zellkultur Multiplatten (Greiner Bio-One GmbH, Frickenhausen, Deutschland) wurden mit 3 ml der Lösung pro Well befüllt. Jeder Prüfkörper wurde in ein Well gelegt und jedes Well unter Angabe des Präparates beschriftet. Der Versuchsaufbau wurde nun bei 37° C und 100% Luftfeuchtigkeit für 30 Tage inkubiert und an Versuchstagen 1, 3, 5, 7, 20, 30 je 100 µl den einzelnen Lösungen entnommen und in Eppendorf Reaktionsgefäße (EppendorfAG, Hamburg, Deutschland) pipettiert. In dieser Zeit hätte eine mögliche Reaktion der Prüfkörper mit der Glucoselösung ablaufen können und hierbei die definierte Glucosekonzentration verändert. Die Glucosekonzentration wurde mittels eines enzymatischen Assays gemessen (Punkt 3.10).

### 3.6 Aufbereitung der Wurzelkanäle

Zur Darstellung der Wurzelkanaleingänge an den abgetrennten Zahnwurzeln wurde ein Gates Glidden Bohrer G180A Größe 2 gelb und 4 blau (Komet, Lemgo, Deutschland) verwendet und anschließend die Kanalgängigkeit mit einer C-Pilot Feile Länge 25 mm ISO 08 (VDW GmbH, München, Deutschland) überprüft. Zur Festlegung der Arbeitslänge wurde diese bis zum Austrittspunkt am Foramen apicale vorgeschoben und die Arbeitslänge auf exakt 14,5 mm reduziert. Um den Gleitpfand herzustellen wurde der Kanal per Hand mit K-Feilen (VDW GmbH,

München, Deutschland) bis auf ISO 15 der zuvor festgelegten Arbeitslänge, aufbereitet. Dazu wurden je nach initialer Gängigkeit des Wurzelkanallumens die K-Feilen ISO 08 Taper 02, ISO 10 Taper 02, ISO 15 Taper 02 in aufsteigender Reihenfolge auf Arbeitslänge gebracht und der Kanal aufbereitet. Nach jeder ISO Größe wurde mit 2 ml Natriumhypochlorit 3% (Hedinger, Stuttgart, Deutschland) gespült, um den Debris aus dem Wurzelkanal zu entfernen. Schließlich konnte die Aufbereitung des Wurzelkanals mit dem Mtwo Nickel-Titansystem (VDW GmbH) und dem VDW.Silver Endo Motor (VDW GmbH, München, Deutschland) erfolgen.

Beginnend bei ISO 15 Taper 05, über die Größen ISO 20 Taper 06, ISO 25 Taper 06, ISO 30 Taper 05, ISO 35 Taper 04 bis Größe ISO 40 Taper 04, wurde nach der Single Length Methode entsprechend aufbereitet. Hierbei wird die Feile druckfrei von koronal nach apikal sukzessiv auf Arbeitslänge gebracht. Sobald ein Widerstand feststellbar ist, wird die Feile mit leichtem Druck gegen die äußere Kanalwand unter bürstenden Bewegungen von koronal nach apikal bewegt, bis eine passive druckfreie Instrumentierung weiter nach apikal möglich ist. Nach jeder neuen Feilengröße wurde mit 2 ml Natriumhypochlorit 3% gespült, um den Debris aus dem Wurzelkanal zu entfernen. Nach dem Aufbereiten des Kanals bis ISO 40 Taper 04 wurde mit 5 ml Natriumhypochlorit 3% gespült und abschließend mit 2 ml Ethylendiamintetraessigsäure 17% (EDTA, Henry Schein, Langen, Deutschland) gespült, um den Kanal zu desinfizieren und den Smear Layer zu entfernen. Abschließend wurde der Kanal mit Papierspitzen ISO 20 Taper 02 (Roeko, Langenau, Deutschland) getrocknet.

## 3.7 Wurzelkanalfüllung

### Gruppe A Total Fill BC

Entsprechend der Vorgabe des Herstellers wurde mit dem mitgelieferten Total Fill BC Obturation Kit (Busa-Brasseler, GA, USA) in der Einstifttechnik gearbeitet. Der passende Masterpoint wurde entsprechend der Aufbereitungsgröße ISO 40 des Wurzelkanals ausgewählt und auf eine leichte passive apikale Klemmpassung (Tugback) überprüft. Die Arbeitslänge wurde mit einem Endomessblock (Dentsply De Trey GmbH, Konstanz, Deutschland) abgemessen und auf dem Masterpoint mit einer zahnärztlichen Pinzette (Henry Schein, Langen, Deutschland) durch Impressionen markiert. Der bereits angemischte Sealer wurde auf eine Glasplatte appliziert. Zunächst wurde eine Papierspitze ISO 40 Taper 04 mit dem Sealer leicht benetzt, in den Wurzelkanal eingebracht und wieder entfernt. Der Masterpoint ISO 40 wurde anschließend mit dem Sealer benetzt, in den Kanal eingebracht und mit einem heißen Kugelstopfer (Henry Schein, Langen, Deutschland) bis auf Höhe des Kanaleinganges abgetrennt und nachkondensiert.

**Gruppe B AH Plus**

Entsprechend der Aufbereitungsgröße ISO 40 Taper wurde der passende Masterpoint aus dem Guttapercha Spitzen Kit (Roeko, Langenau, Deutschland) ausgewählt. Wie zuvor beschrieben, wurde die Arbeitslänge entsprechend überprüft und markiert, sowie der Tugback getestet. Das Anmischen des Sealers erfolgte mithilfe der Doppelkammer-Spritze und wurde direkt auf den Mischblock appliziert. Nun wurde die Papierspitze mit dem Sealer eingebracht und wieder entfernt. Nachfolgend wurde der Guttapercha Masterpoint ISO 40 Taper 02 (Roeko, Langenau, Deutschland) mit dem Sealer benetzt und in den Wurzelkanal bis auf die Arbeitslänge eingebracht. Nun erfolgte die eigentliche laterale Kompaktion mittels eines NiTi-Fingerspreaders ISO 20 Taper 02 (VDW GmbH, München, Deutschland) und akzessorischen Guttapercha Stiften ISO 15 Taper 02. Dazu wurde der NiTi-Fingerspreader an der längsten Wurzelkontur bis 1 mm vor der Arbeitslänge eingeführt und durch rotierende Bewegungen die umliegenden Guttaperchastifte verdichtet. Anschließend wurde ein akzessorischer Stift ISO 20 Taper 02 gleichmäßig dünn mit Sealer benetzt und in den entstandenen Kanal eingebracht. Der Vorgang wurde so häufig wiederholt, bis sich der Spreader weniger als 2 mm in den Kanal einführen lies und somit kein weiterer Stift mehr in den Wurzelkanalkanal einzubringen war. Abschließend wurde das überschüssige Guttapercha auf Höhe des Kanaleingangs abgetrennt und nachkondensiert.

**Gruppe C Medcem MTA**

Der Masterpoint ISO 40 Taper 02 wurde entsprechend der Methode aus Gruppe B ausgewählt, überprüft und vorbereitet. Ausgehend von dem zuvor experimentell bestimmten Mischungsverhältnis wurde das MedCem MTA mit einem Heidemannspatel auf einer Glasplatte angemischt. Die abschließende Wurzelkanalfüllung erfolgte entsprechend der gleichen Methode wie in Gruppe B unter Verwendung des Medcem MTA und Guttapercha.

**Gruppe D ProRoot MTA**

Auch in dieser Gruppe wurde der Masterpoint anhand der zuvor beschriebenen Methode vorbereitet. Das ProRoot MTA wurde entsprechend des experimentell bestimmten Mischungsverhältnisses auf einer Glasplatte angemischt, abgedeckt und die Wurzelkanalfüllung erfolgte anhand der gleichen Methode wie zuvor in Gruppe B und C beschrieben, unter Verwendung von ProRoot MTA und Guttapercha.

Abschließend wurde jede Wurzelfüllung zur Kontrolle der Homogenität und Randständigkeit radiologisch in oro-vestibulärer Richtung (Paralleltechnik bei 65 kV mit einer Belichtungszeit von 0,06 s) untersucht. Versuchszähne, deren Wurzelfüllungen nicht bis zur Arbeitslänge reichten oder

inhomogen waren, wurden verworfen. Ein neuer Versuchszahn wurde ausgewählt und entsprechend der Gruppenzugehörigkeit unter Einsatz der gleichen Methodik neu aufbereitet sowie obturiert. Alle Zähne wurden anschließend über 24 Stunden bei 37° C und 100% Luftfeuchtigkeit gelagert (Innovens 234 EB2 Inkubator, Thermo Fisher Scientific GmbH, Schwerte, Deutschland), um eine vollständige Aushärtung der Sealer/Zemente zu gewährleisten.

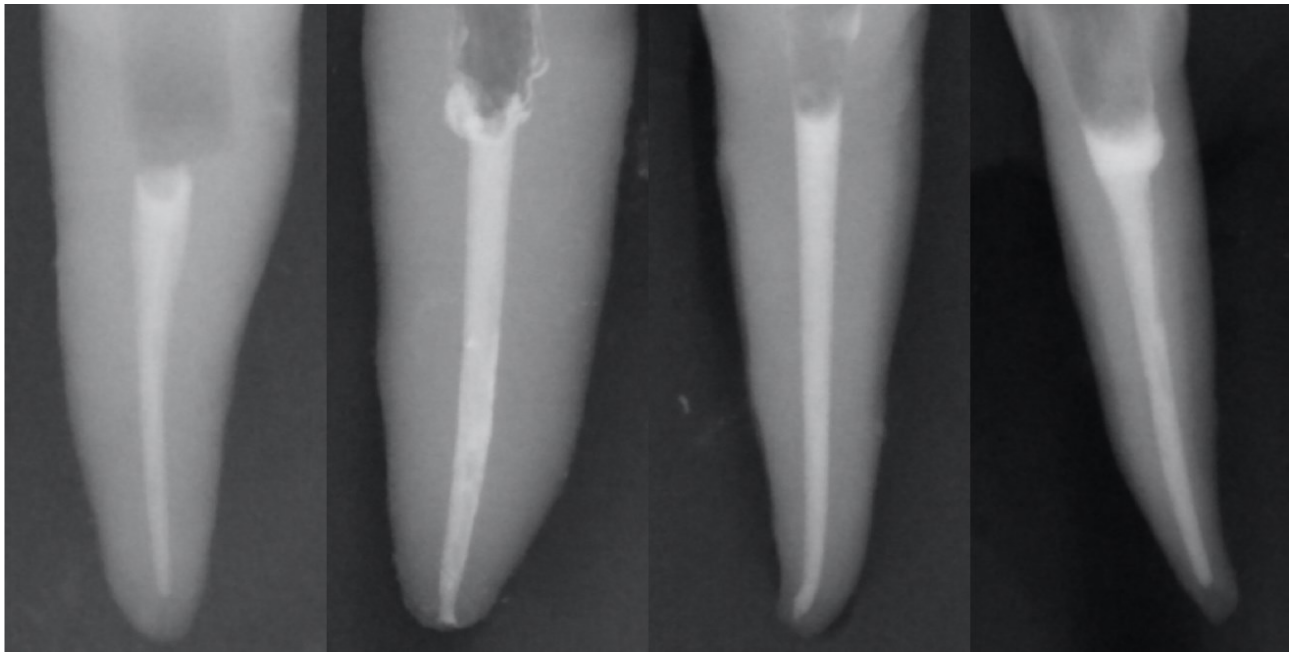

*Abbildung 13: Kontrollaufnahme (AH Plus, Total Fill BC, MedCem MTA, ProRoot MTA)*

## 3.8 Versuchsaufbau

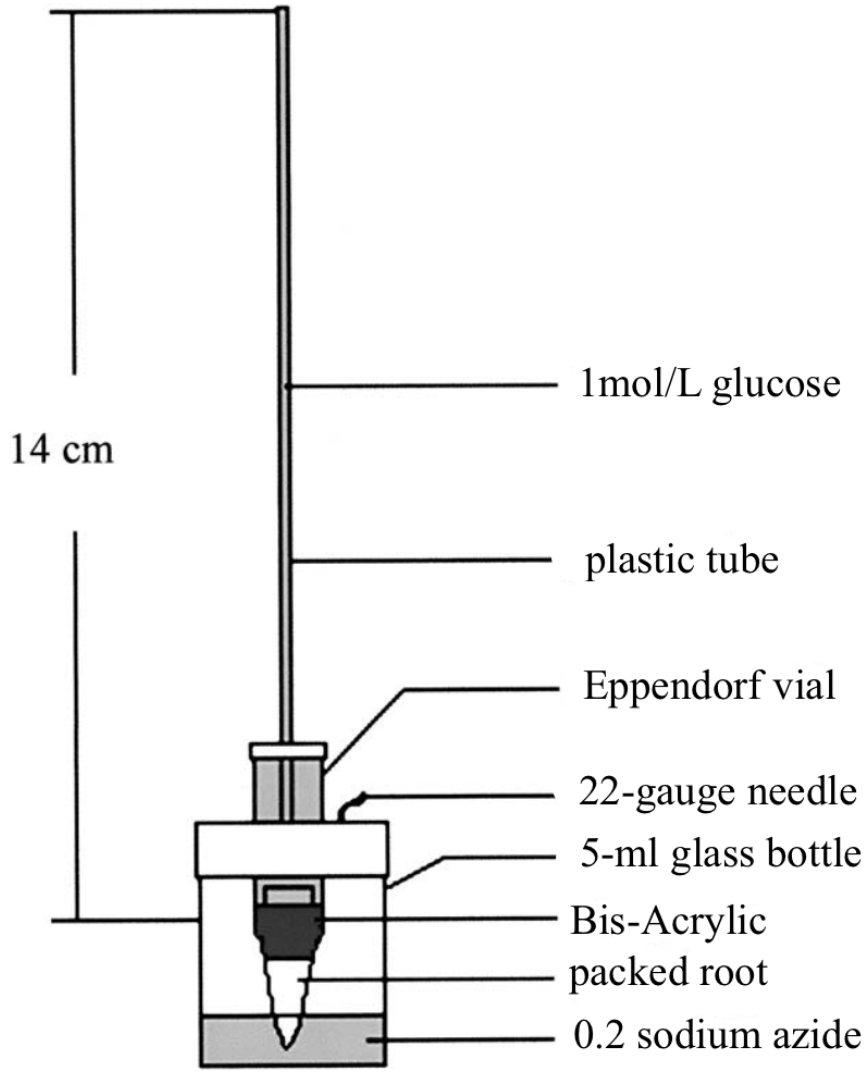


*Abbildung 14: Übersicht des Versuchaufbaues (nach Xu et. al., 2005)*

Die Überprüfung der Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllungen erfolgte durch die etablierte und in der Literatur beschriebene Glucose-Penetrationsmethode (Xu *et al*., 2005). Dazu wurden 80 Versuchsaufbauten (Abbildung 8) hergestellt und anhand ihrer Gruppeneinteilung auf vier Trocken-Steckschaum-Ziegel (Smithers-Oasis Germany GmbH, Grünstadt, Deutschland) verteilt.

Präparation der Versuchsaufbauten

Zunächst wurden Eppendorf Reaktionsgefäße und Rollrandgläser mit Schnappdeckel (Mercateo AG, Köthen, Deutschland) 40x19mm vorbereitet. Dazu wurde in den Verschlussdeckel eines Eppendorf Reaktionsgefäß mit einer Kunststofffräse (Komet, Lemgo, Deutschland) eine Öffnung (Durchmesser 8 mm) gebohrt und die konische Spitze des Eppendorf Reaktionsgefäßes mit einer Diamanttrennscheibe (Komet, Lemgo, Deutschland) um 6 mm gekürzt. In den Schnappdeckel eines

Rollrandglases wurde mit einer Kunststoffräse ein Loch (Durchmesser 11 mm) gebohrt. Das Eppendorf Reaktionsgefäß wurde mit seiner abgetrennten Spitze in den Deckel des Rollrandglases gesteckt. In die präparierte Öffnung des Verschlussdeckels des Eppendorf Reaktionsgefäßes wurde eine 15 cm lange serologische Pipette 5 ml (Eppendorf, Hamburg, Deutschland) eingeführt und mit Boxing Wachs (Kerr GmbH, Rasstatt, Deutschland) abgedichtet.

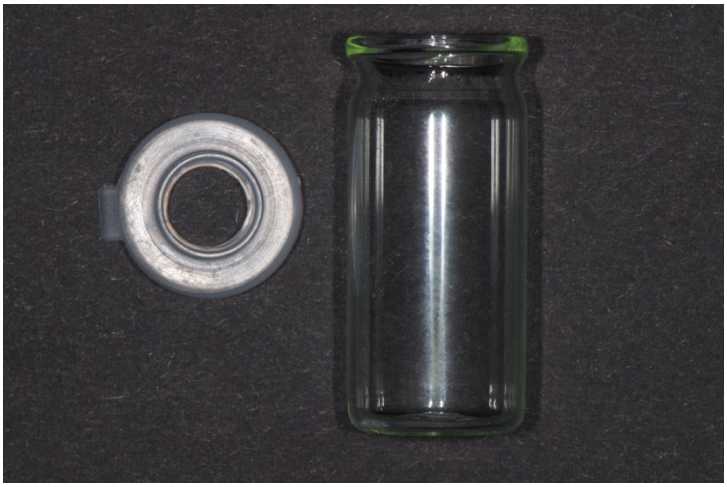

*Abbildung 15: Präpariertes Rollrandglas*

*Abbildung 16 und 17: Präpariertes Eppendorf Reaktionsgefäß*

Nun wurden die Versuchszähne in den Versuchsaufbau integriert. Dazu wurde der fertig verklebte Schnappdeckel mitsamt Eppendorf Reaktionsgefäß und serologischer Pipette vorsichtig abgehoben. Die Zahnwurzel wurde mit dem Kanaleingang voran in die konische Öffnung des Eppendorf Reaktionsgefäßes, gesteckt und von außen mit Kunststoff auf Bis-Acrylat-Basis (Luxatemp, DMG, Hamburg, Deutschland) verklebt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die apikale Region bis 3 mm vor dem Foramen apicale frei blieb.

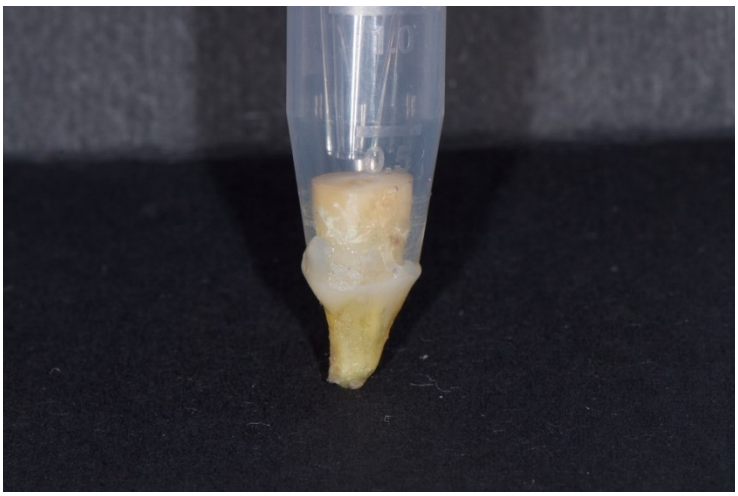

*Abbildung 18: Versuchszahn verklebt mit Eppendorf Reaktionsgefäß*

Einsatz von Natriumazid-Lösung und Glucose-Lösung

Für den Versuchsaufbau wurden eine Glucoselösung 1mg/ml (pH = 7,0, Dichte 1,09 x $10^3$ g/L, Viskosität 1,18 x $10^{-3}$ Pa·s bei 37° C), versetzt mit 0,2% Natriumazid (Sigma-Aldrich, München, Deutschland) und eine Ringer-Standard-Infusionslösung (Braun AG) versetzt mit 0,2% Natriumazid hergestellt.

Zu Beginn wurden jeweils 1 ml der hergestellten 0,2% natriumazid-haltigen Ringer-Standard-Infusionslösung in die Rollrandgläser gefüllt und damit die Proliferation von Mikroorgansimen im späteren Versuchszeitraum unterbunden (Xu *et al*., 2005). Nun wurden die präparierten Schnappdeckel, die den restlichen Versuchsaufbau (Zahnwurzel, Eppendorf-Reaktionsgefäß, serologischer Pipette) tragen, auf die Rollrandgläser gesteckt und kontrolliert, dass die Wurzelspitzen Kontakt zur Natriumazidlösung aufwiesen. So wurde sichergestellt, dass die penetrierende Glucose-Lösung im Rollrandglas aufgefangen werden konnte. Durch den Schnappdeckel wurde eine sterile Einmalkanüle eingeführt und bis zum Kontakt mit der natriumazid-haltigen Ringer-Standard-Infusionslösung vorgeschoben, um die späteren Probenentnahmen zu gewährleisten. Die serologische Pipette wurden mit 5 ml der 1 mol/L Glucose Lösung befüllt, um so eine Höhe von 14 cm über dem koronalen Anteil der Wurzelfüllung zu erreichen. Abgeleitet von der Formel zur Berechnung des hydrostatischen Drucks, konnte durch die Flüssigkeitssäule ein hydrostatischer Druck von $p = 1{,}5\ kPa$ auf die Wurzelkanalfüllung erreicht werden. Berechnet wird dieser durch die Dichte der Flüssigkeit ($\rho$), die Höhe der Flüssigkeitssäule (h) und der Fallbeschleunigung (g) anhand nachfolgender Formel:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Durch das Aufstecken einer sterilen 2 ml Einmalspritze (B. Braun Melsungen AG, Melsungen, Deutschland) an der Kanüle sowie der serologischen Eppendorf Pipette und das Wirken von

Druckluft wurde ein Dichtigkeitstest des Aufbaus durchgeführt. Versuchsaufbauten die Luftbläschen an den Abdichtungen erkennen ließen, wurden neu angefertigt.

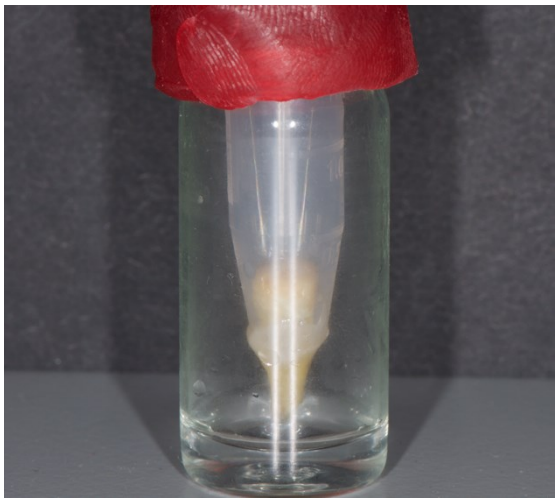

*Abbildung 19: Aufbau der Penetrationskammer anhand eines Versuchszahnes*

Verifizierung der Rahmenbedingungen

Die 80 Versuchsaufbauten wurden bei 100% Luftfeuchtigkeit und 37° C gelagert. Der abgeschlossene Inkubator Innovens 234 EB2 Inkubator erreichte die gewünschte Luftfeuchtigkeit durch das Beistellen einer mit Wasser gefüllten Nierenschale (Aesculap AG, Tuttlingen, Deutschland), welche in regelmäßigen Abständen kontrolliert und gegebenenfalls mit Wasser aufgefüllt wurde.

Probenentnahme

Für die spätere Bestimmung der Glucose-Konzentration erfolgte am 1., 3., 5., 7., 15., 20. und 30. Versuchstag nach Beginn der Testphase die Probenentnahme. Um ein konstantes Volumen zu gewährleisten, wurde für die Probenentnahme jeweils 0,5 ml 2% natriumazid-haltige Ringer-Standard-Infusionslösung mit einer sterilen 2 ml Einmalspritze in ein Rollrandglas appliziert und durch Aufziehen und Abgeben gleichmäßig durchmischt. Erst jetzt wurden 0,5 ml mit der Einmalspritze entnommen und in nummerierte 1,5 ml Eppendorf-Reaktionsgefäße (Eppendorf AG, Hamburg, Deutschland) gegeben.

## 3.9 Glucose Assay zum Nachweis der Dichtigkeit

Zur Bestimmung der Glucosekonzentration aus den gewonnenen Proben wurde das Glucose Assay Kit (GAHK-20, Sigma-Aldrich Chemie GmbH, München, Deutschland) verwendet. Zunächst wurde die Reagenzlösung, welche aus den Enzymen Hexokinase und Glucose-6-Phosphat Dehydrogenase sowie den Cofaktoren wie ATP und NAD besteht, hergestellt. Dazu wurde das

kristalline Pulver aus dem Kit mit 20 ml destilliertem Wasser durch vorsichtiges Kippen der Reagenzflasche gelöst.

Für die spektrophotometrische Bestimmung der Glucose Konzentration in den Proben wird ein Proben-Blank und ein Reagenz-Blank benötigt. Hierbei handelt es sich um Blindproben, die eine Aussage über die Funktionstauglichkeit der gewählten Testmethode erlauben. Außerdem werden eine Glucose-Standard-Verdünnungsreihe und die Test-Reihe auf einer 96-Well Mikrotiterplatte (Greiner Bio-One GmbH, Frickenhausen, Deutschland) vorbereitet. Der Probenblank sowie der Reagenzblank dienen dem Ausschluss von Verunreinigungen der jeweiligen Substanzen miteinander, um eine vorzeitige Reaktion auszuschließen. Zu beachten ist dabei die vom Hersteller angegebene Inkubationszeit von 15 min nach Mischen von Probe und Reagenz bis zur spektrophotometrischen Messung. Für den Proben-Blank wurden 100 µl destilliertes Wasser vorgelegt und mit 10 µl der mitgelieferten Standard Glucose Lösung (1mg/ml) gemischt. Der Reagenz-Blank wurde durch Mischung von 100 µl vorgelegter Glucose-Assay-Reagenz mit 10 µl destilliertem Wasser hergestellt.

Die Glucose-Standard-Verdünnungsreihe ist wichtig für die Erstellung einer Eichgeraden zur korrekten Ermittlung der Glucose Konzentration mittels der gemessenen Extinktion. Hierfür wurden von der Standard Glucose Lösung (1 mg/ml) Verdünnungen in folgenden Konzentrationen hergestellt, 0,5 mg/ml, 0,25 mg/ml, 0,125 mg/ml und 0,0625 mg/ml. Von den jeweilig entnommenen Proben des Glucosepenetrationsaufbaus wurden 10 µl je Well zu den vorgelegten 100 µl Glucose-Assay-Reagenz pipettiert und auf eine bestmögliche Durchmischung Wert gelegt. Außerdem wurden immer 2 Wells pro Probe angefertigt um Messfehler zu minimieren. Nach Zugabe der letzten Probe wurde die 96-Well Mikrotiterplatte für 15 min bei Raumtemperatur inkubiert, um sicherzustellen das folgende Reaktion ablaufen konnte:

$$Glucose + ATP \xrightarrow{Hexokinase} Glucose - 6 - Phosphat + ADP$$

$$Glucose - 6 - Phosphat + NAD \xrightarrow{G6PDH} 6 - Phosphogluconat + NADH + H^{+}$$

Für die letztendliche Bestimmung der Glucosekonzentration der Proben wird die Extinktion der $NADH/H^{+}$ Konzentration im Vergleich zu destilliertem Wasser im Varioskan Flash Reader (Thermo Fisher Scientific GmbH, Schwerte, Deutschland) mit der Skantl SW for Varioskan Flash Software (Thermo Fisher Scientific GmbH, Schwerte, Deutschland) bei einer Wellenlänge von 340 nm gemessen und mittels einer Eichkurve und der Standardabweichung berechnet.

## 3.10 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung der gewonnenen Messwerte wurden diese tabellarisch erfasst und in das Statistikprogramm SPSS (Version 24.0, SPSS Incorporated, Chicago, IL, USA) übertragen. Von den Versuchen zur Löslichkeit sowie den photometrischen Messwerten der Glucosekonzentrationen wurden die jeweiligen Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen berechnet.

Mittels des Kolmogorov-Smirnov Tests wurde zunächst die Gesamtvarianz aller Gruppen für die photometrisch bestimmten Messwerte der Probenentnahmetage 7, 15 und 30 erstellt. Dieses Verfahren untersucht, inwiefern eine Normalverteilung vorliegt. Das Niveau für eine Signifikanz der Unterschiede wurde auf $p < 0{,}05$ festgelegt. Die Annahme der Varianzhomogenität wurde durch den Levene-Test überprüft. Begründend auf der im Vergleich geringen Anzahl an Messwerten und der nicht gleichen Varianzen wurde zur Auswertung die nicht parametrische Rangvarianzanalyse (Kruskal-Wallis-Test) mit einem Signifikanzniveau von $p < 0{,}05$ herangezogen. Es folgte als Post-Hoc-Test Dunn-Bonferroni-Tests zwischen den einzelnen Gruppen, um die Unterschiede genauer zu charakterisieren.

# 4 Ergebnisse

## 4.1 Mischungsverhältnis MTA

ProRoot MTA hat seitens Herstellerangaben ein empfohlenes Anmischverhältnis von 0,18 g Wasser auf 0,5 g Zementpulver. Durch stetige Zugabe von destilliertem Wasser und Vermischung mit dem Pulver konnte, für den Einsatz als Sealer, ein Anmischverhältnis von 0,32 g Wasser auf 0,5 g Zementpulver bestimmt werden.

Bei dem Präparat Medcem MTA gibt der Hersteller ein ideales Anmischverhältnis von 0,12 g Wasser auf 0,35 g Pulver an. Im Zuge der experimentellen Bestimmung einer Sealer ähnlichen Konsistenz zeigte sich als optimales Resultat ein Anmischverhältnis von 0,22 g Wasser auf 0,35 g Pulver.

## 4.2 Löslichkeit nach DIN-ISO-Norm

Als Testgrundlage wurde hierbei die DIN EN ISO 6876 (2012) zur Untersuchung werkstoffkundlicher Eigenschaften verwendet.

Die Masse, die sich während des Versuches aus den getesteten Materialien bei einer zuvor festgelegten Temperatur sowie einer definierten Menge an bidestilliertem Wasser aus ihrem chemischen Verbund herauslöst, ergibt die gelöste Stoffmaße. Die für die Berechnung der Löslichkeit erforderliche Masse der Probekörper lässt sich durch die Differenz der Petrischale A und der Petrischale A mit dem Probekörperpaar ermitteln. Hierbei betrug die Masse von ProRoot MTA 1,97 mg, die von Medcem MTA 1,81 mg, die von AH Plus 1,86 mg und die von Total Fill BC 2,02 mg. Mithilfe der Differenz der auffangenden Petrischale B vor und nach der Evaporation des bidestillierten Wassers, lässt sich die Masse des gelösten Stoffes bestimmen. Bei ProRoot MTA ließ sich erkennen das 0,01 mg des Probekörpers in Lösung gegangen sind. Die in Lösung gegangen Anteile bei Medcem MTA betrugen 0,0 mg, bei AH Plus 0,0 mg und bei Total Fill BC 0,05 mg. Eine Übersicht der daraus resultierenden Ergebnisse ist in Tabelle 3 beschrieben.

| Material | ProRoot MTA | Medcem MTA | AH Plus | Total Fill BC |
|---|---|---|---|---|
| Löslichkeit [m/m %] | 0,51 | < 0,1 | <0,1 | 2,48 |

*Tabelle 3: Ergebnisse des Löslichkeitsversuches*

## 4.3 Reaktionsfähigkeit zwischen Sealer und Glucose

Durch die Untersuchung einer möglichen Reaktionsfähigkeit von Glucose mit einem der gewählten Studienpräparate, konnte gezeigt werden das keine Veränderung der Glucosekonzentration über den gewählten Studienzeitraum feststellbar war. Die gemessene Glucosekonzentration im zeitlichen Verlauf ist aus Abbildung 11 abzulesen.

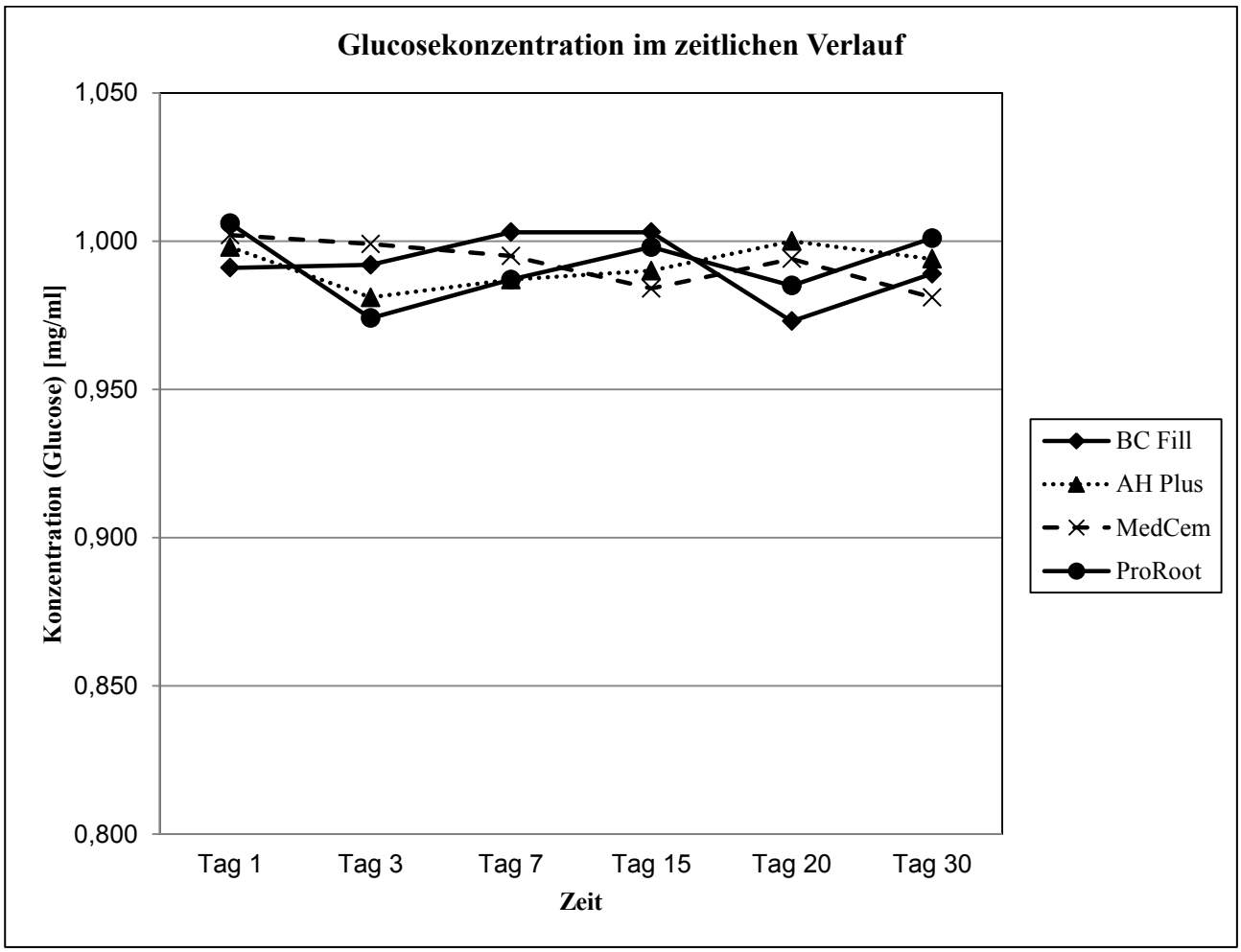


*Abbildung 20: Darstellung der Glucosekonzentration bei Inkubation mit den Studienpräparaten im zeitlichen Verlauf*

## 4.4 Auswertung des Experimentes zur Glucose Penetration

Zur Überprüfung der in vitro Dichtigkeit der einzelnen Präparate wurde eine Messung der Glucosekonzentration an den Studientagen 1, 3, 7, 15, 20 und 30 herangezogen. Für jeden Tag dieser Probenentnahmen wurden der Mittelwert sowie die Standardabweichung der einzelnen Studiengruppen berechnet und nachfolgend in Tabelle 2 dargestellt.

| Präparat | Tag 1 | Tag 3 | Tag 7 | Tag 15 | Tag 20 | Tag 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ProRoot MTA | 0,028 ± 0,043 | 0,080 ± 0,150 | 0,161 ± 0,307 | 0,294 ± 0,423 | 0,493 ± 0,510 | 0,471 ± 0,388 |
| Medcem MTA | 0,026 ± 0,073 | 0,075 ± 0,139 | 0,222 ± 0,428 | 0,375 ± 0,501 | 0,632 ± 0,582 | 0,707 ± 0,467 |
| AH Plus | 0,011 ± 0,022 | 0,088 ± 0,299 | 0,298 ± 0,517 | 0,358 ± 0,516 | 0,432 ± 0,511 | 0,449 ± 0,410 |
| Total Fill BC | 0,055 ± 0,168 | 0,321 ± 0,553 | 0,513 ± 0,700 | 0,560 ± 0,613 | 0,737 ± 0,568 | 0,904 ± 0,563 |
| Gesamt | 0,030 ± 0,077 | 0,141 ± 0,285 | 0,299 ± 0,488 | 0,397 ± 0,513 | 0,574 ± 0,543 | 0,633 ± 0,457 |

*Tabelle 4: Konzentration der Glucose an definierten Studienzeitpunkten (MW±SD, [mg/ml])*

Das folgende Diagramm stellt die Entwicklung der Glucosekonzentration über den Versuchszeitraum von 30 Tagen dar. Hierbei sind die Mittelwerte der gemessenen Glucosekonzentrationen (x-Achse) für jedes der vier Studienpräparate in Abhängigkeit vom Studienzeitpunkt (y-Achse) aufgezeigt.

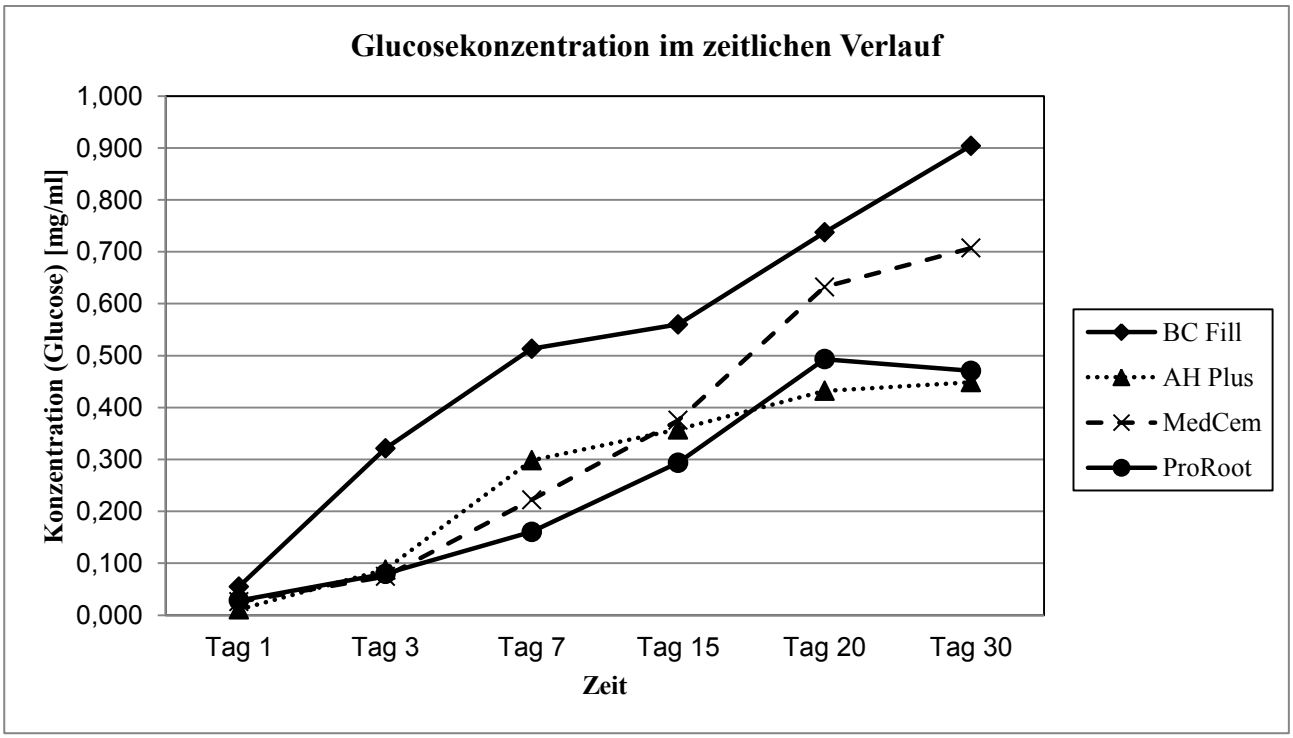


*Abbildung 21: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Glucosepenetration für die getesteten Studienpräparate*

In Bezug auf die untersuchte Normalverteilung zeigte der angefertigte Kolmogorov-Smirnov Test für die Studientage 7, 15 und 30 in den Stichproben ProRoot MTA, AH Plus und Total Fill BC keine Normalverteilung. Für die Stichprobe MedCem MTA zeigte die Auswertung lediglich für Studientag 30 eine mögliche Normalverteilung ($p$ = 0,047). Der nachfolgend angefertigte Levene-Test bestätigte durch Überprüfung der Nullhypothese, dass nur eine unmerkliche Varianzhomogenität innerhalb der Gruppen feststellbar war. Aufgrund dieser statistischen Ergebnisse wurde eine weiterführende Auswertung, entsprechend der Univariante Varianzanalyse (ANOVA), ausgeschlossen. Um eine fundierte Aussage über die Dichtigkeit der jeweiligen Studienpräparate zu treffen, wurden die einzelnen Versuchsgruppen hinsichtlich der Glucose-Konzentration und vorliegenden Konzentrationsunterschiede untersucht. Hierfür wurde für die Studientage 7, 15 und 30 ein Kruskal-Wallis-Test angefertigt. Dieser Test zeigte für die Studientage 7 und 15 noch keinen signifikanten Unterschied der jeweiligen Präparate. Im weiteren Verlauf der Studie konnte am Tag 30 jedoch ein signifikanter Unterschied ($p$ = 0,037) zwischen den getesteten Präparaten festgestellt werden. Für einen exakten Vergleich der einzelnen Studiengruppen untereinander wurde ein Dunn-Bonferroni-Post-Hoc-Test für Tag 30 durchgeführt. Der Vergleich zwischen Total Fill BC und AH Plus zeigte eine erhöhte Glucose-Konzentration für die Total Fill BC Gruppe ($p$ = 0,010), was damit eine schlechtere Dichtigkeit dieses Präparates offenlegt. Der weitere Vergleich von Total Fill BC mit den herangezogen MTA Präparaten zeigt einerseits einen signifikanten Unterschied ($p$ = 0,025) von Total Fill BC im Verglich zu ProRoot MTA und somit eine Prävalenz von ProRoot MTA. Andererseits im Vergleich mit MedCem MTA zeigt Total Fill BC keinen signifikanten Unterschied und damit keine Unterlegenheit in der Dichtigkeit. In der Analyse der übrigen Glucose-Konzentrationen von AH Plus und ProRoot MTA, MedCem MTA und ProRoot MTA sowie AH Plus und MedCem MTA lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen.

In Abbildung 22 sind die Glucosekonzentrationen zum Ende des Studienzeitraumes dargestellt. Hierbei ist der Mittelwert der gemessenen Glucosekonzentrationen (x-Achse) für jedes der vier Studienpräparate an Tag 30 (y-Achse) aufgezeigt. Zusätzlich sind die einzelnen Signifikanzen der Gruppen aufgeführt. Hiermit werden die zuvor erwähnten signifikanten Unterschiede in der Dichtigkeit noch einmal deutlich veranschaulicht.

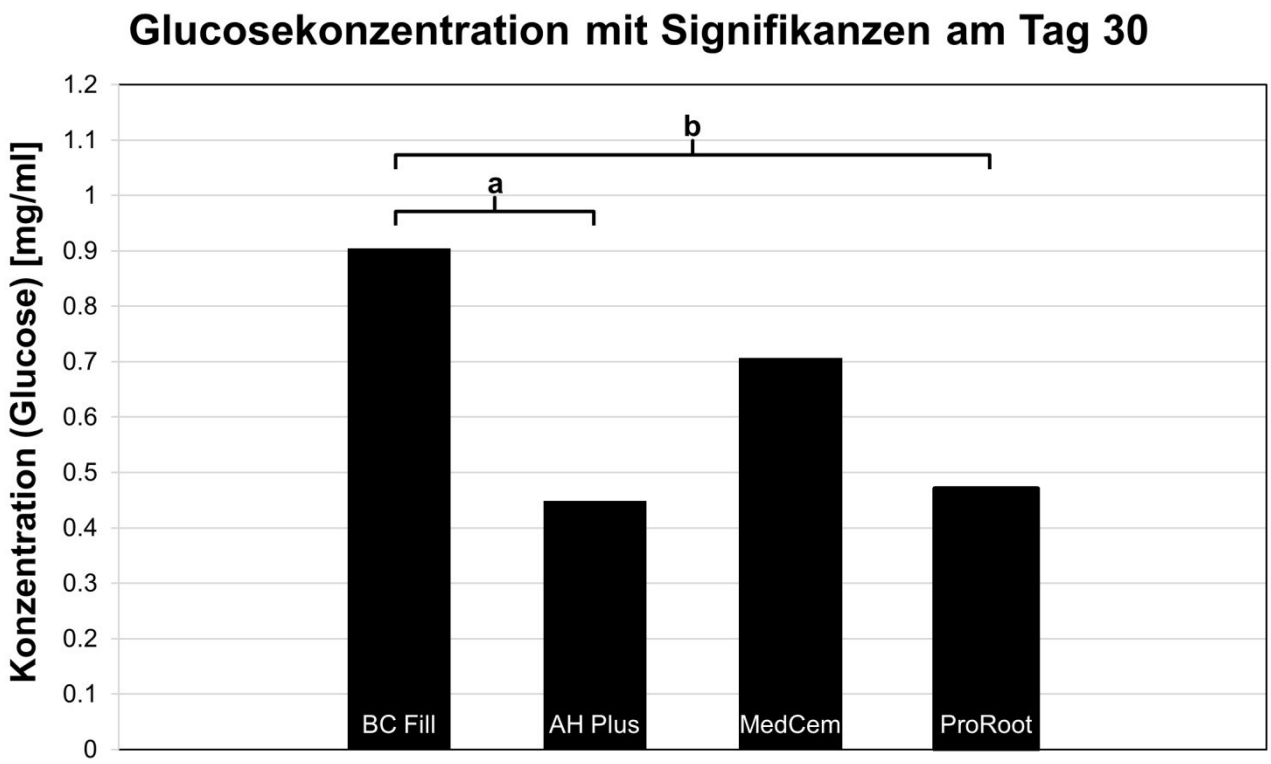


*Abbildung 22: Darstellung der Glucosekonzentration mit Signifikanzen am Tag 30 für die getesteten Studienpräparate, Dunn-Bonferroni-Post-Hoc-Test; [a] p = 0,010; [b] p = 0,025*

# 5 Diskussion

Die Zielsetzung dieser In-Vitro Studie bestand in der Untersuchung der Dichtigkeit von AH Plus, MedCem MTA, ProRoot MTA und Total Fill BC, die im Rahmen von Wurzelkanalfüllungen eingesetzt wurden. Die Dichtigkeit der Obturation ist für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ein herausgehobenes Merkmal, welches mit darüber entscheidet, ob ein bakteriendichter Verschluss des Wurzelkanalsystems erreicht werden kann und somit ein klinischer Erfolg zu verzeichnen ist.

Um eine hohe Vergleichbarkeit zu anderen Studien zu schaffen, sowie die Standardabweichung der Studiengruppen untereinander möglichst gering zu halten, wurde bei der vorliegenden Arbeit mit Hilfe von Ausschlusskriterien und einheitlicher Methodik auf gleiche Voraussetzungen größter Wert gelegt. So ist es möglich, ein Hauptaugenmerk auf die verwendeten Sealerpräparate zu legen und sinnvolle Vergleiche zu formulieren. Da es selbst bei den hierfür verwendeten humanen einwurzligen Frontzähnen in der Regel zu zahlreichen Variationen der Wurzelkanalanatomie kommt, wurden wie in den meisten Studien (Rohde *et al.,* 1996; Brown *et al.,* 1994) auch hier nur Zähne mit einem Wurzelkanal ausgewählt. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass keine Zähne mit Wurzelfrakturen oder resorptiven Defekten, die einen negativen Einfluss auf die Verbundfestigkeit von Wurzelkanal und Füllmaterial haben könnten, verwendet wurden. Jedoch ist es aufgrund der zahlreichen makroskopischen wie auch mikroskopischen Anatomien der Zahnstruktur nicht möglich, eine hundertprozentige Standardisierung bei humanen Zähnen zu erreichen. Auf den Einsatz von künstlichen Wurzelkanalsystemen wurde aufgrund fehlender klinischer Faktoren, wie zum Beispiel dem Smear layer und dem damit verbundenen Einfluss auf die Dichtigkeit (Tepel, 1998), gezielt verzichtet. Stattdessen wurden durch Röntgenkontrollen ähnliche Morphologien der Wurzelkanäle überprüft. Im Zuge der chemo-mechanischen Aufbereitung wurden für jeden Zahn exakt die gleichen Feilensequenzen durchlaufen, sowie ein einheitliches Spülprotokoll festgelegt. Als sicherlich kritischer zu betrachten ist die gewählte Technik der lateralen Kondensation, die wesentlich techniksensitiver ist und damit eine höhere Streuung der Kompaktionsdichte bedeuten kann. Trotzdem lässt sich festhalten, dass diese nach wie vor den Goldstandard in der Endodontologie darstellt.

Die mechanische Komponente der Wurzelkanalaufbereitung wurde hierbei standardisiert maschinell mittels des Feilensystems Mtwo bis ISO 40 Taper 4 durchgeführt, welches für eine hohe Vergleichbarkeit der aufbereiteten Wurzelkanäle sorgt. Als Alternative zur maschinellen Aufbereitung ist die manuelle Aufbereitung mittels Nickel-Titan oder Edelstahlfeilen zu nennen. Diese weit verbreitete Methode wird immer noch als Teil des Lehrplans an deutschen Universitäten praktiziert und erlaubt einen besseren taktilen Einsatz der Instrumente. Jedoch ist festzuhalten, dass die maschinelle Aufbereitung, abgesehen von der immensen Zeitersparnis (Gluskin *et al.,* 2001;

Alves *et al.,* 2013) und der geringeren Gefahr etwaiger Instrumentenfrakturen (Schneider 1971), darüber hinaus für einen besseren Erhalt des eigentlichen Wurzelkanalverlaufes sorgt (Gluskin *et al.,* 2001; Paqué und Musch, 2005). Welche der beiden Methoden nun die entscheidend bessere Elimination von pulpalem Gewebe erreicht, ist auch momentan durch das Vorliegen einer konträren Studienlage umstritten (Ahlquist et *al.*, 2001; Schäfer *et al.*, 2006). Beide Methoden sind dementsprechend gut geeignet, jedoch ist die maschinelle in dieser Studie, aufgrund der geforderten Standardisierung der Aufbereitung, die Methode der Wahl.

Durch die komplexe mikroskopische sowie makroskopische Anatomie des Wurzelkanals, kann eine effektive Reduzierung der Bakterienlast nur durch eine kombiniert mechanisch-chemische Aufbereitung erzielt werden (Bystrom und Sundqvist, 1981; DGZMK). Die chemische Komponente sollte dabei mögliche persistierende Bakterien eliminieren, um so eine mögliche Verstoffwechselung von penetrierender Glukose und damit eine Verfälschung der Studienergebnisse zu unterbinden. Ein möglicher Kritikpunkt dieser Arbeit könnte die Frage über den Sinn des Einsatzes von Natriumhypochlorit als Spüllösung sein, das negative Eigenschaften auf die Dentinstruktur haben kann (Lee *et al.,* 2004). Jedoch stehen diesem, lediglich unter Laborbedingungen untersuchten, Effekt eine Vielzahl von essentiellen Merkmalen entgegen. Einerseits ist Natriumhypochlorit jeder anderen Chemikalie im Bereich seiner gewebsauflösenden Wirkung überlegen (Naenni *et al*., 2004) und zum anderen gleichwertig antibakteriell wirksam, im Verglich zu Chlorhexidin (Siqueira *et al.,* 2007). Ein weiterer Faktor stellt die Elimination, des in der Literatur kontrovers diskutierten Smear layers dar (Fraunhofer *et al.,* 2000; Cobancara *et al.,* 2004; Ghoddusi *et al.,* 2007; Saleh *et al.,* 2008). Dieser sollte nach Auffassung diverser Autoren für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung entfernt werden (Kennedy *et al.,* 1987; Gettleman *et al.,* 1991). Aufgrund der letztendlich signifikanten Anzahl an Studien, bezüglich einer besseren Dichtigkeit nach Entfernung des Smear layers (Shahravan *et al.,* 2007), wurde auch in dieser Studie auf die Spülung mit Ethylendiamintetraessigsäure nicht verzichtet. Um auch hierbei eine optimale Vergleichbarkeit in der vorliegenden Arbeit zu erreichen, wurde eine einheitliche Anwendung von Spülflüssigkeiten für jede Gruppe umgesetzt.

Im Anschluss an die beschriebene einheitliche chemo-mechanische Aufbereitung der 80 Studienzähne erfolgte die Obturation der zu untersuchenden Sealerpräparate. Hierbei wurde die Reihenfolge der Methode beliebig verändert, um beispielsweise einer Ermüdung des Behandlers durch simultane Anwendung eines Materials vorzubeugen. Wie in Studien untersucht, hat die Applikationsmethode des Sealers einen Einfluss auf die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung. So wiesen Said und Kollegen in einer Studie nach, dass die höchste Dichtigkeit bei Gebrauch einer Papierspitze vorliegt (Said *et al.,* 2012). Um die Präparate nach erfolgter Füllung auf ihre

Dichtigkeit hin zu untersuchen sowie zu vergleichen, wurde bei allen Gruppen die gleiche Sealer-Applikationsmethode gewählt. Als fraglich zu beurteilen ist die enorm schnelle Abbindezeit der beiden Zemente, was eine stetige Anmischung erforderlich machte oder die Entwicklung einer eigenständigen Applikationsmethode indizieren würde. Das eine anderweitige Konsistenz oder Applikationsmethode positive oder negative Eigenschaften auf die nachfolgende Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung und damit auf die vorliegenden Studienergebnisse haben kann, soll hier der Vollständigkeit halber ausdrücklich erwähnt werden. Als Goldstandard in der Endodontie gilt nach wie vor die laterale Kompaktion, welche langjährig konstant gute Resultate zeigen konnte (Kuttler 1979; Lares und El Deeb 1990). Jedoch ist diese Methode sehr Technik sensitiv und damit enorm von den Fähigkeiten des Behandlers abhängig. Als kritisch zu sehen ist im Zusammenhang mit der Studie der Einsatz von Spreadern. Zum einen ist eine Standardisierung der Menge von akzessorischen Stiften bis die Füllung ausreichend kompaktiert ist, nur schwer möglich. Zum anderen sinkt durch die Kompaktion der Anteil an benötigtem Sealer und damit sein Einfluss auf die Dichtigkeit (Al-Khatar *et al.,* 1999). Die Abweichung bei der Füllmethode zugunsten der Single Cone Technik in der Total Fill BC Gruppe ist dem geschuldet, dass dieses Produkt für ein optimales Ergebnis mit dem dazugehörigen Obturationskit empfohlen wird. Der Hersteller wirbt hierbei mit speziell biokeramisch imprägnierten Füllstiften. Entsprechend der Single Cone Technik stellt diese Methode eine besonders schnelle und einfache Handhabung dar. Als problematisch zu betrachten ist, dass der Masterpoint möglichst exakt dem Wurzelkanal entsprechen sollte. Andernfalls ist der Sealeranteil, beispielsweise bei ovalen Wurzelkanälen, unverhältnismäßig groß (Wu *et al.,* 2000) und die Dichtigkeit wird maßgeblich über die Sealereigenschaften bestimmt. Dies wäre möglicherweise eine Erklärung für das schlechte Abschneiden von Total Fill BC in der durchgeführten Studie. Jedoch bleibt zu beachten, dass der Hersteller diese Obturationsmethode vorgibt und somit dafür Rechnung trägt, dass ein neu entwickeltes Präparat sich gegen den derzeit vorherrschenden Standard in der Endodontie behaupten können sollte.

Jegliche Anzeichen von Qualitätsdifferenzen der Wurzelkanalfüllung führten zu einer Revision und anschließend erneut durchgeführten Spülung und Wurzelkanalfüllung. Trotz der strengen röntgenologischen Kontrolle der Wurzelkanalfüllungen, sind etwaige Porositäten bei der zweidimensionalen Darstellung einer dreidimensionalen Struktur niemals auszuschließen. Dementsprechend ist dies zwar bemessen an Kosten und Aufwand sowie klinischer Kongruenz die diagnostische Methode der Wahl, jedoch stets kritisch zu hinterfragen.

Einer der entscheidenden Faktoren für die spätere Beurteilung eines Wurzelfüllmaterials ist seine Fähigkeit, eine Barriere zwischen Wurzelkanalsystem und apikalem Gewebe, sowie zwischen Wurzelkanalsystem und Mundhöhle zu schaffen. Diese Dichtigkeit einer Wurzelkanalfüllung gilt es

mithilfe eines möglichst der natürlichen Situation entsprechenden Penetrationsverfahrens zu untersuchen. In der Literatur sind eine Vielzahl an Methoden zu finden, unter anderem die Flüssigkeitspenetrationsmethode, die Penetration von Bakterien und der Farbstoffpenetrationstest, um nur die Wichtigsten zu nennen. Ein Nachteil ist jedoch, dass viele der Ergebnisse dieser Nachweismethoden als sehr widersprüchlich anzusehen und nur bedingt untereinander vergleichbar sind (Wu und Wesselink 1993). Ebenso wird die klinische Relevanz einiger Methoden, aufgrund eines fehlenden Zusammenhangs zwischen einer Farbstoffpenetration und einer periapikalen Gewebsreaktion, angezweifelt (Susini *et al.,* 2006). Auch der Einsatz von Bakterien zur Validierung ist durchaus als kritisch anzusehen. Aufgrund der Größenverhältnisse von Bakterien und anderen Molekülen wie Glucose oder Farbstoffe, weisen diese definitiv eine andere Verhaltensweise in ihrer Penetration auf. Dies kann als eine Ursache für die widersprüchlichen Studienergebnisse in Betracht kommen (Scheerer *et al.,* 2001; Estrela *et al.,* 2011; Amoroso-Silva *et al.,* 2014). Aufgrund dieser Sachverhalte haben wir uns entschieden, einen durch Xu und Mitarbeiter beschriebenen Glucosepenetrationsaufbau zu verwenden (Xu *et al.,* 2005), der sich durch eine hohe Sensitivität und Einfachheit in der Anwendung etabliert hat. Durch dieses Versuchsmodell wird die Penetration der Glucoselösung entlang der Wurzelkanalfüllung validiert. Eine vollständige Elimination von Bakterien im Wurzelkanalsystem ist aufgrund der komplizierten anatomischen Struktur unmöglich. Es ist daher von höchstem Interesse, diese persistierenden Keime durch eine künstliche Barriere von möglichen Stoffwechselsubstraten abzuschirmen. Betrachtet man die Tatsche, dass Glukose ein wichtiges Substrat für oralpathogene Mikroorganismen ist, wird die klinische Relevanz umso deutlicher. Es simuliert aufgrund seiner Eigenschaft, nicht in das Wurzeldentin einzudringen (Shemesh *et al.,* 2007), die Situation einer undichten koronalen Restauration und dem folgend, ein koronales Besiedeln des Wurzelkanalsystems. Dabei kann es durch sein niedriges Molekulargewicht, sowie seiner hydrophilen Stoffeigenschaften, auch durch kleinste Räume diffundieren und somit ein Indikator für kleinste Bakterientoxine, die entlang der Wurzelkanalfüllung penetrieren, darstellen (Van der Sluis *et al.,* 2007). Ein weiterer entscheidender Vorteil ist der quantitative, wie auch kontinuierliche Nachweis von Glucose. So kann relativ einfach, mittels einer enzymatisch photometrischen Messung, die Glucosekonzentration über einen längeren Studienzeitraum erhoben werden. Entsprechend aller verwendeten Methoden in dieser Arbeit wurde auch hierbei größter Wert auf die Standardisierung der Versuchskammern gelegt. Mögliche Fehlerquellen wurden zuvor überprüft und bei Bedarf entfernt. So hätte beispielsweise eine fehlerhafte Abdichtung der einzelnen Bauteile einer Versuchskammer zu einer Glucosepenetration entlang der Abdichtungen, anstelle entlang der Wurzelkanalfüllung in das Rollrandglas geführt. Dementsprechend stellte sich die alleinige Abdichtung mit Cyanoacrylat als nicht beständig genug heraus, wodurch eine Abdichtung mittels Bis-Acrylat und Boxing Wachs

experimentell gewählt wurde. Nach Aufbau einer jeden Versuchskammer wurde diese mittels Druckluft auf ihre Dichtigkeit hin überprüft und bei Bedarf revidiert. So konnte eine negative Beeinflussung der Messergebnisse durch eine nicht vorgesehene Penetration verhindert werden. Ein weiterer entscheidender Faktor bestand in der Zugabe von 0,2% Natriumazid zur Ringerstandardlösung, um eine mögliche Proliferation von Mikroorganismen und damit eine Verstoffwechselung von Glucose durch diese zu verhindern.

Im Nachhinein als kritisch zu beurteilen, sind die gewählten Rahmenbedingungen. Betrachtet man den Studienzeitraum von 30 Tagen und vergleicht dies mit der Verweildauer von Wurzelkanalfüllungen im Mund des Patienten, so divergieren diese Werte erheblich. Eine längere Zeitspanne der Studie wäre sicherlich interessant gewesen und hätte weitere positive oder negative Eigenschaften der verwendeten Präparate gezeigt. Die Messwerte der Studie offenbaren nichts destotrotz aussagekräftige Ergebnisse und zeigen zumindest bei zwei von vier Stoffen keine signifikanten Konzentrationsänderungen mehr an. Ein weiterer Faktor, der für die Studienergebnisse sehr interessant hätte sein können, wäre ein über die initiale Alterung der Materialien von 7 Tagen hinausgehender Alterungsprozess.

Vergleicht man den gewählten enzymatisch-photometrischen Test zur Bestimmung der Glucosekonzentration mit anderen Methoden, wie zum Beispiel einer Quantifizierung von Ferricyaniden, so zeichnet sich das Glucose-Assay durch eine besonders hohe Sensitivität aus (Bishop *et al.,* 1985).

Zu Beginn wurden entsprechend der Materialien Vorversuche durchgeführt. Die beiden Zementderivate sollten auf eine mit den Sealern möglichst gleiche und damit vergleichbare Basis gesetzt und die Verarbeitung als Sealer überhaupt erst ermöglicht werden. ProRoot MTA und MedCem MTA wären beide in ihrer ursprünglichen Konsistenz nicht als Sealer einsetzbar und würden wesentliche Faktoren, wie zum Beispiel ein mögliches Penetrieren in die Dentintubuli, nicht erfüllen können. Um dies zu erreichen, wurde zunächst der Vorversuch zum Mischungsverhältnis angefertigt. Hierbei wurden beide Zemente gleichmäßig aufgeteilt und durch Zugabe von kleinsten Mengen Wassers bis zur gewünschten Konsistenz per Hand angemischt. Im Anschluss wurden die Pulver- und Wasserwerte notiert und zur Fehlerminimierung durch Wiederholung dieser Methode auf eine gleichmäßige Reproduzierbarkeit hin überprüft. Eine mögliche Veränderung der physikalischen Eigenschaften, wie Abbindezeit und Volumenbeständigkeit, wurde dabei toleriert. Diese ist für die letztendliche Aussage einer möglichen Überlegenheit gegenüber dem klassischen Sealer AH Plus im Bereich der Dichtigkeit von sekundärer Bedeutung. Trotzdem ist anzuführen, dass weitere Untersuchungen bezüglich dieser Eigenschaften als durchaus sinnvoll zu betrachten sind. Zusätzlich stellen diese eine wichtige

Vorrausetzung dar, damit die Indikation von Portlandzementderivaten für herkömmliche Wurzelkanalfüllungen weiterführend untersucht werden könnte.

Die Überprüfung des Verhaltens der Präparate mit der verwendeten Glucoselösung und mit Wasser stellten weitere wichtige Vorversuche dar. So konnte experimentell darauf vertraut werden, dass es später bei dem eigentlichen Studienmodell nicht zu Verfälschungen der Ergebnisse kommt.

Im Löslichkeitsversuch mit Wasser zeigten alle Präparate bis auf Total Fill BC lediglich geringste Auflösungserscheinungen in bidestilliertem Wasser. Damit konnte eine vernachlässigbare Tendenz zur Auflösung durch Penetration einer wasserbasierten Lösung festgestellt werden. Das schlechte Abschneiden von Total Fill BC war hierbei vorrangig dadurch bestimmt, dass entgegen der Herstellerangaben von 4-10 h, der Sealer nach über 72 h nicht vollständig abgebunden vorlag. Dieses Phänomen wurde mehrmals überprüft.

Der Versuch einer möglichen Reaktion von Glucose mit einem der Präparate zeigte, dass keine Reaktionsfähigkeit feststellbar war. Hierdurch konnten mögliche Konzentrationsschwankungen im Dichtigkeitsversuch durch Reaktionen mit den einzelnen Präparaten ausgeschlossen und kritische Parameter minimiert werden.

In der vorliegenden experimentellen Arbeit kamen nur praxisrelevante Obturations- sowie Aufbereitungstechniken zum Einsatz. Vor allem die Analyse der Portlandzementderivate als Sealer und des Präparates Total Bill BC stellte hierbei eine Lücke in den existierenden wissenschaftlichen Untersuchungen dar. Ein weiterer Faktor, der für die Studie von durchaus interessanter Bedeutung hätte sein können, wäre die Integration einer positiven und negativen Kontrollgruppe. Diese hätte eine Validität des Glucose-Pentrationsaufbaus nachweisen und damit auch eine Gültigkeit für den Penetrationsweg entlang der Wurzelkanalfüllung demonstrieren können. Jedoch erschien dies als eher nachgeordnet, da zahlreiche Autoren die Gültigkeit des von Xu und Mitarbeiter entwickelten Modelles bestätigt haben (Zou *et al.*, 2007; Shemesh *et al.*, 2007; Kaya *et al.*, 2007; Ozok *et al.*, 2008).

Beim Vergleich der Messtage wird gruppenunspezifisch deutlich, dass ab dem 3. Messtag eine steigende Glucosekonzentration festgestellt wurde. Diese Konzentration steigt kontinuierlich von Messtag zu Messtag an und scheint ab dem Messtag 20 bei ProRoot MTA und AH Plus langsam ein Gleichgewicht einzustellen. Dem entgegen steigen die Werte für MedCem MTA und Total Fill BC durch eine abflachende Kurve weiter an und würden sich höchstwahrscheinlich bei einem weiteren Messtag über den Studienzeitraum hinaus ähnlich verhalten. Als mögliche Erklärung für dieses Phänomen kommt vor allem die Sensitivität des Glucose Essays in Betracht. Daher wäre eine

Verdünnungsreihe in den späteren Messtagen durchaus als sinnvoll zu bewerten. Jedoch macht dieses Phänomen für die eigentliche Aussage dieser Studie und damit für die Tendenzen, wie sich die Dichtigkeit der einzelnen Präparate zueinander verhalten, keinen wesentlichen Unterschied. Die entscheiden Rückschlüsse sind daher, dass keines der untersuchten Materialien eine langfristig dichte Obturation erzielt. Weiterhin werden die Wurzelkanalfüllungen mit aufsteigender Verweildauer in-vitro zunehmend undichter. Obwohl sich manche Gruppen signifikant besser oder schlechter darstellten, hatten alle eine Abnahme der Dichtigkeit über die Studiendauer hinweg gemeinsam. Diese Ergebnisse sind durchaus als positiv zu beurteilen, da sie den derzeitigen Stand der Wissenschaft repräsentieren und die in der Literaturübersicht erwähnten Erfolgsquoten teilweise erklären. Jedoch zeigen sie nur weiterhin auf, dass die Materialien in der Endodontie noch nicht vollumfänglich den wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht werden. Ein Vergleich der Gruppen untereinander ist wichtig, da er die Materialien in Bezug zueinander bringt.

Der auf Epoxidharz-Basis entwickelte Sealer AH Plus stellt aufgrund seiner herausragenden Materialeigenschaften auch heute noch den Goldstandard in deutschen Praxen und Unikliniken dar. Zusätzlich wird er in zahlreichen Studien als Referenzmaterial, verwendet um qualitative Aussagen zur Über- oder Unterlegenheit von anderen Materialien zu formulieren. Er ist damit die beste Methode um die Variante einer Skala zu entwickeln, die neue Präparate quantitativ über- oder unterhalb von AH Plus einordnet. Die Auswertung der vorliegenden experimentellen Studie konnte zeigen, dass sich auch hier AH Plus durch signifikant bessere oder gleiche Werte behaupten kann. Ein kritischer, jedoch bekannter Nachteil von AH Plus ist seine Schwäche in Bezug auf die Schnittstelle mit Guttapercha (Tay *et al.,* 2005) und damit eine Erklärung für eine nicht durchschnittlich höher nachgewiesene Dichtigkeit. Mit jedem zusätzlichen akzessorischen Guttaperchastift, der mit Sealer benetzt ist, kommt es zu einer möglichen Potenzierung dieser Eigenschaft. Dementsprechend liegt die Vermutung nahe, dass sich der Vorteil der lateralen Kondensation durch AH Plus minimieren könnte.

Total Fill BC zeigte in dieser Studie von den vier Präparaten die schlechtesten Ergebnisse. Es war signifikant schlechter in Bezug auf die Dichtigkeit gegenüber jeder anderen Gruppe. Die Hauptkritik, die zunächst in Betracht kommt, ist die dem Hersteller entsprechende Empfehlung der Single Cone Technik. Wie bereits erwähnt ist diese durch einen wesentlich höheren Anteil an Sealer gekennzeichnet, der dem zufolge entscheidend über die Qualität der Dichtigkeit bestimmt. Jedoch kann dieser möglichen Erklärung keine weiterführende Aussage über signifikante Qualitätsunterschiede zwischen der Single Cone Technik und der lateralen Kondensation entnommen werden, da keines der Materialien in beiden Obturationsmethoden zum Einsatz kam. Eine weiterführende Untersuchung dieses Materials in Verbindung mit anderen

Obturationsmethoden wie der lateralen Kondensation wäre wichtig, um dieses besser einschätzen zu können. Weiterhin als sehr problematisch zu betrachten, sind die Angaben des Herstellers in Bezug auf die Abbindezeit und die damit verbundenen Konsequenzen für die Erklärung der geringen Dichtigkeit. Das wiederholte nicht Einhalten der Angaben wirft weiterführende klinische Fragen auf, wie ein nach 72 h nicht erhärtender Sealer eine hermetische Barriere gegen Mikroorganismen und physiologische Flüssigkeiten darstellen soll. Dieses Phänomen könnte eine mögliche Ursache für die unterlegene Dichtigkeit sein. Weiterhin wäre es sehr wichtig, andere Angaben des Herstellers zu überprüfen und damit eine sichere klinische Anwendung zu schaffen.

Die beiden verwendeten Mineral Trioxide Aggregate zeigten in der Studie, dass ihre Gruppen nicht signifikant schlechter waren als die Gruppe von AH Plus und signifikant besser als die Gruppe von Total Fill BC. Untereinander zeigten sie keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Dichtigkeit. Diese Ergebnisse sind zunächst als positiv zu bewerten. Ein Einsatz als adäquater Sealer erscheint möglich, wenn er auch keine deutliche Verbesserung zu bereits etablierten Materialien darstellt. Jedoch ist die Dichtigkeit nicht die einzig wichtige Eigenschaft, die ein Sealer besitzen sollte. Weiterführende Studien sollten die Materialeigenschaften untersuchen, da alle vorliegenden Studien mit einem anderen Mischungsverhältnis von Pulver zu Wasser angefertigt wurden. Die als kritisch zu beurteilenden Punkte im Umgang mit ProRoot MTA sowie MedCem MTA, waren in dieser Studie vor allem die Probleme bezüglich der Verwendungsmethode und der Verarbeitungszeit. Beide Materialien zeichnen sich durch eine schnelle chemische Abbindung aus. Das macht eine Obturation mittels lateraler Kondensation und ausreichend benetzter akzessorischer Stifte in einem Anmischvorgang fast unmöglich. Die Entwicklung einer anderweitigen Applikationsmethode oder die zur Hilfenahme einer anderen Obturationsmethode wäre ein entscheidender Ansatzpunkt in der Weiterentwickelung. Einerseits wäre es denkbar durch eine weniger zeitintensive Arbeitsmethode, als die laterale Kondensation, die Materialmenge zu minimieren. Ein anderer Lösungsansatz könnte in der Entwicklung einer neuen Applikationsmethode liegen, die es ermöglicht ein vorgemischtes Material mehrfach zu benutzen. Als ein weiterer Aspekt in der minimalinvasiven Zahnmedizin stellt sich das problemlose Entfernen der Wurzelkanalfüllung dar. Kommt es bei einer unzureichenden Elimination der Mikroorganismen im Wurzelkanal zu einer erneuten Besiedelung des periapikalen Bereiches, sollte eine notwendige Revision einfach und sicher durchführbar sein. Hierbei wäre die Entfernung des Zements als äußerst kritisch zu betrachten und eine Revision möglicherweise nicht durchführbar. Das würde was einen invasiven Eingriff im Sinne einer Wurzelspitzenresektion oder einer Extraktion nach sich ziehen. Beides sind Komplikationen, die in der Zahnerhaltung in erster Linie verhindert werden sollten. Letztendlich bleibt noch die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit, da der Einsatz von Mineral

Trioxide Aggregate sehr kostenintensiv wäre. Weiterhin sind eben bei diesen neuen möglichen Indikationsbereichen weitere funktionelle Untersuchungen notwendig, um die Wirkung von Kaukräften auf die Materialien zu erforschen.

Aufgrund des hohen Stellenwertes der apikalen Dichtigkeit in Bezug auf eine erfolgreiche endodontische Therapie, ist ein Vergleich mit anderen Studien zu diesem Aspekt sinnvoll. Der Einsatz von Mineral Trioxide Aggregaten als Wurzelfüllmaterial ist in der Literatur jedoch nur im Zusammenhang mit der Verwendung als retrogrades Wurzelfüllmaterial beschrieben. Allgemein kann man hierbei zusätzlich von einer nicht einheitlich vorliegenden Studienlage sprechen, da mehrere unterschiedliche Methoden zum Einsatz gekommen sind. Dies spiegelt sich auch in den vorliegenden Ergebnissen wieder, beispielsweise zeigt eine durchgeführte Studie von 2011 eine zunehmend steigende Undichtigkeit von ProRoot MTA und Portlandzement im Vergleich mit dem Material Sealapex (Estrela *et al*., 2011). Wieder eine andere Studie aus dem gleichen Jahr berichtet von einer positiven Abdichtung, die keine signifikanten Unterschiede zu anderen getesteten Materialien aufwiesen (Leal *et al*., 2011). Eine weitere Untersuchung zeigt weiterführende Erkenntnisse, hierbei zeigten ProRoot MTA und Portlandzement im Vergleich zu Biodentine sowie untereinander keine signifikanten Unterschiede (Amoroso-Silva *et al*., 2014). Die Studienlage für den Goldstandard AH Plus ist wesentlich ausgewogener, sowie zahlenmäßig größer. Es liegen zahlreiche Studien vor die AH Plus mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Materialien vergleichen. Das Präparat AH Plus zeigt hierbei eigentlich so gut wie in allen Studien eine Überlegenheit oder zumindest keine signifikant schlechteren Ergebnisse (Limkangwalmongkol *et al*., 1991; Barthel *et al*., 1999; De Almeida *et al*., 2000). Eine Übersichtsarbeit von 2005 betrachtet die Dichtigkeit von sieben Sealern unter Anwendung von drei Wurzelfülltechniken untereinander. Auch hierbei konnte AH Plus deutlich zeigen, dass es überlegene oder zumindest gleichwertige Ergebnisse in Bezug auf die untersuchten Penetrationstiefen erreichte (Schirrmeister und Kielbassa, 2005). Abschließend betrachtet, ordnen sich die Ergebnisse der vorliegenden Studie durchaus sinnvoll und der allgemein vorliegenden Studienlage entsprechend ein. Dieser Einschätzung folgend ist die Studienlage für Total Fill BC als fragwürdig zu beurteilen, da kaum vergleichbare Untersuchungen vorliegen. Eine der wenigen Nennenswerten ist beispielsweise eine Untersuchung aus dem Jahr 2014. Hierbei konnte das amerikanische Pendant Endosequence BC eine signifikante Überlegenheit zu AH Plus demonstrieren (Pawar *et al*., 2014). Jedoch ist festzuhalten, dass hierbei nicht der vom Hersteller postulierte Obturation Point verwendet wurde. Die abschließende Füllung wurde mit Guttapercha durchgeführt und ist daher schwer mit dem vorliegenden Material und Methoden Teil zu vergleichen. Das Ergebnis ist hierbei deutlich abweichend von dem der vorliegenden Studie und die Fallzahl der Gesamtstudien zu gering um eine wissenschaftlich fundierte Aussage treffen zu

können.

Die vorliegende Studie zeigt, dass die moderne Zahnerhaltung im Bereich der Endodontologie noch viel Forschungspotential besitzt. Es lassen sich zunächst diverse materialunabhängige Schlussfolgerungen formulieren. Zum einen zeigt sich, dass weder die Single Cone Technik noch die laterale Kompaktion einen hermetisch dichten Verschluss des Wurzelkanalsystemes erzielen kann. Zum anderen wird durch eine Betrachtung der Sealer deutlich, dass ebenfalls keiner der Sealer eine vollumfängliche Dichtigkeit garantieren kann. Zum Schluss wird zusätzlich deutlich, dass jede Gruppe mit zunehmender Studiendauer mit konstanter Steigung undichter wird. Diese Tatsachen und die damit verbundenen Rückschlüsse auf Erfolgsquoten in der Literatur, zeigen deutlich von welchen Problemen der endodontologische Erfolg auch in Zukunft abhängig ist. Die Dichtigkeit, als zentraler Punkt einer abgeschlossenen Wurzelkanalbehandlung, wird auch weiterhin nur durch weiterführende Forschung verbessert werden können.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse in Bezug auf die formulierte Studienhypothese, ob die Mineral Trioxide Aggregat Präparate sowie Total Fill BC sich gegenüber dem Goldstandard AH Plus gleichwertige Dichtigkeiten aufweisen, eine klare Tendenz.

Der neu entwickelte Sealer Total Fill BC unter Verwendung der Single Cone Technik schneidet signifikant schlechter ab als der Goldstandard. Ungeachtet möglicher Erklärungen der schlechten Ergebnisse mittels der Obturationsmethode, ist eine Verwendung zumindest mit der Single Cone Technik nach vorliegenden Ergebnissen nicht empfehlenswert. Eine Verwendung mit anderen Obturationsmethoden sollte durch folgende Studien überprüft und weitere Empfehlungen für den Gebrauch dieses Materials überdacht werden.

Die beiden Präparate MedCem MTA und ProRoot MTA haben die formulierten Studienziele erreicht. Beide Materialien sind in Bezug auf ihre Dichtigkeit absolut zu empfehlen. Sie zeigten, dass keine signifikanten Dichtigkeitsunterschiede im Vergleich zum geltenden Goldstandard AH Plus zu beobachten waren. Eine Indikationserweiterung dieser Materialien ist zum jetzigen Stand der Forschung dennoch nicht vollumfänglich auszusprechen. Sie erfüllen zwar in Punkto Dichtigkeit die Mindestanforderungen, nicht schlechter gegenüber AH Plus zu sein. Jedoch spielen die früher formulierten Kriterien und offenen Fragen, wie zum Beispiel die Applikationsmethode oder eine Überlebensrate des Materials nach mechanischer Belastung, eine entscheidende Rolle. Anhand dieser Daten sollte die Aufmerksamkeit der Forschung auf den Einsatz von Portlandzementderivaten als Sealer gelenkt werden, so dass weiterführende Studien angefertigt werden und eine Indikationserweiterung in Betracht gezogen werden kann.

Abschließend ist festzuhalten, dass beide Mineral Trioxide Aggregate die Studienhypothese vollumfänglich erfüllt haben. Sie haben gezeigt das im Bereich der Dichtigkeit keine signifikanten Nachteile gegenüber AH Plus bestehen. Die zweite formulierte Studienhypothese, welche die Qualität der Dichtigkeit von Total Fill BC im Vergleich zu AH Plus bewertet, muss aufgrund signifikant schlechterer Ergebnisse abgelehnt werden.

# 6 Zusammenfassung

Durch die Betrachtung der Abrechnungszahlen der Kassenzahnärztlichen Bundesvereinigung wird ersichtlich das jährlich über 7 Millionen Wurzelkanalbehandlungen durchgeführt werden. Laut zahlreichen Studien liegt die Erfolgsquote und damit die Langzeitprognose bei Zähnen mit apikaler Parodontitis bei lediglich 68-86%. Hierbei stellt die eigentliche Obturation, nach erfolgter chemo-mechanischer Aufbereitung, einen zentralen Faktor für den Therapieerfolg dar. Diese Füllung soll unter Einsatz von Guttapercha und Sealer einen dauerhaften bakterien- sowie flüssigkeitsdichten Verschluss darrstellen.

Aufgrund stetiger Neu- und Weiterentwicklungen von Sealer Präparaten wird ein hohes wissenschaftliches Interesse sichtbar, eben diese Präparate auf klinische Erfolge hin zu überprüfen. Ebenso ist eine zentrale Frage, ob die Indikationsbereiche der in der Traumatologie breit sowie erfolgreich angewendeten Mineral Trioxide Aggregate ebenso für die Endodontologie erweitert werden können.

Die Materialien AH Plus, MedCem MTA, ProRoot MTA und Total Fill BC wurden in dieser experimentellen Studie untereinander verglichen. Zunächst wurden im Rahmen einiger Vorversuche die Portlandzemente auf eine vergleichbare Konsistenz hin untersucht und ein neues Mischungsverhältnis bestimmt. Weiterhin wurden alle Präparate auf ihre Löslichkeit und ihre Reaktionsfähigkeit hin untersucht. Für die Dichtigkeitsstudie wurden 80 nicht endodontische vorbehandelte extrahierte einwurzelige Frontzähne in vier Gruppen (n = 20) eingeteilt. Die Versuchszähne wurden auf eine einheitliche Länge von 15 mm Restwurzellänge gekürzt und maschinell mittels dem Mtwo Nickel-Titansystem bis ISO 40 Taper 04 aufbereitet. Die chemische Aufbereitung erfolgte unter Verwendung von Natriumhypochlorit 3% und Ethylendiamintetraessigsäure 17%. Zum Abschluss wurden die Versuchszähne mit Papierspitzen getrocknet und entsprechend ihrer Gruppenzugehörigkeit mit dem entsprechenden Präparat und Guttapercha oder Präparat und mitgelieferten Points (Total Fill BC Obturation Kit) obturiert. Im Anschluss wurden die Zähne bei 37° C und 100% Luftfeuchtigkeit inkubiert. Unter Verwendung einer etablierten Glucose-Penetrationsmethode und einer später angefertigten quantitativen Glucose Bestimmung wurden die Präparate auf ihre Dichtigkeit hin *in vitro* untersucht.

Das für die Vergleichbarkeit entscheidende neu bestimmte Anmischungsverhältnis der beiden Mineral Trioxide Aggregate ergab ein Verhältnis von 0,32 g Wasser auf 0,5 g Zementpulver für ProRoot MTA und 0,22 g Wasser auf 0,35 g Zementpulver für MedCem MTA. Die Ergebnisse der Vorversuche in Bezug auf Löslichkeit mit Wasser und Reaktionsfähigkeit von Präparat und Glucose zeigten sehr ähnliche Ergebnisse. Alle untersuchten Materialien zeigten praktisch keine

Löslichkeit in bidestilliertem Wasser sowohl als auch eine fehlende Reaktionsfähigkeit mit Glucose.

Die Untersuchung in Bezug auf die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung zeigten teilweise signifikante Unterschiede. Es zeigte sich, dass das Material Total Fill BC im Vergleich zu AH Plus ($p = 0,010$) und Pro Root MTA ($p = 0,025$) eine signifikant schlechtere Dichtigkeit aufwies und damit eine experimentelle Unterlegenheit. Im Vergleich zu MedCem MTA waren keine Signifikanzen feststellbar, was keine möglichen Prävalenzen für eins der beiden Präparate bedeutete. In der weiteren Untersuchung der Gruppen untereinander ließen sich ebenso keine Signifikanzen in Bezug auf eine erhöhte oder verminderte Dichtigkeit festhalten.

Als Ergebnis lässt sich feststellen das in Bezug auf die Dichtigkeit Total Fill BC den anderen Materialien signifikant unterlegen ist. Gleichzeitig weisen AH Plus, MedCem MTA und ProRoot MTA jedoch untereinander keine Unterschiede auf.

Die verwendeten Methoden sowie die stetige Standardisierung der einzelnen Studienabläufe liefern durchaus eindeutige und berücksichtigungsfähige Aussagen zur Dichtigkeit der untersuchten Präparate. Auch in dieser Studie konnte die Glukosepenetrationsmethode als ein sehr zuverlässiges System herausgestellt werden. Betrachtet man nun letztendlich die Gesamtheit der vorliegenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen, so wird ersichtlich das kein Sealer und keine Obturationsmethode eine absolut hermetische Dichtung des Wurzelkanalsystems erbringen kann. Weiterhin wird deutlich, dass alle Studiengruppen mit zunehmender Dauer der Penetration undichter werden.

Der Sealer Total Fill BC schneidet hierbei als einziges Material signifikant schlechter ab. Mögliche Erklärungen werden hierbei in der Verwendung der Single Cone Technik angenommen. Den Einsatz in der klinischen Behandlung ist zumindest mit dieser Methode nicht empfehlenswert. Weitere Studien unter Verwendung anderer Obturationsmethoden könnten jedoch neue erfolgversprechendere Erkenntnisse liefern.

Die beiden Mineral Trioxide Aggregate in Verwendung als Sealer sind nach vorliegen dieser Studie als positiv zu bewerten. Beide haben die gesteckten Studienziele erfüllt und zeigen somit einen möglicherweise neuen Trend in der Endodontologie auf. Jedoch sollten weitere Aspekte und Fragestellungen für den klinischen Einsatz durch wissenschaftliche Untersuchungen zunächst untersucht werden.

# 7 Literaturverzeichnis


Ahlberg KM, Assavanop P, Tay WM. A comparison of the apical dye penetration patterns shown by methylene blue and india ink in root-filled teeth. Int Endod J, **1995**; 28: 30 – 34.

Ahlquist M, Henningsson O, Hultenby K, Ohlin J. The effectiveness of manual and rotary techniques in the cleaning of root canals: a scanning electron microscopy study. Int Endod J, **2001**; 34: 533-7.

Al-Dewani N, Hayes SJ, Dummer MH. Comparison of laterally condensed and low-temperature thermoplasticized gutta-percha root fillings. J Endod, **2000**; 26: 733-738.

Al-Khatar N, Kunzelmann K-H, Hickel R. Dichtigkeit und Wandständigkeit verschiedener endodontischer Sealer in schmierschichtfreien Wurzelkanälen. Dtsch Zahnärztl Z, **1999**; 54: 479-483.

Alves RA, Souza JB, Alencar AH, Pecora JD, Estrela C. Detection of Procedural Errors with Stainless Steel and NiTi Instruments by Undergraduate Students Using Conventional Radiograph and Cone Beam Computed Tomography. Iranian Endod J, **2013**; 8(4): 160-165.

Amoroso-Silva PA, Marciano MA, Guimarães BM, Duarte MA, Sanson AF, de Moraes IG. Apical adaptation, sealing ability and push-out bond strength of five root-end filling materials. Braz Oral Res, **2014**; 28(1): 1-6.

Andersen M, Lund A, Andersen JO, Andersen FM. In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochlorite. Endod Dent Traumatol, **1992**; 8: 104-108.

Bardow A, Moe D, Nyvad B, Nauntofte B. The buffer capacity and buffer systems of human whole saliva measured without loss of CO2. Arch Oral Biol, **2000**; 45: 1-12.

Barthel C, Flachsenberg S, Georgi M, Petschelt A, Schäfer E, Neuber T, Kockapan C, Weiger R, Hülsmann M. Wurzelkanalspülung. Stellungnahme der DGZMK. Dtsch Zahnärztl Z, **2006**; 10.

Barthel CR, Lösche GM, Zimmer S, Roulet JF. Dye penetration in root canals filled with AH26 in different consistencies. J Endod, **1994**; 20: 436-9.

Barthel CR, Moshonov J, Shuping G, Orstavik D. Bacterial leakage versus dye leakage in obturated root canals. Int Endod J, **1999**; 32: 370-375.

Baumann MA. Nickel-titanium: options and challenges. Dent Clin North Am, **2004**; 48: 55-67.

Baumgartner G, Zehnder M, Paque F. Enterococcus faecalis type strain leakage through root canals filled with Gutta-Percha/AH plus or Resilon/Epiphany. J Endod, **2007**; 33: 45-7.

Baumgartner JC, Brown CM, Mader CL, Peters DD, Shulman JD. A scanning electron microscopic evaluation of root canal debridement using saline, sodium hypochlorite, and citric acid. J Endod, **1984**; 10: 525-531.

Beatty RG, Vertucci FJ, Zakariasen KL. Apical sealing efficacy of endodontic obturation techniques. Int Endod J, **1986**; 19: 237–241.

Behrends JC, Bischofberger J, Deutzmann R, Ehmke H, Frings S, Grissmer S, Hoth M, Kurtz A, Leipziger J, Müller F, Pedain C, Rettig J, Wagner C, Wischmeyer E. Duale Reihe Physiologie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, **2010**; 193-222.

Bergenholtz G. Effect of bacterial products on inflammatory reactions in the dental pulp. Scand J Dent Res, **1977**; 85(2): 122-129.

Bertolini DR, Nedwin GE, Bringman TS, Smith DD, Mundy GR (1986). Stimulation of bone resorption and inhibition of bone formation in vitro by human tumour necrosis factors. Nature 319, **1986**; (6053): 516-518.

Bishop ML, Duben-Engelkirk JL, Fody EP. Clinical chemistry principle, procedures, correlations. Lippincott Company, **1985**; 2nd edition Philadelphia: 307-9.

Brown RC, Jackson CR, Skidmore AE. An evaluation of apical leakage of a glass ionomer root canal sealer. J Endod, **1994**; 20: 288-291.

Buchanan LS. Filling root canal systems with centered condensation: concepts, instru- ments and techniques. Dentistry Today, **2004**; 23:102-106.

Buchanan LS. The continuous wave of condensation technique: a convergence of con- ceptual and procedural advances in obturation. Dentistry Today, **1994**; 13: 80-85.

Buchanan LS. The continuous wave of obturation technique: "centered" condensation of warm gutta-percha in 12 seconds. Dentistry Today, **1996**; 15: 60-67.

Burleson A, Nusstein J. The in vivo evaluation of hand/rotary/ultrasound instrumentation in necrotic, human mandibular molars. J Endod, **2007**; 33: 782-787.

Bystrom A, Sundqvist G. Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy. Scand J Dent Res, **1981**; 89(4): 321-328.

Camilleri J, Pitt Ford TR. Mineral trioxide agregate: a review of the constituents and biological properties of the material. Int Endod J, **2006**; 39: 747-754.

Camilleri J. Hydration mechanisms of mineral trioxide aggregate. Int Endod J, **2007**; 40: 462-470.

Chu CH, Lo EC, Cheung GS. Outcome of root canal treatment using Thermafil and cold lateral condensation filling techniques. Int Endod J, **2005**; 38: 179-85.

Clark DS, El Deeb ME. Apical sealing ability of metal versus plastic carrier Thermafil obturators. J Endod, **1993**; 19: 4-9.

Clarkson RM, Podlich HM, Savage NW, Moule AJ. A survey of sodium hypochlorite use by general dental practitioners and Endodontists in Australia. Aust Dent J, **2003**; 48: 20-26.

Cobankara FK, Adanr N, Belli S. Evaluation of the influence of smear layer on the apical and coronal seal- ing ability of two sealers. J Endod, **2004**; 30: 406-9.

Dalton BC, Ørstavik D, Phillips C, Pettiette M, Trope M. Bacterial reduction with nickel-titanium rotary instrumentation. J Endod, **1998**; 24(11): 763-767.

Dammaschke T. Natriumhypochlorit - eine Übersicht. Endodontie, **1999**; 1: 9-19.

De Almeida WA, Leonardo MR, Tanomaru Filho M, Silva LA. Evaluation of apical sealing of three endodontic sealers. Int Endod J, **2000**; 33: 25-27.

De Moor RJ, Hommez GM, Martens LC, De Boever JG. Accuracy of four apex locators: an in vitro evaluation. Endod Dent Traumatol, **1999**; 15: 77-82.

De-Deus G, Brandao MC, Fidel RAS, Fidel R. The sealing ability of GuttaFlow in oval-shaped canals: an ex vivo study using a polymicrobial leakage model. Int Endod J, **2007**; 40: 794-799.

De-Deus G, Gurgel-Filho ED, Magalhaes KM, Coutinho-Filho TA. Laboratory analysis of gutta-percha-filled area obtained using Thermafil, System B and lateral condensation. Int Endod J, **2006**; 39: 378-83.

Di Lenarda R, Cadenaro M, Sbaizero O. Effectiveness of 1 mol L-1 citric acid and 15% EDTA irrigation on smear layer removal. Int Endod J, **2000**; 33(1): 46-52.

Douglas WH, Zakariasen KL. Volumetric assessment of apical leakage utilizing a spectrophotometric, dye recovery method. J Dent Res, **1981**; 60: 438: Abstr. 512.

Duarte MA, Demarchi AC, Yamashita JC, Kuga MC, Fraga Sde C. pH and calcium ion release of 2 root-end filling materials. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2003**; 95: 345-347.

DuLac KA, Nielsen CJ, Tomazic TJ, Ferrillo PJ Jr, Hatton JF. Comparison of the obturation of lateral canals by six techniques. J Endod, **1999**; 25: 376-380.

Elayouti A, Achleithner C, Lost C, Weiger R. Homogeneity and adaptation of a new gutta-percha paste to root canal walls. J Endod, **2005**; 31: 687-690.

Eriksen HM, Orstavik D, Pitt Ford TR. Epidemiology of apical periodontitis. Essential Endodontology, **1998**; 179-191.

Eser A, Vogelsang H. Osteoporose im Kontext gastroenterologischer Erkrankungen. Journal für Mineralstoffwechsel & Muskuloskelettale Erkrankungen, **2008**; 15(1): 14-21.

Estrela C, Estrada-Bernabé PF, de Almeida-Decurcio D, Almeida-Silva J, Rodrigues-Araújo-Estrela C, Poli-Figueiredo JA. Microbial leakage of MTA, Portland cement, Sealapex and zinc oxide-eugenol as root-end filling materials. Med Oral Patol Oral Cir Bucal, **2011**; 16: e418-424.

Europäische Gesellschaft für Endodontologie. Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung.

Endodontie, **2006**; 15: 387-401.

Fabricius L, Dahlén G, Holm SE, Möller AJ. Influence of combinations of oral bacteria on periapical tissues of monkeys. Scand J Dent Res, **1982**; 90(3): 200-206.

Gencoglu N, Garip Y, Bas M, Samani S. Comparison of different guttapercha root filling techniques: Thermafil, Quick-fill, System B and lateral condensation. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2002**; 93: 333-336.

Gettleman BH, Messer HH, ElDeeb ME. Adhesion of sealer cements to dentin with and without the smear layer. J Endod, **1991**; 17: 15-20.

Ghoddusi J, Rohani A, Rashed T, Ghaziani P, Akbari M. An evaluation of microbial leakage after using MTAD as a final irrigation. J Endod, **2007**; 33: 173-6.

Gilhooly RM, Hayes SJ, Bryant ST, Dummer PM. Comparison of cold lateral condensation and a warm multiphase guttapercha technique for obturating curved root canals. Int Endod J, **2000**; 33: 415–420.

Gluskin AH, Brown DC, Buchanan LS. A reconstructed computerized tomographic comparison of Ni-Ti rotary GT files versus traditional instruments in canals shaped by novice operators. Int Endod J, **2001**; 34: 476-84.

Gorduysus M, Avcu N, Gorduysus O, Pekel A, Baran Y, Avcu F, Ural AU. Cytotoxic effects of four different endodontic materials in human periodontal ligament fibroblasts. J Endod, **2007**; 33: 1450-1454.

Grade AC. Eugenol in Wurzelkanalzementen als mögliche Ursache für eine Urtikaria. Endodontie **1995**;102: 9-11.

Grazziotin-Soares R, Nekoofar MH, Davis TE et al. Effect of bismuth oxide on white mineral trioxide aggregate: chemical characterization and physical properties. Int Endod J, **2014**; 47: 520-533.

Gutarts R, Nusstein J, Reader A, Beck M. In vivo debridement effeicacy of ultrasonic irrigation following hand-rotary instrumentation in human mandibular molars. J Endod, **2005**; 31: 166-170.

Gyorfi A, Fazekas A. Problems with working length determination during endodontic therapy. Fogory SZ, **2006**; 99: 153-9.

Haffner C, Folwaczny M, Galler K, Hickel R. Accuracy of electronic apex locators in comparison to actual length – an in vitro study. J Dent, **2005**; 33: 619-25.

Haikel Y, Freymann M, Fanti V, Claisse A, Poumier F, Watson M. Apical microleakage of radiolabeled lysozyme over time in three tech- niques of foot canal obturation. J Endod, **2000**; 26: 148-152.

Hatton JF, Ferrillo PJ, Wagner G, Stewart GP. The effect of condensation pressure on the apical

seal. J Endod, **1988**; 14: 305.

Heidemann D. Die Wurzelfüllung - manuell- maschinell. Dtsch Zahnärztl Z, **1989**; 44: 414.

Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 4. Auflage, Elsevier Urban und Fischer, München, **2007**, 303-344.

Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 6. Auflage, Elsevier Urban und Fischer, München, **2013**, 424-425.

Herrera DR, Santos ZT, Tay LY, Silva EJ, Loguercio AD, Gomes BP. Efficacy of different final irrigant activation protocols on smear layer removal by EDTA and citric acid. Microsc Res Tech, **2013**; 76(4): 364-369.

Huang FM, Tai KW, Chou MY, Chang YC. 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: 153-158.

Hülsmann M, Heckendorff M, Schafers F. Comparative in - vitro evaluation of three chelator pastes: Int Endod J, **2002**; 35: 668-679.

Inan U, Gonulol N. Deformation and fracture of Mtwo rotary nickel-titanium instruments after clinical use. J Endod, **2009**; 35: 1396-1399.

Jakobson J, Xia T, Baumgartner C, Marshall JG, Beeler WJ. Microbial Leakage of the Continuous Wave of Condensation. J Endod, **2002**; 28: 269-71.

Joyce AP, Loushine RJ, West LA, Runyan DA, Cameron SM. Photoelastic comparison of stress induced by using stainless-steel versus nickel-titanium spreaders in vitro. J Endod, **1998**; 24: 714-5.

Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ. The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, **1965**; 20(3): 340-349.

Karagöz-Kücükay I, Bayirli G. An apical leakage study in the presence and absence of the smear layer. Int Endod J, **1994**; 27: 87-93.

Kassenzahnärztliche Bundeskassenvereinigung: http://www.kzbv.de/seiten-92-bis-95-aus-kzbv-jahrbuch-2016.download.30d8c8b3e5003bc73ddfd2246b15f060.pdf, http://www.kzbv.de/jahrbuch-2016.768.de.html (S. 92) **26.05.2017** um 16:47

Kaya BU, Kececi AD, Belli S. Evaluation of the sealing ability of guttapercha and thermoplastic synthetic polymer-based systems along the root canals through the glucose penetration model. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2007**; 104: 66-73.

Kazemi RB, Stenman E, Spangberg LS. A comparison of stainless steel and nickel - titanium H - type instruments of identical design: torsional and bending tests. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2000**; 90: 500-506.

Kececi AD, Unal GC, Sen BH. Comparison of cold lateral compaction and continuous wave of

obturation techniques following manual or rotary instrumentation. Int Endod J, **2005**; 38: 381-388.

Kennedy WA, Walker WA, Gough RW. Smear layer removal effects on apical leakage. J Endod, **1987**; 12: 21-27.

Keyes PH. Research in dental caries. J Am Dent Assoc, **1968**; 76(6): 1357-73.

Keyes PH. The infectious and transmissible nature of experimental dental caries. Findings and implications. Arch Oral Biol, **1960**; 1: 304-20.

Khademi AA, Feizianfard M. The effect of EDTA and citric acid on smear layer removal of mesial canals of first mandibular molars, a scanning electron microscopic study. Journal of Research in Medical Sciences, **2004**; 2: 27-35.

Kist S, Kollmuss M, Jung J, Schubert S, Hickel R, Huth KC. Comparison of ozone gas and sodium hypochlorite/chlorhexidine two-visit disinfection protocols in treating apical periodontitis: a rondomized controlled clinical trial. Clin Oral Investig, **2016**; 4: 995-1005.

Klein DC, Raisz LG. Prostaglandins: stimulation of bone resorption in tissue culture. Endocrinology, **1970**; 86(6): 1436-1440.

Kollmuss M, Preis CE, Kist S, Hickel R, Huth KC. Differences in physical characteristics and sealing ability of three tricalcium silicate-based cements used as root-end-filling materials. Am J Dent, 2017; in press.

Kong YY, Feige U, Sarosi I, Bolon B, Tafuri A, Morony S, Capparelli C, Li J, Elliott R, McCabe S, Wong T, Campagnuolo G, Moran E, Bogoch ER, Van G, Nguyen LT, Ohashi PS, Lacey DL, Fish E, Boyle WJ, Penninger JM. Activated T cells regulate bone loss and joint destruction in adjuvant arthritis through osteoprotegerin ligand. Nature 402, **1999**; (6759): 304-309.

Kuttler Y. Analysis and comparison of root canal filling techniques. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, **1979**; 48: 153-159.

Kvist T, Molander A, Dahlén G, Reit C. Microbiological evaluation of one- and two-visit endodontic treatment of teeth with apical periodontitis: a randomized, clinical trial. J Endod, **2004**; 30(8): 572-576.

Kytridou V, Gutmann JL, Nunn MH. Adaptation and sealability of two contemporary obturation techniques in the absence of the dentinal smear layer. Int Endod J, **1999**; 32: 464-74.

Lacey DL, Timms E, Tan HL, Kelley MJ, Dunstan CR, Burgess T, Elliott R, Colombero A, Elliott G, Scully S, Hsu H, Sullivan J, Hawkins N, Davy E, Capparelli C, Eli A, Qian YX, Kaufman S, Sarosi I, Shalhoub V, Senaldi G, Guo J, Delaney J, Boyle WJ. Osteoprotegerin Ligand Is a Cytokine that Regulates Osteoclast Differentiation and Activation. Cell, **1988**; 93(2): 165-176.

Langeland K, Rodrigues H, Dowden W. Periodontal disease, bacteria, and pulpal histopathology. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, **1974**; 37(2): 257-270.

Lares C, ElDeeb ME. The sealing ability of the Thermafil obturation technique. J Endod, **1990**; 16: 474-479.

Leal F, De-Deus G, Brandão C, Luna AS, Fidel SR, Souza EM. Comparison of the root-end seal provided by bioceramic repair cements and White MTA. Int Endod J, **2011**; 44: 662-668.

Lee BS, Hsieh TT, Chi DC, Lan WH, Lin CP. The role of organic tissue on the punch shear strength of human dentin. J Dent, **2004**; 32: 101-107.

Lee K, Williams M, Camps J, Pashley D. Adhesion of Endodontic Sealers to Dentin and Gutta-Percha. J Endod, **2002**; 28: 684-8.

Leonardo MR, Bezerra da Silva LA, Almeida WA, Utrilla LS. Tissue response to an epoxy resin-based root canal sealer. Endod Dent Traumatol, **1999**; 15: 28-32.

Leonardo MR, Bezerra da Silva LA, Filho MT, Santana da Silva R. Release of formaldehyde by 4 endodontic sealers. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **1999**; 88: 221-225.

Lertchirakarn V, Palmara JE, Messer HH. Load and strain during lateral condensation and vertical root fracture. J Endod, **1999**; 25: 99-104.

Lertchirakarn V, Timyam A, Messer HH. Effects of root canal sealers on vertical root fracture resistance of endodontically treated teeth. J Endod, **2002**; 28: 217-219.

Limkangwalmongkol S, Burtscher P, Abbott PV, Sandler AB, Bishop BM. A comparative study of the apical leakage of four root canal sealers and laterally condensed guttapercha. J Endod, **1991**; 17: 495-499.

Love RM. Bacterial penetration of the root canal of intact incisor teeth after a simulated traumatic injury. Endod Dent Traumatol, **1996**; 12(6): 289-293.

Madison S, Krell KV. Comparison of ethylenediamine tetraacetic acid and sodium hypochlorite on the apical seal of endodontically treated teeth. J Endod, **1984**; 10: 499–503.

Matloff IR, Jensen JR, Singer L, Tabibi A. A comparison of methods used in root canal sealability studies. Oral Surg Oral Med Pathol, **1982**; 53: 203-208.

McComb D, Smith DC. Apreliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. J Endod, **1975**; 1: 238-242.

McMichen FRS, Pearson G, Rahbaran S, Gulabivala K. A comparative study of selected physical properties of five root-canal sealers. Int Endod J, **2003**; 36: 629-635.

Micheelis W, Schiffner U. Vierte Deutsche Mundgesundheitstudie (DMS IV). Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV GmbH, **2006**.

Miller WD. Die Mikroorganismen der Mundhöhle. Thieme, Leipzig, **1899**.

Monticelli F, Sadek FT, Schuster GS, Volkmann KR, Looney SW, Ferrari M, Toledano M, Pashley DH, Tay FR Efficacy of two contemporary single-cone filling techniques in preventing bacterial

leakage. J Endod, **2007**; 33: 310-3.

Mounce RE. The K3 rotary nickel - titanium file system. Dent Clin North Am, **2004**; 48: 137-157.

Mutal L, Gani O. Presence of pores and vacuoles in set endodontic sealers. Int Endod J, **2005**; 38: 690-6.

Naenni N, Thoma K, Zehnder M. Soft Tissue Dissolution Capacity of Currently Used and Potential Endodontic Irrigants. J Endod, **2004**; 30(11): 785-787.

Nguyen L, Dewhirst FE, Hauschka PV, Stashenko P. Interleukin-1 beta stimulates bone resorption and inhibits bone formation in vivo. Lymphokine Cytokine Res, **1991**; 10(1-2): 15-21.

Nygaard–Ostby BN. Chelation in Root Canal Therapy. Odontol Tidskr, **1957**; 65: 3-11.

Oddoni PG, Mello I, Coil JM, Antoniazzi JH. Coronal and apical leakage analysis of two different root canal obturation systems. Braz Oral Res, **2008**; 22: 211-215.

Okino LA, Siqueira EL, Santos M, Bombana AC, Figueiredo JA. Dissolution of pulp tissue by aqueous solution of chlorhexidine digluconate and chlorhexidine digluconate gel. Int Endod J, **2004**; 37: 38-41.

Orland FJ, Blayney JR, Harrison RW, Reyniers JA, Trexler PC, Wagner M, Gordon HA, Luckey TD. Experimental caries in germfree rats inoculated with enterococci. J Am Dent Assoc, **1955**; 50: 259-272.

Orland FJ, Blayney JR, Harrison RW, Reyniers JA, Trexler PC, Wagner M, Gordon HA, Luckey TD. Use of the germfree animal technic in the study of experimental dental caries. I. Basic observations on rats reared free of all microorganisms. J Dent Res, **1954**; 33(2):147-74.

Ørstavik D, Haapasalo M. Disinfection by endodontic irrigants and dressings of experimentally infected dentinal tubules. Endod Dent Traumatol, **1990**; 6(4): 142- 149.

Paranjpe A, Zhang H, Johnson JD. Effects of mineral trioxide aggregate an human dental pulp cells after pulp capping procedures. J Endod, **2010**; 36: 1042-1047.

Pawar S, Pujar M, Makandar S. Evaluaton of the apical sealing ability of bioceramic sealer, AH Plus & epiphany: An in vitro study. J Conserv Dent **2014**; 17: 579-82.

Petschelt A, Oberschachtsiek H. Wandständigkeit verschiedener Wurzelfüllmaterialien bei Zentralstifttechnik (REM-Untersuchung). Dtsch Zahnärztl Z, **1985**; 40: 308.

Pissiotis E, Spångberg LS. Dentin permeability to bacterial proteins in vitro. J Endod, **1994**; 20(3): 118-122.

Pitt Ford T. Endodontics. Martin Dunitz Ltd, **2002**.

Pommel L, Camps J. In vitro apical leakage of system B compared with other filling techniques. J Endod, **2001**; 27: 449-51.

Pratten DH, McDonald NJ. Comparison of radiographic and electronic working length. J Endod, **1996**; 22: 173–176.

Ray HA, 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: 12-18.

Reeves R, Stanley HR. The relationship of bacterial penetration and pulpal pathosis in carious teeth. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, **1966**; 22(1): 59-65.

Ricucci D, Russo J, Rutberg M, Burleson JA, Spångberg LS. A prospective cohort study of endodontic treatments of 1,369 root canals: results after 5 years. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2011**; 112(6): 825-842.

Ricucci D. Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 1. Literature review. Int Endod J, **1998**; 31: 384-93.

Roberts HW, Toth JM, Berzins DW, Charlton DG. Mineral trioxide aggregate material use in endodontic treatment: A review of the literature. Dental Materials, **2008**; 24: 149-164.

Rödig T, Attin T, Hülsmann M. Die Wurzelkanalsealer AH26, AH Plus und Roekoseal – Eine Literaturübersicht. Endodontie, **2005**a; 14: 153.

Rohde TR, Bramwell JD, Hutter JW, Roahen JO. An in vitro evaluation of microleakage of a new root canal sealer. J Endod, **1996**; 22: 365-368.

Said HM, Bakar WZ, Farea M, Husein A. The effect of different sealer placement techniques on sealing ability: An in vitro study. J Conserv Dent, **2012**; 15: 257-260.

Saidon J, He J, Zhu Q, Safavi K, Spångberg LS. Cell and tissue reactions to mineral trioxide aggregate and Portland cement. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2003**; 95: 483-489.

Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo M, Orstavik D. Bacterial penetration along different root canal filling materials in the presence or absence of smear layer. Int Endod J, **2008**; 41: 32-40.

Sattapan B, Palamara JE, Messer HH. Torque during canal instrumenttation using rotary nickel-titanium files. J Endod, **2000**; 26:156-160.

Schäfer E, Erler M, Dammaschke T. Comparative Study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved canals of extracted teeth. Int Endod J, **2006**; 39: 203-212.

Schäfer E, Zandbigari T. Solubility of root canal sealers in water and artificial saliva. Int Endod J, **2003**; 36: 660-9.

Schäfer E, Zandbiglari T, Schafer J. Influence of resin-based adhesive root canal fillings on the

resistance to fracture of endodontically treated roots: an in vitro prelimary study. Oral Surg Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2007**; 103: 274-9.

Scheerer SQ, Steiman HR, Cohen J. A comparative evaluation of three root-end filling materials: an in vitro leakage study using Prevotella nigrescens. J Endod, **2001**; 27: 40-42.

Scheinin A, Mäkinen KK, Ylitalo K. Turku sugar studies V. Final report on the effect of sucrose, fructose and xylitol diets on the caries incidence in man. Acta Odontol Scand, **1975**; 33 : 67-104.

Scheinin A, Mäkinen KK. Turku sugar studies I - XXI. Acta Odontol Scand, **1975**; 33: 5-349.

Schilder H. Filling Root Canals in Three Dimension. Dent Clin N Am, **1967**; 11: 723-744.

Schirrmeister JF, Kielbassa AM. Apikale Dichtigkeit von Wurzelkanalsealern auf Calciumphosphat-Basis im Vergleich zu marktüblichen Füllpasten. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, **2005**; 60: 446-456.

Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, **1971**; 32: 271-275.

Seltzer S. Endodontology, Biologic Considerations in Endodontic Procedures. Lea & Febiger Verlag, 2nd edition, Philadelphia, **1988**.

Sen BH, Wesselink BH, Türkün M. The smear layer: a phenomenon in root canal therapy. Int Endod J, **1995**; 28: 141-148.

Sevimay S, Kalayci A. Evaluation of apical sealing ability and adaptation to dentine of two resin-based sealers. J Oral Rehabil, **2005**; 32: 105-110.

Sharavan A, Haghdoost AA, Adl A, Rahimi H, Shadifar F. Effect of smear layer on sealing ability of canal obturation: a systematic review and meta-analysis. J Endod, **2007**; 33: 96-105.

Shemesh H, van den Bos M, Wu MK, Wesselink PR. Glucose penetration and fluid transport through coronal root structure and filled root canals. Int Endod J, **2007**; 40: 866-872.

Shipper G, Ørstavik D, Teixeira FB, Trope M. An evaluation of microbial leakage in roots filled with a thermoplastic synthetic polymer-based root canal filling material (Resilon). J Endod, **2004**; 30: 342-347.

Shuping GB, Ørstavik D, Sigurdsson A, Trope M. Reduction of intracanal bacteria using nickel-titanium rotary instrumentation and various medications. J Endod, **2000**; 26(12): 751-755.

Siqueira JF Jr, Rôças IN, Favieri A, Lima KC. Chemomechanical reduction of the bacterial population in the root canal after instrumentation and irrigation with 1%, 2.5%, and 5.25% sodium hypochlorite. J Endod, **2000**; 26: 331-334.

Siqueira JF Jr. Treatment of endodontic infections. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, **2011**a; 9-16.

Siqueira JF Jr. Treatment of endodontic infections. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, **2011**b; 43-62.

Siqueira JF Jr. Treatment of endodontic infections. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, **2011**c; 65-92.

Siqueira JF Jr. Treatment of endodontic infections. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, **2011**d; 19-39.

Siqueira JF Jr., Lima KC, Magalhaes FA, Lopes HP, de Uzeda M. Mechanical reduction of the bacterial population in the root canal by three instrumentation techniques. J Endod, **1999**; 25(5): 332-335.

Skinner R, Van Himmel T. The sealing ability of injection-molded thermoplasticized guttapercha with and without the use of sealers. J Endod, **1987**; 13: 315-7.

Spangberg LSW, Barbosa SV, Lavigne GD. AH26 releases formaldehyd. J Endodont, **1993**; 19: 596-8.

Srinivasan V, Waterhouse P, Withworth J. Mineral trioxide aggregate in paediatric dentistry. Int J Paed Dent, **2009**; 19: 34-47.

Steffen R, van Waes. Understanding mineral trioxide aggregate/Portland cement: A review of literature and background factors. Eur Arch Paediatr Dent, **2009**; 10(2): 93-97.

Susini G, Pommel L, About I, Camps J: Lack of correlation between ex vivo apical dye penetration and presence of apical radiolucencies. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2006**; 102: 19-23.

Takeda FH, Harashima T, Kimura Y, Matsumoto K. A comparative study of the removal of smear layer by three endodontic irrigants and two types of laser. Int Endod J, **1999**; 32: 32-39.

Tay FR, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, Pashley DH, Mak YF, Lay CN, Raina R, Williams MC. Ultrastructural evaluation of the apical seal in roots filled with a polyprolac-tone-based root canal filling material. J Endod, **2005**; 31: 514-19.

Tay FR, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, Pashley DH, Mak Yiu- Fay, Lai Ching-Ngor S, Raina R, Williams MC. Effectiveness of resin-coated gutta-percha cones and a dual-curved hydrophilic methacrylate resin-based sealer in obturating root canals. J Endod, **2005**; 31: 659-664.

Tepel J. Experimentelle Untersuchung zur maschinellen Aufbereitung. Dtsch Zahnärztl Z, **1998**; 53: 101.

Torabinejad M, Cho Y, Khademi A, Bakland LK, Shabahang S. The Effect of various concentrations of sodium hypochlorite on the ability of MTAD to remove the smear layer. J Endod, **2003**; 29: 233-239.

Tronstad L, Barnett F, Flax M. Solubility and biocompatibility of calcium hydroxide-containing root canal sealers. Endod Dent Traumatol, **1988**; 4: 152-9.

Tronstad L. Clinical Endodontics. Stutgart, **2003**.

Trope M, Debelian G. Microbial control: the first stage of root canal treatment. Gen Dent, **2009**; 57(6): 580-588.

Van der Sluis LW, Shemesh H, Wu MK, Wesselink PR. An evaluation of the influence of passive ultrasonic irrigation on the seal of root canal fillings. Int Endod J, **2007**; 40: 356-61.

Van der Sluis LW, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR. Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. Int Endod J, **2007**; 40(6): 415- 426.

Verissimo DM, Sampaio do Vale M, Monteiro AJ. Comparison of Apical Leakage between Canals filled with Guttapercha/AH-Plus and the Resilon/Epiphany System, When submitted to Two filling Techniques. J Endod, **2007**; 33: 291-4.

Vianna ME, Horz HP, Gomes BP, Conrads G: In vivo evaluation of microbial reduction after chemo-mechanical preparation of human root canals containing necrotic pulp tissue. Int Endod J, **2006**; 39: 484–492.

von Fraunhofer JA, Fagundes DK, McDonald NJ, Dumsha TC. The effect of root canal preparation on microleakage within endodontically treated teeth: an in vitro study. Int Endod J, **2000**; 33: 355-60.

Weiger R, Heuchert T, Hahn R, Löst C. Adhesion of a glass ionomer cement to human radicular dentin. Endod Dent Traumatol, **1995**; 11: 214-9.

Weine FS. Endodontic therapy. Canal filling with semisolid materials. Mosby, 5th edition, St. Louis, 423-77, **1996**.

Weltgesundheitsorganisation (Fifth Edition 2016). URL: http://extranet.who.int/iris/restricted/bitstream/10665/246208/1/9789241549165-V1-eng.pdf,http://extranet.who.int/iris/restricted/handle/10665/246208 (S. 491- 492) Download **26.05.2017** um 16:34.

Wolf H, Baumann M, Beer R, Farbatlanten der Zahnmedizin Endodontologie, 2. Auflage, Thieme, Stuttgart, **2008**, S. 244

Wolf H, Baumann M, Beer R, Farbatlanten der Zahnmedizin Endodontologie, 2. Auflage, Thieme, Stuttgart, **2008**, Bild 537, S.244

Wu M.K, Wesselink PR. Endodontic leakage studies reconsidered. Part 1. Methodology, application and relevance. Int Endod J, **1993**; 26: 37-43.

Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR. Leakage of four root canal sealers at different thicknesses. Int Endod J, **1994**; 27: 304.

Wu MK, Kastakova A, Wesselink PR. Quality of cold and warm guttapercha fillings in oval canals in mandibular premolars. Int Endod J, **2001**; 34: 485–491.

Wu MK, Özok AR, Wesselink PR. Sealer distrubution in root canals obturated by three techniques. Int Endod, **2000**; 26: 340-345.

Wu MK, Tigos E, Wesselink PR. An 18-month longitudinal study on a new silicon-based sealer, RSA Roekoseal: a leakage study in vitro. Oral Surg oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2002**; 94: 499.

Wu MK. Oral Presentation Istanbul. European Society of Endodontology (ESE), **2007**.

Xu Q, Fan MW, Fan B, Cheung GSP, Hu HL. A new quantitativ method using glucose for analysis of endodontic leakage. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, **2005**; 99: 107-11.

Yared GM, Dagher FE, Machtou P, Kulkarni GK. Influence of rotational speed, torque and operator proficiency on failure of Greater Taper files. Int Endod J, **2002**; 35: 7-12.

Zidan O, Alkhatib Z, Gomez-Marin O. Obturation of root canals using the single cone guttapercha technique and dentinal bonding agents. Int Endod J, **1987**; 20: 128.

Zou L, Liu J, Yin SH, Tan J, Wang FH, Li W, Xue J. Effect of placement of calcium sulphate when used for the repair of furcation perforations on the seal produced by a resin-based material. Int Endod J, **2007**; 40: 100-5.

# 8 Abbildungsverzeichnis


| | |
|---|---|
| Abbildung 1 | Faktoren für die Entstehung einer Karies (Model nach König 1971) [S. 7] |
| Abbildung 2 | Remineralisationswirkung an der Zahnoberfläche (nach Zimmer 2000) [S. 8] |
| Abbildung 3 | Radiologischer Befund mit apikaler Aufhellungszone (mit freundlicher Genehmigung von Dr. S. Kist) [S.9] |
| Abbildung 4 | Mineralstoffwechsel des Knochens (nach Eser und Vogelsang 2008) [S. 12] |
| Abbildung 5 | Aufbau einer NiTi Feile / Querschnitt (VDW GmbH Datenblatt) [S. 14] |
| Abbildung 6 | Aufbau einer NiTi Feile / nicht schneidende Spitze (VDW GmbH Datenblatt) [S. 14] |
| Abbildung 7 | Biokompatibilität von Sealern (links: Epoxidharzbasis rechts: Zinkoxideugenolbasis) nach Wolf et al. 2008 [S.19] |
| Abbildung 8 | Sealer BC Total Fill (zwp-online) [S. 21] |
| Abbildung 9 | Flussdiagramm Studienverlauf [S. 26] |
| Abbildung 10 | Mischungsverhältnis MedCem MTA nach Herstellerangaben (links) und experimentell bestimmtes Anmischungsverhältnis (recht) [S. 27] |
| Abbildung 11 | Röntgenbilder zur Diagnose [S. 28] |
| Abbildung 12 | Röntgenbilder zur Diagnose [S. 28] |

Abbildung 13 Kontrollaufnahme (AH Plus, Total Fill BC, MedCem MTA, ProRoot MTA) [S. 33]

Abbildung 14 Übersicht des Versuchaufbaues (nach Xu et. al., January 2005) [S. 34]

Abbildung 15 Präpariertes Rollrandglas [S. 35]

Abbildung 16 Präpariertes Eppendorf Reaktionsgefäß [S. 35]

Abbildung 17 Präpariertes Eppendorf Reaktionsgefäß [S. 35]

Abbildung 18 Versuchszahn verklebt mit Eppendorf Reaktionsgefäß [S. 36]

Abbildung 19 Aufbau der Penetrationskammer anhand eines Versuchszahnes [S. 37]

Abbildung 20 Darstellung der Glucosekonzentration bei Inkubation mit den Studienpräparaten im zeitlichen Verlauf [S. 41]

Abbildung 21 Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Glucosepenetration für die getesteten Studienpräparate [S.42]

Abbildung 22 Darstellung der Glucosekonzentration mit Signifikanzen am Tag 30 für die getesteten Studienpräparate [S. 44]

# 9 Tabellenverzeichnis


| | |
|---|---|
| Tabelle 1 | Die Erkrankung des Periapikalen Gewebes (nach WHO ICD-10-GM Version 2013) [S. 10] |
| Tabelle 2 | Zusammensetzung von AH Plus (laut Packungsbeilage) [S. 20] |
| Tabelle 3 | Ergebnisse des Löslichkeitsversuches [S. 40] |
| Tabelle 4 | Konzentration der Glucose an definierten Studienzeitpunkten (MW±SD, [mg/ml] [S. 42] |

# 10 Danksagung

Übergeordneter Dank gebührt meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Karin Christine Huth für die Übergabe dieses anspruchsvollen und interessanten Themas in meine Hände. Sie stand mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite und hat mich darüber hinaus zu jeder Zeit bei der Erstellung der Arbeit ermutigt. Ich möchte ihr nochmals meinen Dank dafür und für die produktive sowie lehrreiche Zusammenarbeit aussprechen.

Bei Herrn Prof. Dr. Reinhard Hickel, Direktor der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie und Dekan der Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilian-Universität München, möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, dass ich in seinem Hause meine Doktorarbeit durchführen durfte.

Einen besonderen Dank möchte ich an meinen Mitbetreuer und guten Freund Herrn Dr. Maximilian Kollmuß richten, der mir immer als kompetenter Ansprechpartner zur Seite stand.

Weiter möchte ich mich speziell bei meinem Kollegen und engen Freund Herrn Dr. Stefan Kist bedanken, welcher mir zu jedem erdenklichen Zeitpunkt mit seiner Fachexpertise eine große Hilfe war.

# 11 Lebenslauf

**Persönliche Daten**

| | |
|---|---|
| **Name:** | Giorgio Dennis Merten |
| **Geburtsdatum:** | 29.10.1990 |
| **Geburtsort:** | Berlin |

**Schulausbildung**

| | |
|---|---|
| **1997 – 2003:** | Erpelgrundschule<br>13503 Berlin |
| **2003 – 2007:** | Gymnasium Schulfarm Insel Scharfenberg<br>13505 Berlin |
| **2007 – 2011:** | Humboldt Gymnasium<br>13509 Berlin |
| **Juni 2011:** | Abitur |

**Studium**

| | |
|---|---|
| **Oktober 2011 – Februar 2017:** | Studium der Zahnmedizin an der Ludwig-Maximilians-Universität München |
| **September 2012:** | Naturwissenschaftliche Vorprüfung |
| **Februar 2014:** | Zahnärztliche Vorprüfung |
| **Januar 2017:** | Staatsexamen Zahnmedizin |
| **Februar 2017:** | Approbation als Zahnarzt |

**Beruflicher Werdegang**

| | |
|---|---|
| **01.07.2011:** | Eintritt in die Bundeswehr |
| **01.07.2011 – 05.02.2017:** | Sanitätsoffiziersanwärter |
| **06.02.2017:** | Beförderung zum Stabsarzt |

# Eidesstattliche Versicherung

Merten, Giorgio Dennis

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

**Experimentelle Studie zur Untersuchung der Dichtigkeit verschiedener Sealer anhand einer quantitativen Glucose-Penetrations-Methode**

selbständig 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.

München, 1.7.2018

Ort, Datum

Giorgio Merten

Unterschrift Doktorandin/Doktorand