

Aus dem Medizinischen Zentrum
für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. H. Korbmacher-Steiner
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg
in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,
Standort Marburg, Abteilung für Zahnerhaltungskunde

**Extrusionsresistenz simulierter Wurzelkanalfüllungen mit
TotalFill BC Sealer in Abhängigkeit verschiedener
endodontischer Spüllösungen
– eine *In-vitro*-Studie**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

dem Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Ruth Maria Dahlhoff
aus Münster

Marburg 2021

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

am: 14.09.2021

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekanin: Prof. Dr. D. Hilfiker-Kleiner

Referent: PD Dr. M. Roggendorf

Korreferent: Prof. Dr. R. Mengel

Meiner Großmutter

Maria Dahlhoff

Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Literaturübersicht	2
	2.1 Endodontische Spüllösungen	2
	2.1.1 Natriumhypochlorit (NaOCl)	2
	2.1.2 Chlorhexidindigluconat (CHX)	4
	2.1.3 Ethylendiamintetraacetat (EDTA)	6
	2.1.4 Zitronensäure	7
	2.1.5 Ethanol	7
	2.2 Trocknung des Wurzelkanals	10
	2.3 Wurzelkanalfüllpasten (Sealer)	10
	2.3.1 Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis	11
	2.3.2 Sealer auf Polyketon-Basis	13
	2.3.3 Sealer auf Glasionomer-Basis	13
	2.3.4 Sealer auf Epoxidharz-Basis	14
	2.3.5 Sealer auf Calciumsalicylat-Basis	16
	2.3.6 Sealer auf Polydimethylsiloxan-Basis	17
	2.3.7 Sealer auf Polymethacrylat-Harz-Basis	18
	2.3.8 Sealer auf Silikat-Basis	21
	2.4 Eigenschaften von Wurzelkanalsealern	21
3	Zielsetzung und Arbeitshypothesen	30
4	Material und Methode	31
	4.1 Versuchsaufbau	32
	4.1.1 Instrumentierung der Probenzähne	35
	4.1.2 Spülung der Probenzähne	39
	4.1.3 Trocknung der Wurzelkanäle	40
	4.1.4 Obturation der Wurzelkanäle	41
	4.1.5 Analyse des Haftverbunds	42
	4.1.6 Analyse des Frakturmodus	43

5	Ergebnisse	44
	5.1 Deskriptive Analyse	44
	5.2 Analyse auf Normalverteilung	46
	5.3 Parametrische Analyse	47
	5.4 Analyse des Frakturmodus	48
	5.5 Korrelationsanalyse	52
6	Diskussion	53
	6.1 Standardisierung und Vergleichbarkeit der Methodik	53
	6.2 Diskussion der Ergebnisse	56
	6.3 Abschlussbewertung: Prüfung der Arbeitshypothesen	63
	6.4 Klinische Relevanz	64
	6.5 Fazit und klinischer Ausblick	65
7	Zusammenfassung	68
8	Summary	70
9	Anhang	72
10	Literaturverzeichnis	73
11	Verzeichnis meiner akademischen Lehrer	90
12	Danksagung	91

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
Alk	Alkohol
Aqua dest.	Aqua destillata
°C	Celsius
CHX	Chlorhexidindigluconat
Citro	Zitronensäure
cm	Zentimeter
DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
et al.	et alius
g	Gramm
ISO	International Organization for Standardization
K-Bohrer	Kerr-Bohrer
K-Reamer	Kerr-Reamer
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MPa	Mega Pascal
n	Anzahl
NaCl	Natriumchlorid
NaOCl	Natriumhypochlorit
Ncm	Newtonzentimeter
NiTi	Nickel-Titan
p	Signifikanzwert
pH	potentia hydrogenii
Tab.	Tabelle
UpM	Umdrehungen pro Minute
#	Größe
%	Prozent

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Flowchart des Versuchsablaufs	31
Abb. 2:	Röntgenkontrolle zur Prüfung der Wurzelkanalanatomie	34
Abb. 3:	Röntgenkontrolle zur Prüfung der Spreaderposition	34
Abb. 4:	<i>C-Pilot</i> -Feile (.02/#06)	35
Abb. 5:	K-Bohrer/K-Reamer (.02/#15)	35
Abb. 6:	<i>BioRaCe</i> Feilensequenz von BR0 bis BR5 sowie BR7	37
Abb. 7:	<i>BioRaCe</i> Basic und Extended Set (Foto: FKG Dentaire SA)	38
Abb. 8:	<i>EndoPilot mobil</i> -Multifunktionsgerät mit Endo-Winkelstück	39
Abb. 9:	<i>TotalFill BC Sealer</i>	41
Abb. 10:	<i>Zwick 1120</i> -Universaltestmaschine mit eingespannter Probe vor Versuchsbeginn	42
Abb. 11:	Boxplot-Diagramm der ermittelten Haftverbundwerte von <i>TotalFill BC Sealer</i> nach Pullout-Analyse in Abhängigkeit der eingesetzten Spüllösungen	45
Abb. 12:	Frakturmodi innerhalb der einzelnen Gruppen	49
Abb. 13:	Gesamtverteilung der Frakturmodi	49
Abb. 14:	Exemplarische Darstellung des adhäsiven Frakturmodus (Dentin/Sealer)	50
Abb. 15:	Exemplarische Darstellung des adhäsiven Frakturmodus (Sealer/Spreader)	50
Abb. 16:	Exemplarische Darstellung des kohäsiven Frakturmodus	51
Abb. 17:	Exemplarische Darstellung des gemischten Frakturmodus	51

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Endodontische Spüllösungen	9
Tab. 2:	Materialgruppen Sealer [modifiziert nach (Geurtsen 2001) und (Stellungnahme DGZMK 1999)]	11
Tab. 3:	Eigenschaften der Sealer	20
Tab. 4:	Einteilung der Spüllösungen	33

Tab. 5:	Pullout-Kraft [MPa] in Abhängigkeit der verwendeten Spüllösungen (Normalverteilungsanalyse: Shapiro-Wilk-Test ^a)	44
Tab. 6:	Statistische Analyse mittels Post-hoc-Test nach Scheffé	48
Tab. 7:	Fraktographisch analysierter Frakturmodus der Spreader nach erfolgtem Pull-out-Versuch	48
Tab. 8:	Korrelationsanalyse nach Spearman: Scherfestigkeit (Haftverbund) * Frakturmodus (Versagensmodus)	52
Tab. 9:	Korrelationsanalyse nach Spearman: Einflussfaktor (Spüllösung) * Frakturmodus (Versagensmodus)	52

1 Einleitung und Problemstellung

In den meisten Fällen sind Bakterien die Ursache für eine Erkrankung der Pulpa. Daher ist das oberste Ziel einer Wurzelkanalbehandlung die Elimination oder zumindest eine weitgehende Reduktion von Mikroorganismen aus dem infizierten Wurzelkanalsystem. Dies soll die Heilung eines bereits entzündeten apikalen Parodontiums oder die Verhinderung der Ausbildung einer Entzündung bewirken. Ebenso soll eine Reinfektion durch persistierende Bakterien im Endodont vermieden werden. Durch die chemomechanische Aufbereitung des Wurzelkanals mit anschließender möglichst vollständiger Obturation des Wurzelkanalsystems wird dieses Ziel erreicht. Die chemomechanische Aufbereitung umfasst die manuelle und/oder maschinelle Aufbereitung und die Spülung des Wurzelkanals. Dazu stehen verschiedene Spüllösungen zur Verfügung, die idealerweise antimikrobielle und auch gewebeauflösende Effekte aufweisen sollten, um so eine Desinfektion des Wurzelkanalsystems zu erreichen. Die Spüllösung soll eine möglichst vollständige Entfernung oder Auflösung von entzündetem oder nekrotischem organischem und anorganischem Pulpagewebe, Dentinspänen sowie Mikroorganismen und Endotoxinen aus dem Wurzelkanalsystem bewirken. Zudem soll die Spüllösung idealerweise die Schmierschicht (Smear layer) entfernen und so eine Penetration von Spülflüssigkeiten, medikamentösen Einlagen oder Wurzelkanalfüllmaterialien in die Dentintubuli hinein ermöglichen. Eine besondere Herausforderung stellen dabei schwer zugängliche Bereiche wie Ramifikationen, Dentintubuli, Anastomosen, Isthmen, akzessorische sowie laterale Kanäle dar. Die Wurzelkanalfüllung (Obturation) erfolgt im Regelfall mit einem Kernmaterial, meist Guttapercha, und einer Wurzelkanalfüllpaste, dem Sealer. Sealer unterschiedlichster Zusammensetzung finden aktuell in der Endodontie Anwendung. Als aktuellste Entwicklungen wurden biokeramische Wurzelkanalsealer wie der hier untersuchte *TotalFill BC Sealer* (Brasseler USA; Savannah, USA), auch bekannt als *iRoot SP* (Innovative Bioceramix, Vancouver, Canada) oder *EndoSequence BC Sealer* (Brasseler, Savannah, GA) auf den deutschen Markt gebracht. Es handelt sich dabei um einen neuen hydrophilen Wurzelkanalsealer auf der Basis von Calciumsilikat. Das Ziel der vorliegenden Studie war die Analyse der Extrusionsresistenz simulierter Wurzelkanalfüllungen mit *TotalFill BC Sealer* in Abhängigkeit von unterschiedlichen endodontischen Spüllösungen mittels eines Pull-out-Testverfahrens.

2 Literaturübersicht

2.1 Endodontische Spüllösungen

Als Spüllösungen kommen im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung verschiedene Flüssigkeiten zum Einsatz. Dabei werden verschiedene Anforderungen an Spüllösungen gestellt: Erhöhung der Gleitfähigkeit der Instrumente zur Wurzelkanalaufbereitung, ein möglichst breites antimikrobielles Spektrum und eine hohe Wirksamkeit gegenüber in Biofilmen organisierten aeroben und anaeroben Mikroorganismen, die Auflösung von vitalem und nekrotischem Pulpagewebe und Gewebsresten (organisches sowie anorganisches Gewebe), Inaktivierung von Endotoxinen (Lipopolysaccharide der äußeren Membran gramnegativer anaerober Bakterien), Lösung und Ausschwemmung von Debris, die Verhinderung der Bildung einer Schmierschicht („Smear layer“) während der Instrumentierung oder die Auflösung und Entfernung der kompletten Schmierschicht nachdem sie sich gebildet hat sowie die hinreichende Desinfektion des darunterliegenden Dentins.

Zusätzlich wird gefordert, dass die Verwendung einer Spüllösung die Eigenschaften der Zahnhartsubstanz möglichst nicht verändert, das periapikale Gewebe möglichst nicht reizt, die Spüllösung systemisch nicht toxisch ist, kein bzw. nur geringes allergisierendes Potenzial aufweist, einfach zu applizieren ist, gut zu lagern und kostengünstig ist (Zehnder et al. 2003; Willershausen 2013; Tennert 2013; Zehnder 2006; Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung 2006; gemeinsame Stellungnahme der DGZ und der DGZMK 2007).

2.1.1 Natriumhypochlorit (NaOCl)

NaOCl wird als der Goldstandard unter den Spüllösungen beschrieben und üblicherweise in Konzentrationen von 0,5 % - 5,25 % verwendet (Zehnder 2006). Coolidge empfahl den Gebrauch von NaOCl als endodontische Spüllösung das erste Mal im Jahr 1919 (Mohammadi 2014 et al. 2014; Coolidge 1919). Es besitzt eine exzellente antibakterielle und gewebeauflösende Wirkung und ist in der Lage sowohl vitales als auch nekrotisches Pulpagewebe und organische Bestandteile der Schmierschicht aufzulösen (Tennert 2013; Naenni et al. 2004; Grossman 1941).

Solange undissoziierte Hypochlorsäure (HClO) in der Lösung verfügbar ist, können diese proteolytischen und bakteriziden Effekte stattfinden. Der antibakterielle und viruzide Effekt wird durch den stark oxidativen Effekt des Sauerstoffs (O₂) erreicht (Kovac et al. 2011).

Eine Erhöhung der Konzentration von NaOCl führt zu einer Zunahme der gewebeauflösenden und antimikrobiellen Wirkung, allerdings einhergehend mit einer steigenden Zytotoxizität (Zehnder 2006; Estrela et al. 2002). In hohen Konzentrationen zeigt NaOCl die höchste Toxizität (Hauman et al. 2003; Spångberg et al. 1973). In einer Studie von Ferraz et al. zeigte NaOCl in einer Konzentration von 5,25 % allerdings auch die effektivste antimikrobielle Wirkung gegenüber geringeren Konzentrationen (Ferraz et al. 2007).

Bei Überpressen von NaOCl über den Apex des Wurzelkanals hinaus in das umliegende Weichgewebe kann eine Entzündung des Weichgewebes resultieren (Ryan 2010; Kleier et al. 2008). Tanomaru Filho et al. berichteten, dass bereits eine NaOCl-Lösung in einer Konzentration von 0,5 % nach Injektion in den Peritonealraum von Mäusen eine Entzündungsreaktion hervorruft (Tanomaru Filho et al. 2002).

Des Weiteren führt eine Erhöhung der Konzentration von NaOCl auch zu einer Reduzierung der mechanischen Eigenschaften des Dentins, nämlich des Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit, bedingt durch die Auflösung der organischen Komponenten des Dentins (Marending et al. 2007; Sim et al. 2001; Haapasalo et al. 2010).

NaOCl ist wirksam gegen eine große Anzahl grampositiver und gramnegativer Bakterien, Viren, Sporen und Pilze, wobei die Wirkung in Abhängigkeit zu seiner Konzentration, dem Volumen, der Kontaktzeit und der Temperatur steht (Tennert 2013; Mohammadi et al. 2014; Mohammadi et al. 2013). Bezüglich seiner antifungalen Wirksamkeit ist NaOCl anderen gängigen Spüllösungen deutlich überlegen (Mohammadi et al. 2014). Zudem ist NaOCl in der Lage, Endotoxine zu inaktivieren (Saleh et al. 2004). NaOCl scheint außerdem die einzige endodontische Spüllösung zu sein, die den mikrobiellen Biofilm effektiv zerstören und aus dem infizierten Wurzelkanal entfernen kann (Mohammadi et al. 2013).

Anorganische Bestandteile der Schmierschicht können jedoch durch eine Spülung mit NaOCl nicht beseitigt werden (Willershausen 2013). Der Wirkmechanismus von NaOCl verursacht biosynthetische Veränderungen im Metabolismus der Zelle und die Zerstörung von Phospholipiden der Zytoplasmamembran (Lipidperoxidation), die Bildung von Chloraminen, welche in den zellulären Stoffwechsel eingreifen, oxidative Vorgänge mit irreversibler Inaktivierung bakterieller Enzyme und Degradation von Fettsäuren (Verseifungsreaktion). Als starke Base (pH>11) reagiert NaOCl als Lösungsmittel für Fette und organisches Material, indem es Fettsäuren degradiert und sie in Fettsäuresalze (Seife) und Glycerin (Alkohol) umwandelt, wodurch die Oberflächenspannung der verbleibenden Lösung reduziert wird. Weiterhin neutralisiert NaOCl Aminosäuren durch die Bildung von Wasser und Salz. Die antimikrobielle Effektivität von NaOCl ergibt sich somit aus der Aktion der Chloramine und der Hydroxylionen (hoher pH-Wert), wohingegen die Auflösung des organischen Gewebes durch die Verseifungsreaktion erreicht wird (Estrela et al. 2002; Mohammadi et al. 2013).

Zusammenfassend ist NaOCl aufgrund der Summe seiner positiven Eigenschaften die Standardspüllösung in der Endodontie. NaOCl ist gewebsauflösend, bakterizid, fungizid und zerstört Endotoxine.

2.1.2 Chlorhexidindigluconat (CHX)

Als endodontische Spüllösung wird Chlorhexidindigluconat (aus Chlorhexidin und Gluconsäure gebildet) verwendet (Kovac et al. 2011). CHX wird in der modernen Endodontie in Konzentrationen von 2 % angewendet und ist als kationisches Bisguanid in der Lage sich elektrostatisch an die negativ geladenen Zellwände von Bakterien zu binden und diese zu schädigen bzw. abzutöten (Ryan 2010; Davies 1973).

Es besitzt ein breites Wirkspektrum gegen grampositive und gramnegative Bakterien, fakultative und strikte Anaerobier, sowie Hefen und Pilze, besonders *C. albicans* (Willershausen 2013; Gomes et al. 2013; Mohammadi et al. 2012; Ferguson et al. 2002; Greenstein et al. 1986). CHX wirkt *in vitro* und *in vivo* antibakteriell und fungizid (Vaghela et al. 2011). Eine 2 %ige CHX-Spüllösung eliminiert *Staphylococcus aureus*,

Candida albicans, *Enterococcus faecalis*, *Porphyromonas endodontalis*, *Porphyromonas gingivalis* und *Prevotella intermedia* *in vitro* in 15 Sekunden (Vianna et al. 2004). Schäfer et al. zeigten, dass 2 % CHX *in vitro* eine exzellente Wirksamkeit besitzt, um *Enterococcus faecalis* aus den Dentintubuli zu eliminieren (Schäfer et al. 2005). Leonardo et al. bestätigten die antimikrobielle Aktivität von 2 % CHX *in vivo* in Zähnen mit Pulpanekrose und röntgenologisch sichtbaren chronischen periapikalen Reaktionen (Leonardo et al 1999). Konzentrationsabhängig wirkt CHX entweder bakteriostatisch oder bakterizid (Willershausen 2013). Bei niedrigen Konzentrationen (0,2 %) bindet das CHX an die Zellwände von Bakterien und beschädigt die Zellmembranen der Bakterien und entfaltet so seinen bakteriostatischen Effekt, der eine Änderung des osmotischen Gleichgewichtes der Bakterienzelle und einen Verlust von Kalium und Phosphor zur Folge hat. Indem es bei hohen Konzentrationen (2 %) die Zellwand der Bakterien penetriert wirkt CHX bakterizid. Dies bewirkt, dass die Inhalte des Zytoplasmas der Bakterienzelle ausfallen und somit der Zelltod resultiert (Ryan 2010; Kovac et al. 2011; Greenstein et al. 1986).

Aufgrund der Fähigkeit von CHX, an Hydroxylapatit zu binden, wird ihm ein langanhaltender antimikrobieller Effekt zugeschrieben (hohe Substantivität) (Willershausen 2013). Nach einer Spülung mit 2 % CHX und anschließender Entfernung des CHX aus dem Wurzelkanal konnte eine antimikrobielle Aktivität von bis zu 72 Stunden nach der Spülung gezeigt werden (White et al. 1997). CHX bleibt bis zu 90 Tage im Wurzelkanalentin nachweisbar, jedoch ist die Substantivität zeitabhängig. Dies bedeutet, dass sich die Menge an verbleibendem CHX zeitabhängig reduziert (Souza et al. 2012). Mohammadi et al. bestätigten ebenfalls eine Substantivität und damit verbundene antibakterielle Wirkung im Dentin von bis zu 12 Wochen (Mohammadi et al. 2009).

Zudem besitzt CHX eine gute Gewebeverträglichkeit bei geringer Toxizität, ist allerdings nicht in der Lage, organisches Gewebe und die Schmierschicht aufzulösen oder bakterielle Endotoxine zu inaktivieren (Willershausen 2013; Tennert 2013; Naenni et al. 2004). Die hohe Biokompatibilität von CHX konnten auch Tanomaru Filho et al. bestätigen. Die Injektion einer 2 % CHX-Lösung in den Peritonealraum von Mäusen verursachte keine signifikante Entzündungsreaktion (Tanomaru Filho et al. 2002).

Zusammenfassend zeigt CHX ein breites Spektrum an antimikrobieller Aktivität (Ferraz et al. 2007), Substantivität, eine geringere Zytotoxizität als NaOCl, besitzt Schmiereigenschaften bzw. verbessert die Gleitfähigkeit der Instrumente, ist chemisch stabil, wasserlöslich, geruchlos und weist eine akzeptable Biokompatibilität auf (Gomes et al. 2013).

2.1.3 Ethylendiamintetraacetat (EDTA)

EDTA wirkt in Konzentrationen von 10 – 17 % als potenter Chelatbildner und ist als solcher in der Lage, Kalzium aus dem Wurzelkanalentin herauszulösen (Dekalzifikation) und damit die Dentintubuli für eine finale antimikrobiell wirkende Spülung zu öffnen und so die Permeabilität der Dentintubuli zu erhöhen (Willershausen 2013; Hauman et al. 2003).

EDTA hat nur einen sehr geringen gewebsauflösenden und nur geringe antimikrobielle Effekte, ist jedoch in der Lage, die anorganischen Bestandteile der Schmierschicht (Smear layer) aufzulösen und zu entfernen, das Dentin zu demineralisieren und stabile Komplexe mit Kalzium zu bilden (Tennert 2013). Dabei ist die Einwirkzeit ein wichtiger Faktor für die Wirkung von EDTA. Innerhalb einer Minute entfernt eine 17 % EDTA-Lösung *in vitro* sehr effektiv die Schmierschicht. Bei längerer Einwirkdauer kommt es zur Demineralisation des Dentins resultierend in einer Herabsetzung der Härte und des Elastizitätsmoduls des Dentins (Tennert 2013; Zehnder 2006). Calt et al. zeigten, dass eine Einwirkungszeit von 1 Minute von 10 ml EDTA 17 % zu einer suffizienten Entfernung der Schmierschicht führt, wohingegen eine Einwirkzeit von 10 Minuten deutliche Erosionen des peritubulären und intertubulären Dentins verursacht (Calt et al. 2002; Hauman et al. 2003). Laut gegenwärtiger Empfehlung bezüglich der optimalen Arbeitszeit für einen Chelator unter klinischen Bedingungen sollte EDTA zwischen 1-5 Minuten verwendet werden (Hauman et al. 2003). Zudem ist der demineralisierende Effekt von EDTA auch abhängig von der Konzentration und dem pH-Wert der verwendeten Spüllösung. Je höher die EDTA Konzentration und die Zeit der Verwendung, desto größer ist der demineralisierende Effekt. Bei einem neutralen pH-Wert ist die EDTA Spülung am effektivsten (Serper et al. 2002). Als Chelatbildner erleichtert EDTA auch die Degradierung von Kalzifikationen, die den Wurzelkanal

obliterieren und eine Katheterisierung des Wurzelkanals erschweren (Kovac et al. 2011).

Des Weiteren verbessert EDTA auch die Gleitfähigkeit der zur Aufbereitung des Wurzelkanals eingesetzten Instrumente (Calt et al. 2002). Konzentrationsabhängig besitzt EDTA *in vitro* leichte bis hohe Zytotoxizität. Eine 17 % EDTA-Lösung wirkt stark zytotoxisch (Koulaouzidou et al. 1999).

2.1.4 Zitronensäure

Zitronensäure ist ein Chelatbildner (Dekalkifikation) und wird in der Endodontie üblicherweise in Konzentrationen von 10-50 % verwendet, um die Schmierschicht und Dentinspäne zu entfernen (Willershausen 2013; Tennert 2013). Zudem besitzt Zitronensäure eine antimikrobielle Aktivität, welche in der Studie von Yamaguchi et al. gegen fakultative und obligate Anaerobier nachgewiesen wurde (Yamaguchi et al. 1996).

Die Zytotoxizität von Zitronensäure ist bedingt durch den Säuregehalt. In der Studie von Chan et al. zeigte Zitronensäure starke Zytotoxizität und zytostatische Effekte auf kultivierte Pulpazellen *in vitro*. Zudem bestimmen die Konzentration und die Applikationsdauer der Zitronensäure die mögliche Gewebetoxizität (Chan et al. 1999). Zitronensäure scheint eine höhere Biokompatibilität zu besitzen als EDTA. *In vitro* hatten alle mit 10 % Zitronensäure behandelten Fibroblastenkulturen einen höheren Prozentsatz an lebensfähigen Zellen und die Zellen behielten ihre Selbsterneuerungsfähigkeit verglichen mit EDTA (Scelza et al. 2001). Di Lenarda et al. berichteten nach 6-minütiger Verwendung von Zitronensäure von Bereichen mit deutlichen Auflösungserscheinungen des peritubulären und intratubulären Dentins mit einer starken Vergrößerung der Durchmesser der Dentintubuli (Di Lenarda et al. 2000).

2.1.5 Ethanol

Alkohol kommt als endodontische Spüllösung in Konzentrationen von 70 – 95 % zur Trocknung des Wurzelkanalsystems vor der Obturation zur Anwendung. Diesbezüglich

existieren nur wenige Studien (Tennert 2013). Stevens et al. zeigten in einer Laborstudie, dass eine Abschlusspülung mit Ethanol signifikant die Penetration des Sealers in das Dentin erhöht und die Leakage der Wurzelfüllung signifikant vermindert (Stevens et al. 2006). Wilcox et al. konnten dagegen nicht bestätigen, dass eine Abschlusspülung mit Alkohol und die damit verbundene Dehydration des Dentins die Abdeckung des Dentins mit Sealer signifikant verbessert (Wilcox et al. 1995).

Tab. 1: Endodontische Spüllösungen

NaOCl:

- verwendete Konzentration: 0,5-5,25 %
- sehr gute antibakterielle und gewebeauflösende Wirkung (viales und nekrotisches Pulpagewebe)
- Auflösung von organischen Bestandteilen der Schmierschicht, jedoch nicht von anorganischen Bestandteilen
- viruzid, antifungal
- toxisch in hohen Konzentrationen
- Inaktivierung von Endotoxinen
- Zerstörung des mikrobiellen Biofilms

CHX:

- verwendete Konzentration: 2 %
- konzentrationsabhängig bakteriostatisch bzw. bakterizid
- sehr gute antimikrobielle Wirkung (antibakteriell, antifungal, antimykotisch)
- hohe Substantivität
- akzeptable Biokompatibilität bei geringer Toxizität
- keine Auflösung der Schmierschicht
- keine Inaktivierung von Endotoxinen
- keine Auflösung von organischem Gewebe
- Verbesserung der Gleitfähigkeit von Instrumenten

EDTA:

- verwendete Konzentration: 10-20 %
- geringe gewebsauflösende und antibakterielle Wirkung
- Auflösung und Entfernung der anorganischen Bestandteile der Schmierschicht
- erleichterte Auflösung von Kalzifikationen
- Verbesserung der Gleitfähigkeit von Instrumenten
- konzentrationsabhängige Zytotoxizität

Zitronensäure:

- verwendete Konzentration: 10-50 %
- Entfernung der Schmierschicht
- mäßige antimikrobielle Aktivität
- konzentrationsabhängige Zytotoxizität

Alkohol:

- verwendete Konzentration: 70-95 %
- Trocknung des Wurzelkanalsystems vor der Obturation

2.2 Trocknung des Wurzelkanals

Im Anschluss an die Spülung des Wurzelkanals ist es notwendig, den Wurzelkanal mit formkongruenten Papierspitzen zu trocknen, um so die idealen Voraussetzungen für die nachfolgende Obturation des Wurzelkanals zu schaffen.

2.3 Wurzelkanalfüllpasten (Sealer)

Die Wurzelfüllung dient dazu, das gesamte Wurzelkanalsystem dauerhaft hermetisch und biokompatibel zu verschließen, um die Passage von Flüssigkeiten und Mikroorganismen im Wurzelkanal von apikal nach koronal und umgekehrt zu verhindern. Hierbei soll der Sealer die Inkongruenzen zwischen der Form der Wurzelkanalwand und jener des Kernmaterials volumenstabil ausfüllen (Stellungnahme DGZMK 1999).

Der ideale Sealer sollte danach folgende Anforderungen erfüllen: Ein Sealer sollte eine fließfähige Konsistenz besitzen, gut anfließen können an Oberflächen und im ausgehärteten Zustand eine gute Adhäsion zum Wurzelkanalentin mit seinen Irregularitäten und dem Kernmaterial, meistens Guttapercha, gewährleisten. In der Folge sollte ein luft- und flüssigkeitsdichter Verschluss resultieren.

Des Weiteren wird eine gute Radioopazität zur Visualisierung und Bewertung der Obturation besonders von lateralen Kanälen und apikalen Ramifikationen gefordert. Zudem sollte die Partikelgröße des Sealers möglichst fein sein, damit ein einfaches Handling und Anmischen mit der Flüssigkeit garantiert ist. Eine langsame Abbindereaktion als Grundlage für gute Verarbeitungseigenschaften ist zusätzlich von Bedeutung. Ferner sollte der Sealer dimensionsstabil bleiben und somit keine Schrumpfung während der Abbindereaktion aufweisen, damit weder zwischen dem Wurzelkanalentin und dem Sealer noch zwischen dem Sealer und dem Kernmaterial Lücken entstehen, die die Haftfestigkeit negativ beeinflussen könnten. Es sollte auch keine Verfärbung der Zahnhartsubstanz durch den Sealer stattfinden und gleichzeitig sollte der Sealer bakterizid oder zumindest bakteriostatisch sein. Ebenso ist eine Unlöslichkeit in Gewebeflüssigkeiten gefordert, um eine Irritation des Biokompatibilität gegenüber periapikalem Gewebe vorhanden sein. Um eine

Revisionsbehandlung zu erleichtern, wird eine Löslichkeit in den üblichen Lösungsmitteln gefordert (Gatewood 2007; Grossman 1988; Grossman 1981).

Tab. 2: Materialgruppen Sealer [modifiziert nach (Geurtsen 2001) und (Stellungnahme DGZMK 1999)]

Materialgruppe	Produktbeispiele (Hersteller)
Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis	<i>Grossmans Sealer, Tubli-Seal (Kerr), Aptal (Speiko), Endomethasone (Septodont), Roth 811, N2 (Hager & Werken), Pulp Canal Sealer (Kerr)</i>
Sealer auf Polyketon-Basis	<i>Diaket (3M ESPE)</i>
Sealer auf Glasionomer-Basis	<i>Ketac-Endo (3M ESPE), Endion (Voco)</i>
Sealer auf Epoxidharz-Basis	<i>AH 26 (Dentsply), AH Plus (Dentsply), ThermaSeal (Dentsply)</i>
Sealer auf Calciumsalicylat-Basis	<i>Sealapex (Kerr), Apexit (Ivoclar Vivadent), Acroseal (Septodont), MTA Fillapex (enthält 13% MTA-Partikel)</i>
Sealer auf Polydimethylsiloxan-Basis	<i>RoekoSeal (Roeko), GuttaFlow (Coltène/Whaledent)</i>
Sealer auf Polymethacrylat-Harz- Basis	<i>Epiphany (Pentron Clinical Technologies) EndoREZ (Ultradent), RealSeal (SybronEndo)</i>
Sealer auf Calciumsilikat-Basis	<i>TotalFill BC Sealer/iRoot SP/EndoSequence BC Sealer</i>

Die Wurzelkanalsealer der unterschiedlichen Materialgruppen weisen mitunter sehr unterschiedliche Eigenschaften bezüglich ihrer antibakteriellen Aktivität, ihrer Biokompatibilität, ihres Dimensionsverhaltens und ihrer Löslichkeit auf (siehe Tab. 3).

2.3.1 Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis

Wurzelkanalfüllpasten (Sealer) auf der Basis von Zinkoxid-Eugenol zeigen einen starken antibakteriellen Effekt (Bouillaguet et al. 2006; Pupo et al. 1983). Das Eugenol ist ein potentes antibakterielles Mittel (Hume 1986). So zeigte *Endomethasone* zum Beispiel die größte Zone bakterieller Hemmung gegen *E. faecalis* (Bouillaguet et al. 2006). Auch Wurzelfüllungen *in vitro* mit *Grossmans Sealer* und Guttapercha zerstörten *E. faecalis* in Dentintubuli wirksam sieben Tage nach Verwendung (Saleh et al. 2004). Auch gegen

S. mutans und *S. aureus* wird *Grossmans Sealer* große antibakterielle Aktivität zugeschrieben (Al-Khatib et al. 1990). *N2* zeigt *in vitro* bakterizide Eigenschaften gegen *S. mutans*. Frisch angemischtes *N2* besitzt starke antimikrobielle Aktivität und eine lang anhaltende antimikrobielle Aktivität (Broisman et al. 1978).

Ein möglicher Nachteil der Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis ist die Tatsache, dass das darin enthaltene Zinkoxid im Falle des Überstopfens des Wurzelkanals der Seitenzähne im Oberkiefer die Entstehung von Aspergillosen in der Kieferhöhle begünstigen kann (Khongkhunthian et al. 2001). Das Zink wird als Wachstumsfaktor für die Aspergillose vermutet (Beck-Mannagetta et al. 1986). *Endomethasone* und *N2* sind zwei Vertreter dieser Materialgruppe, die nach dem Aushärten Formaldehyd freisetzen (Leonardo et al. 1999). Bei *N2* nahm die Freisetzung von Formaldehyd nach einer Aushärtungszeit von 48 Stunden ab (Koch 1999). Sealer auf der Basis von Zinkoxid-Eugenol waren mäßig bis stark toxisch in Implantationsstudien. Bei Injektion in das subkutane Bindegewebe von Ratten wurden besonders im Falle von kurzen Aushärtungszeiten des Sealers schwere Entzündungen beobachtet. Nach dem 7. Tag nahm die Entzündungsaktivität ab (Mittal et al. 1995). Auch Huang et al. beschrieben mäßige bis starke Zytotoxizität von *N2* und *Endomethasone* auf Zellen des humanen Parodontalligaments und Zelllinien des Hamster, vermutlich begründet durch einen kombinierten Effekt von Eugenol und Formaldehyd (Huang et al. 2002). Schwarze et al. bestätigten dem *N2 in vitro* ebenfalls einen ausgeprägten zytotoxischen Effekt, vermutlich bedingt durch die große Menge an Formaldehyd (Schwarze et al. 2002). Im Rahmen einer Implantationstudie von *Tubli-Seal* in das Bindegewebe von Ratten wurden ebenfalls schwere Entzündungszeichen mit unterschiedlichen Ausprägungen von Nekrose nach 5 und 15 Tagen beobachtet und das Material reizte selbst nach längeren Zeiträumen von 60 und 120 Tagen nach Implantation noch das Gewebe (Kolokuris et al. 1996). *Grossmans Sealer* zeigte allerdings eine relativ niedrige Zytotoxizität (Schwarze et al. 2002), ebenso wie *Endomethasone* (Gerosa et al. 1995). Yesilsoy et al. berichteten im Rahmen einer Implantationsstudie von *Grossmans Sealer* in das subdermale Gewebe von Meerschweinchen von einer starken Entzündungsantwort nach 6 und 15 Tagen, aber milden Reaktionen nach 80 Tagen (Yesilsoy et al. 1988).

Sealer auf Basis von Zinkoxid-Eugenol zeigten im Allgemeinen während des Aushärtens eine Schrumpfung von 0,3-1 % (Ørstavik et al. 2001). Für *Endomethasone* wurde eine gewisse Löslichkeit während des Aushärtens und auch danach ermittelt (Kazemi et al. 1993). *Tubli-Seal* zeigte eine ausgeprägte Löslichkeit mit Auflösungs- und Ausfällungserscheinungen (von Fraunhofer et al. 1982). Zusammenfassend besitzen Sealer auf von Zinkoxid-Eugenol-Basis zufriedenstellende physikochemische Eigenschaften (De Almeida et al. 2000; Broisman et al. 1978).

2.3.2 Sealer auf Polyketon-Basis

Diaket war werkstoffkundlich ein Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis, bei dem das Eugenol durch ein Diketon substituiert wurde. *Diaket* zeigte milde antibakterielle Aktivität gegen *E. faecalis* (Bodrumlu et al. 2006), sehr effiziente antibakterielle Aktivität gegen *S. aureus* (Pumarola et al. 1992) und erzeugte in der Versuchsanordnung von Pupo et al. die größten Zonen bakterieller Hemmung gegen die getesteten Mikroorganismen und damit einen guten antimikrobiellen Effekt (Pupo et al. 1983). *Diaket* war höchst toxisch *in vitro* (Bodrumlu et al. 2006; Pascon et al. 1990). Der Sealer zeigte ein relativ starkes zytotoxisches Potential mit einer leichten Erholung der Zellen nach 3 Tagen der Kultivierung (Briseño et al. 1991).

In Wasser besaß *Diaket* eine geringe Löslichkeit und keine Dimensionsänderung während eines Testzeitraums von 3 Monaten (von Fraunhofer et al. 1982).

2.3.3 Sealer auf Glasionomer-Basis

Ketac Endo wies eine kurze starke antibakterielle Aktivität, diese aber besonders im frisch angemischten Zustand auf. Verantwortlich hierfür dürfte wahrscheinlich sowohl das enthaltene Fluorid als auch der pH-Wert sein (Shalhav et al. 1997). Zudem sind Sealer auf Basis von Glasionomer gut gewebeverträglich mit nur einer milden Entzündungsreaktion. Im Rahmen einer Implantationsstudie von *Ketac Endo* in das Bindegewebe von Ratten zeigte sich am fünften Tag eine milde Entzündung, wobei die sich Intensität im Folgenden kontinuierlich reduzierte (Kolokuris et al. 1996). Da diese Sealer die Eigenschaft besitzen eine chemische Bindung mit dem Hydroxylapatit der

Wurzelkanalwand einzugehen, können sie eine exzellente Adaptation zum Wurzelkanalentin gewährleisten (Ray et al. 1991).

Sealer auf der Basis von Glasionomer besitzen exzellente Fließigenschaften (Ray et al. 1991). *Ketac Endo* war sehr resistent gegenüber Resorptionen durch Gewebeflüssigkeiten (Ray et al. 1991), präsentierte aber mit 9,89 % einen höheren Wert für die Löslichkeit und Desintegration als die Empfehlungen der ADA zulassen. Die ADA-Spezifikation 57 toleriert 3 % als maximalen Wert für Löslichkeit und Desintegration (Carvalho-Júnior et al. 2003).

Die Revision einer Wurzelfüllung mit einem solchen Sealer ist allerdings daher auch zeitaufwändiger (Moshonov et al. 1994). Ein mit *Ketac Endo* endodontisch behandelter Zahn wird aber auch auf Grund dieser chemischen Bindung gegen mechanische Einflüsse signifikant gestärkt und widerstandsfähiger gegenüber Frakturen (Trope et al. 1992; Lertchirakarn et al. 2002).

2.3.4 Sealer auf Epoxidharz-Basis

Zu den Vertretern der Materialgruppe der Sealer auf Basis von Epoxidharz gehören *AH 26* und *AH Plus*. *In vitro* zerstörten Wurzelkanalfüllungen aus *AH Plus* und Guttapercha sieben Tage nach der Applikation effektiv *E. faecalis* in den Dentintubuli (Saleh et al. 2004). *AH 26* setzt im Gegensatz zu *AH Plus* Formaldehyd frei. *AH 26* setzt Formaldehyd frei, da das Pulver des Sealers Hexamethylentetramin enthält, das zu Ammoniak und Formaldehyd hydrolysiert wird. Nach vollständiger Aushärtung setzte *AH 26* keine signifikante Menge Formaldehyd mehr frei (Koch 1999).

Formaldehyd, welches während des Polymerisationsprozesses freigesetzt wird, ist maßgeblich verantwortlich für die antimikrobiellen Eigenschaften des *AH 26* (Bodrumlu et al. 2006; Leonardo et al. 1999). Spångberg et al. beobachteten, dass die größte Freisetzung von Formaldehyd während der ersten 48 Stunden nach dem Anmischen stattfindet. Danach nimmt die Konzentration des Formaldehyds zum siebten Tag hin ab. Das Formaldehyd dürfte der Hauptgrund für die hohe Toxizität des *AH 26* während, und besonders in der frühen Aushärtungsphase sein (Spångberg et al. 1993; Huang et al. 2000). Sowohl frisch angemischter, als auch ausgehärteter *AH 26*

Sealer konnte stark zytotoxische Effekte induzieren, wobei die Stärke der Zytotoxizität von der Aushärtungszeit abhing (Mittal et al. 1995; Schweikl et al. 1995). Frisch angemischtes *AH Plus* zeigte sich ebenfalls stark toxisch im Filterdiffusionstest mit Mäusefibroblasten, war jedoch nicht toxisch im ausgehärteten Zustand (Lodiene et al. 2008). An Fibroblasten der Haut von Mäusen und Rattenpulpazellen zeigte *AH 26* starke zytotoxische Effekte, wohingegen *AH Plus* deutlich geringeren toxischen Einfluss auf diese Zellen hatte (Koulaouzidou et al. 1998). Auch Pascon et al. zeigten, dass *AH 26* nach kurzen Beobachtungszeiträumen (1-7 Tage) starke Gewebereaktionen verursachte, nach 2-3 Jahren immer noch milde Gewebereaktionen (Pascon et al. 1991). *In vivo* respektive nach Obturation von Affenzähnen mit *AH 26* zeigten sich nach 8-14 Monaten milde bis starke Entzündungsläsionen (Tagger et al. 1989). *AH 26* und *AH Plus* zeigten *in vitro* konzentrationsabhängige Zytotoxizität und Genotoxizität (Huang et al. 2000; Heil et al. 1996). *AH 26* und *AH Plus* war toxisch gegen Rattenhepatozyten, bei geringen Konzentrationen hatte *AH 26* eine stärkere Toxizität als *AH Plus*. Somit sind *AH 26* und *AH Plus* nicht sonderlich biokompatibel (Huang 2000). Leyhausen et al. allerdings beschrieben, dass *AH Plus* keine Genotoxizität zeigte und stuften es daher als zytokompatibel ein (Leyhausen et al. 1999). Eine gute Biokompatibilität bescheinigten auch Leonardo et al. dem Sealer *AH Plus*. Im Kontaktbereich mit dem *AH Plus* waren weder im Gewebe im Bereich des Foramen apicale noch im periapikalen Gewebe Entzündungszellen oder Bereiche von Nekrose zu beobachten (Leonardo et al. 1999). Wurde *AH Plus* in das subkutane Bindegewebe von Ratten implantiert, zeigte sich eine zeitabhängige Abnahme der Entzündungsreaktion (Scarparo et al. 2009).

Sealer auf der Basis von Epoxidharz besitzen ein gutes Abdichtungsvermögen (De Almeida et al. 2000), eine geringe Löslichkeit (Carvalho-Júnior et al. 2003; McMichen et al. 2003), und eine überlegene Fließfähigkeit (Siqueira et al. 2000). Dies erklärt womöglich auch die signifikant geringere apikale Farbstoffpenetration innerhalb des Versuchsaufbaus bei Verwendung von *AH 26* im Vergleich zu anderen Sealern und die somit höhere Dichtigkeit dieses Sealers (Limkangwalmongkol et al. 1992).

AH 26 zeigte außerdem auch die größte Haftfestigkeit sowohl zum Dentin als auch zu Guttapercha (Gettleman et al. 1991; Lee et al. 2002). *AH 26* zeigte eine große initiale

Expansion von 4-5 %, *AH Plus* expandierte von 0,4 % nach vier Wochen bis zu 0,9 % (Ørstavik et al. 2001). Kazemi et al. beschrieben ebenfalls für *AH 26* eine initiale Expansion, gefolgt von einem Verlust an Volumen während der ersten 30 Tage und kein Anzeichen von Wasserlöslichkeit (Kazemi et al. 1993). Zudem wird dem *AH Plus* eine langanhaltende Dimensionsstabilität zugeschrieben (McMichen et al. 2003; Schäfer et al. 2003). Versiani et al. präsentierten für *AH Plus* eine Expansion von 1,3 %. Aber auch diese Dimensionsänderung liegt nicht im Bereich der Werte, die von der ANSI/ADA (ANSI/ADA Specification no. 57, 2000) nach dem Aushärten als akzeptabel angesehen werden, nämlich eine Expansion von unter 0,1 % (Versiani et al. 2006).

2.3.5 Sealer auf Calciumsalicylat-Basis

Bei den Sealern mit Kalziumhydroxid steht die antimikrobielle Aktivität höchstwahrscheinlich in Zusammenhang mit dem alkalischen pH-Wert des Kalziumhydroxids (Al-Khatib et al. 1990). *Sealapex* präsentiert geringe antibakterielle Aktivität (Siqueira et al. 1999), so auch gegen *E. faecalis* (Bodrumlu et al. 2006). *Sealapex* und *Apexit* werden als zytotoxisch *in vitro* beschrieben (Beltes et al. 1995). An Zellen des humanen Parodontalligaments und Zelllinien von Hamstern demonstrierte *Sealapex* im frisch angemischtem Zustand nur schwache Toxizität, aber zeigte aufgrund eines erheblichen Verlustes von zytotoxischen Substanzen eine zunehmende Toxizität im ausgehärteten Zustand (Huang et al. 2002; Gerosa et al. 1995; Beltes et al. 1995). *Sealapex* war schwach bis mäßig gewebeirritierend. Implantiert in Rattenbindegewebe zeigte *Sealapex* eine moderate Entzündungsreaktion nach 48 Stunden, die später abnahm (Mittal et al. 1995). In Affenzähnen zeigten die meisten Proben mit *Sealapex* nach 8-14 Monaten keine Entzündungszellen periapikal (Tagger et al. 1989). *Sealapex* förderte bei Wurzelkanälen von Hunden und Affen den Verschluss des apikalen Foramens durch Ablagerung von Zement und ist somit in der Lage die Bildung von Hartgewebe im apikalen Bereich zu stimulieren (Holland et al. 1985). *Sealapex* induzierte am besten die Ablagerung von mineralisiertem Gewebe im apikalen Bereich ohne Auftreten von entzündlichem Infiltrat und war der einzige Sealer, der einen vollständigen Verschluss des Foramen apicale präsentierte (Leonardo et al. 1997).

Sealer auf Salicylatbasis weisen eine hohe Löslichkeit und Desintegration auf (Schweikl et al. 1995). So war *Apexit* im Vergleich zu anderen Sealern am instabilsten in Wasser (McMichen et al. 2003) und auch *Sealapex* war signifikant stärker wasserlöslich als alle anderen getesteten Sealer bei Expositionszeiten von mehr als 14 Tagen (Schäfer et al. 2003). Diese Sealer unterstützen zwar die Kalzifikation aber haben die Tendenz sich mit der Zeit aufzulösen und somit den endodontischen Verschluss zu beeinträchtigen (Huang et al. 2002; Bouillaguet et al. 2004).

Sealapex zeigte auch nur eine geringe Haftfestigkeit an Dentin (Gettleman et al. 1991). Bei 100 % Luftfeuchtigkeit präsentierte *Sealapex* eine signifikante volumetrische Expansion während des Aushärtens, wobei die Expansion von der Menge des Sealers abhängig war (Caicedo et al. 1988). *Apexit* zeigte nur geringfügige Dimensionsänderung nach dem Aushärten (Ørstavik et al. 2001).

2.3.6 Sealer auf Polydimethylsiloxan-Basis

Sealer auf Basis von Polydimethylsiloxan besitzen eine mittelprächtige antibakterielle Aktivität. So hat *RoekoSeal* zum Beispiel nur eine begrenzte Fähigkeit, *E. faecalis* zu töten (Saleh et al. 2004). In dem Filterdiffusionstest mit Mäusefibroblasten war frisch angemischtes *RoekoSeal* nicht toxisch (Lodiene et al. 2008). Auch Bouillaguet et al. berichteten über *RoekoSeal* von geringer Zytotoxizität im frischen Zustand (Bouillaguet et al. 2004).

Sowohl Bouillaguet et al. als auch De-Deus et al. bescheinigten sowohl *RoekoSeal* als auch *GuttaFlow* eine exzellente Fähigkeit, das Wurzelkanalsystem zu versiegeln. In Bezug auf bakterielle Kontamination blieben beide Sealer stabil (Bouillaguet et al. 2004, De-Deus et al. 2007). Im Rahmen einer Dichtigkeitsuntersuchung präsentierte *RoekoSeal* über einen Zeitraum von 18 Monaten eine gute Langzeitdichtigkeit (Wu et al. 2002). Auch *GuttaFlow* füllte den präparierten Wurzelkanal in den meisten Abschnitten vollständig, wobei im Kern des Sealers kleinere Porositäten beobachtet werden konnten (Elayouti et al. 2005).

In Hundezähnen wurde bei Verwendung von *RoekoSeal* die Bildung und Ablagerung von mineralisiertem Gewebe im Sinne der periapikalen Ausheilung beobachtet, mit

einem vollständigen apikalen Verschluss in 43,8 % der Fälle und einem partiellen Verschluss in 56,2 % der Fälle (Lodiene et al. 2008).

GuttaFlow und *RoekoSeal* zeichnen sich durch eine geringe Löslichkeit aus (Flores et al. 2011). *GuttaFlow* schien nach Eintauchen in Wasser sehr stabil zu sein und wies nur minimale Wasseraufnahme und Löslichkeit auf (Donnelly et al. 2007). Innerhalb von 4 Wochen expandierte *RoekoSeal* bis 0,2 % und war anschließend stabil (Ørstavik et al. 2001). *GuttaFlow* erfüllt mit einer leichten Expansion während des Aushärtungsvorgangs die Anforderungen der Spezifikation 57 bezüglich der Dimensionsänderung. Die ANSI/ADA Standardisierung (ANSI/ADA Specification no. 57, 2000) besagt, dass eine Schrumpfung des Sealers von 1 % respektive 0,1 % Expansion nicht überschritten werden soll (Flores et al. 2011).

2.3.7 Sealer auf Polymethacrylat-Harz-Basis

Epiphany zeigte keine antibakterielle Aktivität gegen *E. faecalis*, da sich keine Zone bakterieller Hemmung bildete (Pinheiro et al. 2009). An Mäusefibroblasten nahm die Zytotoxizität von *Epiphany* nach zwei Tagen ab und *Epiphany* war nach 7 Tagen nicht mehr zytotoxisch. Die Zytotoxizität ist vermutlich bedingt durch den Verlust respektive das Auslaufen nicht ausgehärteter Monomere aus der Masse des Harzes (Susini et al. 2006). Im Filterdiffusionstest mit Mäusefibroblasten war laut Lodiene et al. frisch gemischtes *Epiphany* stark toxisch, *EndoREZ* nicht toxisch. Im ausgehärteten Zustand war *Epiphany* dann mäßig toxisch (Lodiene et al. 2008). Auch bei *EndoREZ* implantiert in das subkutane Rattenbindegewebe nahm die Stärke der Entzündungsreaktion mit der Zeit ab und nach 120 Tagen konnte eine Heilung des Bindegewebes beobachtet werden, was für eine adäquate Biokompatibilität spricht (Zmener 2004). Zmener et al. berichteten über *EndoREZ*, dass die initiale Entzündungsreaktion nach 60 Tagen verschwunden war und *EndoREZ* die normale Knochenheilung nicht beeinträchtigte (Zmener et al. 2005). Wurde *Epiphany* verwendet, traten deutlich seltener apikale Parodontitiden auf, vermutlich bedingt durch die exzellente koronale Versiegelungsfähigkeit (Shipper et al. 2005).

Epiphany expandierte um 8,1 %, womit die Dimensionsänderung größer ist als die 0,1 % Expansion, die von der ANSI/ADA (ANSI/ADA Specification no. 57, 2000) als akzeptabel angesehen werden. Mit 3,41 % lag *Epiphany* auch über den Werten, die von der ANSI/ADA für die Löslichkeit als akzeptabel eingestuft werden. Die Spezifikation 57 besagt, dass ein Wurzelkanalzement im ausgehärteten Zustand nicht mehr als 3 % an Masse verlieren sollte (Versiani et al. 2006). Laut Teixeira et al. erhöhte die Verwendung von *Epiphany in vitro* die Resistenz gegen über Wurzelfrakturen (Teixeira et al. 2004), wobei laut Grande et al. *Epiphany* nicht in der Lage war die mechanischen Eigenschaften des Wurzelkanal Dentins zu beeinflussen respektive die Wurzel zu stärken (Grande et al. 2007).

Tab. 3: Eigenschaften der Sealer

Sealer	Eigenschaften
Zinkoxid-Eugenol-Basis	<ul style="list-style-type: none"> • stark antibakteriell • Entstehung von Aspergillosen in der Kieferhöhle wird im Falle des Überstopfens des Wurzelkanals begünstigt • Endomethasone und N2 setzen Formaldehyd frei • stark bis mäßig toxisch in Implantationsstudien • Schrumpfung von 0,3-1 % während des Aushärtens • moderate Löslichkeit
Polyketon-Basis	<ul style="list-style-type: none"> • gute antibakterielle Aktivität • stark zytotoxisch • geringe Löslichkeit • keine Dimensionsänderung
Glasionomer-Basis	<ul style="list-style-type: none"> • kurze starke antibakterielle Aktivität • gut gewebeverträglich mit nur einer milden Entzündungsreaktion • exzellente Adaptation durch chemische Bindung zum Wurzelkanaldentin • exzellente Fließeigenschaften • erhöhte Löslichkeit
Epoxidharz-Basis	<ul style="list-style-type: none"> • gute antibakterielle Aktivität • AH 26 setzt Formaldehyd frei, daher hohe Zytotoxizität • konträre Aussagen bzgl. der Biokompatibilität von AH Plus (stark toxisch bis nicht toxisch), aber weniger toxisch als AH 26 • gutes Abdichtungsvermögen • geringe Löslichkeit • überlegene Fließfähigkeit • große Haftfestigkeit • initiale Expansion bei Aushärtung
Calciumsalicylat-Basis	<ul style="list-style-type: none"> • geringe antibakterielle Aktivität • schwach bis mäßig zytotoxisch • Stimulation von Hartgewebsbildung im apikalen Bereich • hohe Löslichkeit und Desintegration • geringe Haftfestigkeit am Dentin • Apexit zeigt geringe Dimensionsänderung, Sealapex expandiert signifikant
Polydimethylsiloxan-Basis	<ul style="list-style-type: none"> • mäßige antibakterielle Aktivität • geringe bis keine Zytotoxizität • exzellentes Abdichtungsvermögen • Stimulation von Hartgewebsbildung im apikalen Bereich • geringe Löslichkeit • leichte Expansion während des Aushärtens
Polymethacrylat-Harz-Basis	<ul style="list-style-type: none"> • adäquate Biokompatibilität (mäßig bis nicht zytotoxisch) • exzellente koronale Versiegelungsfähigkeit • erhöhte Löslichkeit • größere Expansion während des Aushärtens

2.3.8 Sealer auf Silikat-Basis

Der *TotalFill BC Sealer* (Brasseler USA; Savannah, USA) ist seit Ende 2013 auf dem deutschen Markt erhältlich. Im Jahr 2009 wurde dieses neue Material von Brasseler USA als *EndoSequence BC Sealer* (Brasseler, Savannah, GA) eingeführt, auch bekannt als *iRoot SP* (Innovative Bioceramics, Vancouver, Canada) in Canada und der Schweiz. Daher beziehen sich die meisten hier genannten Studien auf den *EndoSequence BC Sealer* bzw. auf den *iRoot SP Sealer*.

Laut Herstellerangaben ist der *TotalFill BC Sealer* aus Zirkonoxid (ZrO_2), Trikalziumsilikat ($3CaO \cdot SiO_2$), Dikalziumsilikat ($2CaO \cdot SiO_2$), monobasischem Kalziumphosphat ($Ca(H_2PO_4)_2$) und Kalziumhydroxid ($CaOH_2$) sowie Füllstoffen und Verdickungsmitteln zusammengesetzt.

Das Zirkonoxid ist verantwortlich für die Röntgenopazität des Sealers. Während Candeiro et al. nur eine moderate Röntgenopazität von 3,84 mm Al angeben (Candeiro et al. 2012), berichten Xuereb et al. mit 10,8 mm Al von einer deutlich höheren Röntgenopazität des *EndoSequence BC Sealers* (Xuereb et al. 2015).

2.4 Eigenschaften von Wurzelkanalsealern

2.4.1 Anfließverhalten (Kontaktwinkel)

Das Fließverhalten des Sealers beeinflusst maßgeblich die Qualität der Obturation. Nur wenn alle Inkongruenzen zwischen Wurzelkanalwand und Kernmaterial erreicht und aufgefüllt werden, kann ein dichter Verschluss des Wurzelkanalsystems resultieren. Allerdings sollte der Sealer auch nicht zu flüssig sein, um die apikale Extrusion des Sealers und die damit verbundene Reizung des periapikalen Gewebes möglichst zu vermeiden. Das Fließverhalten des *EndoSequence BC Sealers* entspricht den ISO 6876/2001 Empfehlungen (International Organization for Standardization, 2001). Diese ISO 6876/2001 Spezifikation fordert, dass der Sealer in einem entsprechenden Flusstest mehr als 20mm fließen sollte (Zhou et al. 2013; Candeiro et al. 2012). Im Rahmen des Flusstests zeigten sowohl der *EndoSequence BC Sealer* mit einer Fließrate

von 26,96 mm als auch *AH Plus* mit 21,17 mm Fließraten, die den ISO 6876/2001 Empfehlungen entsprechen, wobei die Fließrate von *AH Plus* signifikant geringer war (Candeiro et al. 2012). Auch Zhou et al. untersuchten diverse Sealer (*MTA Fillapex*, *AH Plus*, *ThermaSeal*, *GuttaFlow*, *Pulp Canal Sealer* und *EndoSequence BC Sealer*), wobei alle die ISO 6876/2001 Empfehlungen erfüllten. Die Fließraten in aufsteigender Reihenfolge waren: *GuttaFlow* < *AH Plus* = *ThermaSeal* < *Pulp Canal Sealer* = *EndoSequence BC Sealer* < *MTA Fillapex* (Zhou et al. 2013).

Die Messung des Kontaktwinkels gibt Aufschluss über die Benetzbarkeit eines Materials. Je kleiner der Kontaktwinkel, desto hydrophiler ist das Substrat und umso schneller wird sich die Flüssigkeit auf dem Substrat verteilen und die Oberfläche benetzen. In dem Versuchsaufbau von Zhang et al. zeigte *iRoot SP* nach dem Aushärten mit weniger als 5 Grad bei weitem den kleinsten Kontaktwinkel und somit starke Hydrophilie. Der Kontaktwinkel von *Tubli Seal*, *AH Plus*, *Apexit Plus* und *Sealapex* lag im ausgehärteten Zustand zwischen 75 und 90 Grad (Zhang et al. 2009).

2.4.2 Dimensionsverhalten (Schrumpfung oder Expansion)

Laut Zhou et al. entspricht die Dimensionsänderung des *EndoSequence BC Sealers* den ISO 6876/2001 Empfehlungen. Die ISO 6876/2001 Spezifikation besagt, dass die Dimensionsänderung 1 % Schrumpfung oder 1 % Expansion nicht überschreiten sollte. In dem Versuchsaufbau von Zhou et al. war bei Proben von *MTA Fillapex*, *AH Plus* und *Pulp Canal Sealer* eine Schrumpfung zu beobachten nachdem die Proben für 30 Tage in Wasser eingetaucht waren, wohingegen die Proben des *EndoSequence BC Sealers*, *ThermaSeal* und *GuttaFlow* eine geringe Expansion aufwiesen. Die Dimensionsänderung aller Sealer entsprach den ISO 6876/2001 Empfehlungen (Zhou et al. 2013).

Der Hersteller gibt an, dass die Abbindezeit des *EndoSequence BC Sealers* etwa vier Stunden beträgt (Gebrauchsanweisung). Nach Loushine et al. benötigte der Sealer jedoch mindestens 168 Stunden, um vollständig auszuhärten. Des Weiteren nimmt die Mikrohärtigkeit signifikant ab, wenn der Sealer Wasser beinhaltet (Loushine et al. 2011).

Eine aktuelle Beurteilung der Abbindeaktivität und der Abbinde Mechanismen in situ mittels eines Dentin-Druckmodells zeigte interessante neue Erkenntnisse. Zum einen ermöglichte die innerhalb des Wurzelkanals verfügbare Flüssigkeit das Abbinden des *EndoSequence BC Sealers*, der nur in der Gegenwart von Wasser aushärten kann. Dies wurde anhand dieser Studie verifiziert. Zum anderen war die Hydrationsreaktion und Bioaktivität in Gegenwart von Dentinflüssigkeit gegenüber der Hydratation *in vitro* verändert. Dies lässt den Schluss zu, dass klinisch die Bioaktivität, nämlich durch die Interaktion mit der Dentinfluid mineralische Tags auszubilden, die Hydratation und das Abbindeverhalten nicht angenommen werden können (Xuereb et al. 2015).

2.4.3 Löslichkeit

Eine zu hohe Löslichkeit des Sealers und die damit verbundene Auflösung des Sealers können an den Grenzflächen zwischen Dentin und Sealer respektive Sealer und Guttapercha und auch innerhalb des Sealers zu Undichtigkeiten führen, die Bakterien die Passage zum periapikalen Gewebe ermöglichen und somit eine apikale Leakage verursachen können (Colombo et al.).

Laut Zhou et al. entspricht die Löslichkeit des *EndoSequence BC Sealers* den ISO 6876/2001 Empfehlungen. Verglichen mit *MTA Fillapex* (1,10 %), *Pulp Canal Sealer* (0,07 %), *AH Plus* (0,06 %), *GuttaFlow* (0,02 %) und *ThermaSeal* (0,0015 %) zeigte der *Endosequence BC Sealer* die höchsten Löslichkeitswerte (2,9 %), lag damit aber noch innerhalb der Grenzen der ISO6876/2001 Empfehlung von 3 % Massenanteil (Zhou et al. 2013). Ersahan et al. beschrieben sogar nur eine Löslichkeit von 0,90 % für *iRoot SP* (Ersahan et al. 2013).

Borges et al. beschrieben allerdings konträre Erkenntnisse. Der *iRoot SP Sealer* erfüllt die Anforderungen der ANSI/ADA (ANSI/ADA Specification no. 57, 2000) bezüglich der Löslichkeit nicht. Die Spezifikation 57 der ANSI/ADA beschreibt die Löslichkeit als den Verlust von Masse während eines Zeitraums des Eintauchens in Wasser gefolgt vom Erhärten der Substanz und sollte 3 % der Masse nicht überschreiten. Im Falle von *iRoot SP* sind es allerdings 20,64 %. Laut Borges et al. ist die hohe Löslichkeit von *iRoot SP* möglicherweise auf die geringe Partikelgröße (wenige Nanometer) des Sealers

zurückzuführen, da hierdurch den Wassermolekülen eine vergrößerte Oberfläche geboten wird, mit dem Sealer in Kontakt zu treten. In dem Versuchsaufbau von Borges et al. zeigte *AH Plus* mit 0,28 % Löslichkeitswerte, die im Rahmen der Anforderungen der ANSI/ADA lagen, der Wert für *Sealapex* mit 5,65 % allerdings nicht (Borges et al. 2012).

Auch Colombo et al. beschrieben für den *TotalFill BC Sealer* eine hohe Löslichkeit (13,12 %), die nicht die Empfehlungen der ISO 6876/2001 respektive Anforderungen der ANSI/ADA erfüllte, im Gegensatz zu den anderen getesteten Sealern wie beispielsweise *AH Plus* (0,045 %) und *Sealapex* (0,94 %) (Colombo et. al.).

In der Studie von Schäfer et al. zeigten *AH Plus*, *AH 26*, *RoekoSeal* und *Diaket* nach 24 Stunden und selbst nach 28 Tagen Lagerung in Wasser einen Gewichtsverlust von weniger als 3 %, wobei *AH Plus* die geringste Löslichkeit aufwies. Wohingegen auch schon nach 24 Stunden bei *Sealapex*, *Aptal-Harz* und *Ketac Endo* der Gewichtsverlust oberhalb von 3 % und somit nicht mehr im Rahmen der Empfehlungen der ISO 6876/2001 respektive Anforderungen der ANSI/ADA lag (Schäfer et al. 2003).

2.4.4 Dichtigkeit

Eine hermetische Abdichtung des Wurzelkanals gegenüber pathogenen Mikroorganismen beeinflusst den Erfolg einer Wurzelbehandlung maßgeblich. Je besser der Sealer den Wurzelkanal sowohl apikal als auch lateral versiegeln respektive abdichten kann, desto geringer sind die Mikroleakage und die damit verbundene bakterielle Kontamination des Wurzelkanals und des periapikalen Gewebes.

Nach Zhang et al. war die apikale Versiegelungsfähigkeit (engl. "sealing ability") von *iRoot SP*, beurteilt mittels einem Flüssigkeitsfiltrationsverfahren, gleichwertig gegenüber der von *AH Plus* (Zhang et al. 2009).

Ballullaya et al. untersuchten *in-vitro* die Mikroleakage von *Endosequence BC Sealer*, *Sealapex*, *AH Plus*, *EndoREZ*, *MTA Plus* und eines Sealers auf Zinkoxid-Eugenol-Basis mittels einer Farbstoffanalyse. Hierbei zeigte der hydrophile *Endosequence BC Sealer* die geringste Farbstoffpenetration zwischen der Wurzelkanalfüllung und der

Wurzelkanalwand und somit die beste Versiegelungsfähigkeit, der Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis die größte Farbstoffpenetration (Ballullaya et al. 2017).

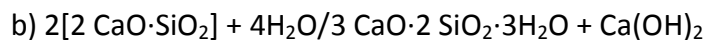
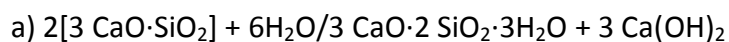
Auch Pawar et al. zeigten *in-vitro* anhand einer Farbstoffanalyse, dass die apikale Versiegelungsfähigkeit des *Endosequence BC Sealers* vergleichbar mit der von *Epiphany* und der von *AH Plus* überlegen war (Pawar et al. 2014).

Anhand eines Bakteriendichtigkeitstests untersuchten Oh et al. die Versiegelungsfähigkeit von *Endosequence BC Sealer* und *AH Plus* gegenüber den Endotoxinen von *Porphyromonas gingivalis*. Nach 21 Tagen zeigten 75 % der mit *Endosequence BC Sealer* obturierten Wurzelkanäle und 50 % der mit *AH Plus* obturierten Wurzelkanäle eine Leakage von Endotoxinen (Oh et al. 2018). Hier präsentierte sich der *Endosequence BC Sealer* also nicht ganz so überzeugend.

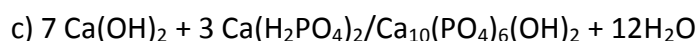
2.4.5 Haftverbund

Die Feuchtigkeit des Dentins ist mutmaßlich für die Erleichterung der Hydrationsreaktionen der Kalziumsilikate Kalziumsilikathydrat-Gel und Kalziumhydroxid zu erzeugen verantwortlich (Richardson 2008). Kalziumhydroxid reagiert teilweise mit dem Phosphat, um Hydroxylapatit und Wasser zu bilden. Das Wasser startet vermutlich den Reaktionszyklus erneut (Zhang et al. 2009; Yang et al. 2002).

Unter Wasserzufuhr Entstehung von Kalziumsilikathydrogel und Kalziumhydroxid:



Ausfällung von Kalziumapatit:



(Knutfer 2014, Candeiro et al. 2012, Koch et al. 2009)

Die so entstandene Hydroxylapatitschicht soll eine chemische Verbindung zwischen dem kalziumsilikatbasierten Sealer und dem Wurzelkanalentin hervorrufen. Es ist daher anzunehmen, dass eine chemische Bindung entsteht (Knupfer 2014).

Der *iRoot SP* Sealer besitzt somit eine gute Adhäsion zum Wurzelkanalentin. Unabhängig von den Feuchtigkeitsbedingungen zeigte *iRoot SP in vitro* verglichen mit *AH Plus*, *MTA Fillapex* und *Epiphany* eine signifikant höhere Haftfestigkeit zum Wurzelkanalentin ($iRoot SP > AH Plus > Epiphany \geq MTA Fillapex$). Die höchste respektive niedrigste Haftfestigkeit entstand unter feuchten respektive nassen Bedingungen. Somit beeinflusst das Ausmaß an verbliebener Feuchtigkeit signifikant die Adhäsion des Sealers am Wurzelkanalentin. Daher erscheint es als vorteilhaft im Wurzelkanal vor der Obturation etwas Feuchtigkeit zu belassen. Diese Ergebnisse unterstreichen zudem die Herstellerinformation, dass der Sealer die Gegenwart von Wasser erfordert, um abzubinden und auszuhärten (Nagas et al. 2012).

In der *In-vitro*-Studie von Amin et al. hatte *AH Plus* allerdings eine höhere Haftfestigkeit zum Dentin als *iRoot SP* und *MTA Fillapex*. Wurde vor der Obturation für 7 Tage eine medikamentöse Einlage aus Kalziumhydroxid eingebracht, zeigten *AH Plus* und *iRoot SP* eine ähnliche Haftfestigkeit, die größer war als die von *MTA Fillapex*. Somit schien die vorherige Verwendung von Kalziumhydroxid im Wurzelkanal einen positiven Effekt auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Herauslösen von *iRoot SP* zu haben (engl. "dislodgement resistance") (Amin et al. 2012).

2.4.5 Antibakterielle Eigenschaften

Der hydrophile Sealer besitzt eine potente antimikrobielle Wirkung. Zhang et al. bestätigten dies anhand eines modifizierten Direkt-Kontakt-Tests. Der frisch gemischte Sealer *iRoot SP* tötete *in vitro* alle Bakterien, in dieser Studie *E. faecalis*, innerhalb von zwei Minuten. *AH Plus* benötigte 5 Minuten, *EndoREZ* 20 Minuten und *Sealapex* und *Epiphany* 60 Minuten. Frisch angemischtes *Apexit Plus* und *Tubli Seal* scheiterten, alle Bakterien innerhalb von 60 Minuten abzutöten. Bei den Proben nach einem und drei Tagen im ausgehärteten Zustand zeigten *iRoot SP* und *EndoREZ* die stärkste antibakterielle Aktivität, gefolgt von *Sealapex* und *Epiphany*, während *Tubli Seal*,

AH Plus und *Apexit Plus* keine signifikante antibakterielle Aktivität mehr aufwiesen. Sieben Tage nach dem Anmischen war die antimikrobielle Wirkung von *iRoot SP* dann auch stark vermindert. Somit zerstört *iRoot SP Sealer* effektiv *E. faecalis* und bleibt auch noch effektiv bis zu 7 Tage nach dem Anmischen (Zhang et al. 2009). Diese antimikrobielle Aktivität ist möglicherweise dem hohen pH-Wert (pH = 12), der Hydrophilie und der aktiven Kalziumhydroxid-Diffusion zuzuschreiben (Zhou et al. 2015; Zhang et al. 2009).

Im Gegensatz dazu konnten Willershausen et al. *in vitro* keine antibakterielle Wirkung von *EndoSequence BC Sealer*, *GuttaFlow* und *AH Plus* gegenüber *E. faecalis* feststellen. Gegenüber *Parvimonas micra* zeigte der *EndoSequence BC Sealer* ebenfalls keine und *GuttaFlow* nur eine schwache antibakterielle Aktivität. Nur *AH Plus* und *Pulp Canal Sealer* hatten einen ausgeprägten antibakteriellen Effekt auf *Parvimonas micra* (Willershausen et al. 2011).

2.4.7 Biokompatibilität

Sealer sollten eine geringe Zytotoxizität aufweisen. Diesbezüglich zeigten Loushine et al., dass in einem *in vitro* Versuchsaufbau mit ausgehärteten Sealer und Osteoblasten von Mäusen, alle getesteten Sealer, so auch der *EndoSequence BC Sealer*, erhebliche Zytotoxizität innerhalb der ersten 24 Stunden aufweisen. Der *EndoSequence BC Sealer* blieb während der folgenden sechs Wochen mäßig zytotoxisch und im Folgenden nur noch mild zytotoxisch (Loushine et al. 2011).

Etwas anders beschrieben es Zhou et al. (2015). *In vitro* wurde die Zytokompatibilität von *EndoSequence BC Sealer* gegenüber humanen Gingivafibroblasten eruiert. *EndoSequence BC Sealer* war nicht zytotoxisch zu irgendeinem Zeitpunkt der Abbindereaktion, weder frisch gemischt noch während des vierwöchigen Testzeitraums im ausgehärteten Zustand. Die mit Extrakten des *EndoSequence BC Sealers* inkubierten Zellen zeigten eine höhere Lebensfähigkeit bei allen Konzentrationen der Extrakte verglichen mit den Zellen, die mit frisch angemischtem *AH Plus* und mit frisch angemischtem und ausgehärtetem *MTA Fillapex* inkubiert wurden. Der *EndoSequence BC Sealer* zeigte eine milde Toxizität bei hohen

Extraktkonzentrationen. Die Fibroblastenzellen wuchsen auf Proben des ausgehärteten *EndoSequence BC Sealers* genauso gut wie auf *AH Plus* Proben (Zhou et al. 2015).

Mittlere (intermediate) Toxizität und damit gute Biokompatibilität für den *iRoot SP* Sealer bestätigten auch Zhang et al. (2010). Sie prüften *ex vivo* die Zytotoxizität von *iRoot SP* gegenüber Mausfibroblasten. In dem Diffusionstest konnte für *iRoot SP*, getestet im frisch angemischtem Zustand, eine moderate Zytotoxizität nachgewiesen werden, während nach 24 Stunden im abgebundenen Zustand keine Zytotoxizität festzustellen war. Der MTT-Test, zur Bestimmung der Zellviabilität, zeigten sich die Proben des abgebundenen *iRoot SP* Sealers als nicht zytotoxisch (Zhang et al. 2010).

Auch Willershausen et al. bestätigten dem *EndoSequence BC Sealer* eine gute Biokompatibilität, da *in vitro* nur eine moderate Zytotoxizität gegenüber humanen Parodontalligament-Fibroblasten festgestellt werden konnte (Willershausen et al. 2011).

Zoufan et al. sahen keinen Unterschied bezüglich der Zytotoxizität zwischen frisch gemischtem und ausgehärtetem *EndoSequence BC Sealer*. Der *EndoSequence BC Sealer* demonstrierte in beiden Zuständen eine höhere Biokompatibilität und damit auch eine niedrigere Zytotoxizität als *AH Plus* und *Tubli-Seal* (Zoufan et al. 2011).

In der *In-vitro*-Studie von Camargo et al. mit Proben ausgehärteter Sealer und Säugetierzellen zeigte *AH Plus* eine vergleichbare Zytotoxizität wie *Epiphany*, *Acroseal* war allerdings deutlich toxischer und reduzierte die Zelllebensfähigkeit dramatisch. *Acroseal* war auch weitaus genotoxischer als *Epiphany* und *AH Plus*. Die zytotoxischen und genotoxischen Effekte waren hierbei dosisabhängig (Camargo et al. 2009).

2.4.8 Klinischer Erfolg

Im Rahmen der prospektiven modularen Toronto-Studie (Phase 1 - 4) wurde das klinische Behandlungsergebnis einer initialen endodontischen Behandlung nach Obturation mit *Roth Root Canal Cement Typ 801*, *Ketac Endo* oder *Pulp Canal Sealer* für einen 4 - 6 Jahreszeitraum untersucht. Demnach bestehen für den behandelten Zahn eine 86 % Chance vollständig auszuheilen, eine zusätzliche 5 % Chance unvollständig auszuheilen und eine 95 % Chance für Funktionserhalt 4 bis 6 Jahre nach der initialen

endodontischen Behandlung. Der dominante Ergebnisprädiktor in allen vier Phasen der Studie war die präoperative apikale Periodontitis. Lag eine apikale Periodontitis vor, heilten 82 % der Zähne aus, bestand präoperativ keine apikale Periodontitis, heilten 93 % der Läsionen aus. Auch die Anzahl der Wurzeln behandelter Zähne war ein signifikanter präoperativer Ergebnisprädiktor. Nur bei Zähnen mit vorhandener präoperativer apikaler Periodontitis zählten auch die Wurzelfüllungstechnik (Flare-Präparation und warm-vertikale Kondensation versus Step-back-Präparation und laterale Kondensation) und die intraoperativen Komplikationen zu den signifikanten Ergebnisprädiktoren (Friedman et al. 2003, Farzaneh et al. 2004, Marquis et al. 2006, de Chevigny et al. 2008).

iRoot SP könnte ein vielversprechender Sealer sein bezüglich der Ausheilung von periapikalem Gewebe, da er die Mineralisation und das frühe Stadium der Bildung der Knochenmatrix fördern kann (Zhang et al. 2010).

Auch der alkalische pH-Wert des *Endosequence BC Sealers* könnte zu seinem osteoinduktiven Potential beitragen (Zhou et al. 2013).

In vitro erhöhte *iRoot SP* nachweislich die Frakturresistenz von endodontisch behandelten Zähnen (Ghoneim et al. 2011).

Allerdings sind konventionelle Revisionstechniken aktuell nicht in der Lage, den *EndoSequence BC Sealer* wieder vollständig aus dem Wurzelkanal zu entfernen (Hess et al. 2011).

Zudem ist festzuhalten, dass eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung mehrere unterschiedliche Faktoren beinhaltet, die zur Verhinderung der Ausbreitung der endodontischen Infektion beitragen, die endodontische Infektion eliminieren und eine Reinfektion verhindern. Diese erforderlichen Komponenten zur Elimination einer endodontischen Infektion sind: das körpereigene Abwehrsystem, in manchen Fällen eine systemische Antibiotikatherapie, die chemomechanische Präparation, die Wurzelkanal desinfektion, lokale Wurzelkanal desinfizierende Medikamente, eine permanente Wurzelkanalfüllung und eine permanente koronale Restauration (Haapasalo 2003).

Die vorliegende *In-vitro*-Studie konzentriert sich auf die chemomechanische Präparation und die Untersuchung der Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* zur Erreichung einer optimalen Wurzelkanalfüllung.

3 Zielsetzung und Arbeitshypothesen

Um eine qualitativ hochwertige Wurzelkanalfüllung am Patienten gewährleisten zu können, sollte ein idealer Wurzelkanalsealer möglichst viele positive Eigenschaften hinsichtlich der Biokompatibilität, der chemischen und physikalischen Eigenschaften in sich vereinen. Besonders wichtig ist somit auch die Haftfestigkeit des Sealers sowohl zum Wurzelkanalentin als auch zum Kernmaterial, meistens Guttapercha, um so einen langfristigen und stabilen Verbund der Wurzelkanalfüllung zum Zahn zu erzielen. Daher wurde der biokeramische Wurzelkanalsealer *TotalFill BC Sealer* (Brasseler USA; Savannah, USA), auch als *iRoot SP* (Innovative Bioceramics, Vancouver, Canada) oder *EndoSequence BC Sealer* (Brasseler, Savannah, GA) auf den deutschen Markt gebracht. Ziel dieser vorgelegten *In-vitro*-Studie ist die Untersuchung der Extrusionsresistenz simulierter Wurzelkanalfüllungen mit *TotalFill BC Sealer* in Abhängigkeit verschiedener endodontischer Spüllösungen.

Folgende Arbeitshypothesen sollten im Rahmen dieser Studie untersucht werden:

Arbeitshypothese 1:

Die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* zum Wurzelkanalentin zeigt signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen endodontischen Spüllösungen.

Arbeitshypothese 2:

Der Einsatz von Chelatoren als endodontische Spüllösung führt zu einer signifikanten Verschlechterung des Haftverbunds von *TotalFill BC Sealer*.

4 Material und Methode

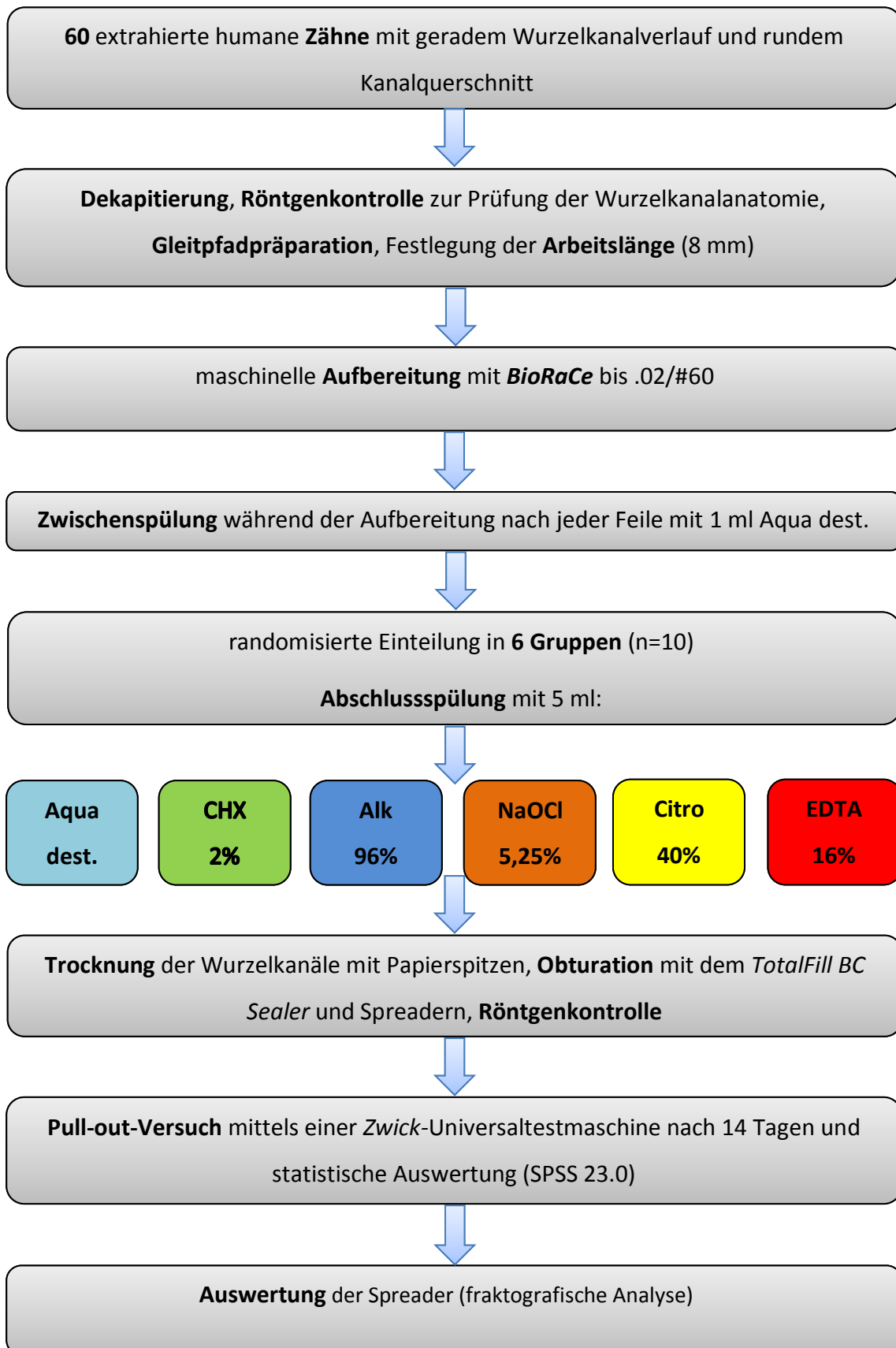


Abb. 1: Flowchart des Versuchsablaufs

4.1 Versuchsaufbau

Zunächst wurden für den Versuchsaufbau 60 extrahierte humane einwurzelige Zähne mit geradem Wurzelkanalverlauf und rundem Kanalquerschnitt gesammelt. Diese Frontzähne und einwurzeligen Prämolaren wiesen jeweils nur einen Wurzelkanal auf und wurden aufgrund diverser Indikationen extrahiert. Danach wurden die Zähne in 0,9 % isotonischer NaCl Lösung + 0,001 % Natriumazid gelagert. Die Zähne wurden durch Entfernung des Desmodonts mit einem *Skalpell* (Aesculap) gründlich gesäubert und anschließend mit einer *diamantierten Trennscheibe* (HORICO) auf eine Länge von 10 mm dekapitiert. Zur Prüfung der Wurzelkanalanatomie wurden die Zähne anschließend röntgenologisch dokumentiert. Nach der Kanaleingangsdarstellung wurde der Wurzelkanal bis zum Apex mittels *C-PILOT-Feilen* (VDW GmbH) der ISO-Größen 6, 8, 10 und 12,5 und einem *K-Bohrer* (*K-Reamer*) (VDW GmbH) der ISO-Größe 15 sondiert und auf seine Gängigkeit überprüft. Somit wurde der Gleitpfad hergestellt. Die Arbeitslänge wurde auf 8 mm festgelegt. Es erfolgte anschließend die maschinelle Aufbereitung der Wurzelkanäle mit dem vollrotierenden Feilensystem *BioRaCe* (FKG Dentaire) bis zur Instrumentengröße .02/#60 (BR7) unter Auslassung der Instrumentengröße .04/#50 (BR6) mit dem Aufbereitungsmotor „*EndoPilot*“ (*Schlumbohm*). Hierbei wurden eine Drehzahl von 500 U.p.M. und ein Drehmoment von 1 Ncm gewählt. Entsprechend den Herstellerangaben wurden die *BioRaCe*-Feilen maximal für vier Wurzelkanäle verwendet. Anschließend wurde die Instrumentierung der Wurzelkanäle noch einmal mit einer K-Feile der ISO-Größe 60 kontrolliert und falls erforderlich nachinstrumentiert. Die Aufbereitung der Wurzelkanäle erfolgte im angefeuchteten Kanal. Um Dentinspäne und Debris zu entfernen, fanden während der Aufbereitung nach jeder Feile Zwischenspülungen mit ca. 1 ml Aqua dest. (*Ampuwa*) statt. Im Anschluss wurden die Probenzähne randomisiert in 6 Gruppen (1, 2, 3, 4, 5, 6) gleicher Gruppenstärke (n=10) verteilt. Die Zähne jeder Gruppe wurden mit 5 ml einer anderen Abschlusspülung gespült (siehe auch Flowchart).

Tab. 4: Einteilung der Spüllösungen

Gruppe	Spüllösung
1	Aqua dest. (<i>Ampuwa</i>)
2	CHX (Chlorhexidindigluconatlösung 2 %)
3	Alkohol (Ethanol 96 %)
4	NaOCl (Natriumhypochlorit 5,25 %) (<i>Hypochlorit-SPEIKO</i>)
5	Zitronensäure 40 %
6	EDTA (Ethyldiamintetraacetat 16 %) (Natrium-EDTA-Lösung)

Normierte, ca. 3 cm lange, Stahlspreader der ISO Größe 60 wurden mittels Sandstrahlgerät mit *CoJet Sand (3M ESPE)* abgestrahlt und hierdurch angeraut. Im Folgenden wurde kontrolliert, ob die Spreader auf volle Arbeitslänge in den Kanal eingebracht werden können und apikal Friktion haben, also ob ein „tug back“ (leichter Widerstand, der beim Herausziehen überwunden werden muss) vorliegt. Nach Entfettung der Stahlspreader mit 96 % Ethanol und Trocknung der Wurzelkanäle mit formkongruenten *Papierspitzen (.02/#60) (VDW GmbH)* wurden die Wurzelkanäle mit den Spreadern und dem *TotalFill BC Sealer (Brasseler USA)* im Sinne der Single-Cone-Technik obturiert. Dazu wurde der *TotalFill BC Sealer* mit der dazugehörigen Endospitze in den Kanal eingebracht und gleichzeitig auch der Spreader mit Material beschickt. Die korrekte Position des Spreaders wurde durch ein Röntgenbild dokumentiert (digitales Röntgensystem *Digora, Soredex Germany*). Zusammen mit einem in Aqua dest. getränkten Wattepellet wurden die Zähne nun nummerisch erfasst und entsprechend in beschrifteten Eppendorf-Gefäßen gelagert. Für 14 Tage wurde dieses feuchte, geschlossene Milieu in einem Thermoschrank bei 37°C und 95 % Luftfeuchtigkeit aufrechterhalten. Nach dieser Aushärtezeit von 14 Tagen wurde mit jedem Probenzahn mit Hilfe der *Zwick-Universaltestmaschine 1120 (Zwick/Roell)* ein Pull-out-Versuch durchgeführt, um so den Haftverbund zwischen Sealer und Wurzelkanalentin respektive Sealer und Spreader zu untersuchen. Hierzu wurden die Probenzähne in eine Haltevorrichtung eingespannt und die Zugkraft griff entlang der Längsachse der Spreader an. Die Zugkraft (gemessen in Newton) erhöht sich solange bis der Spreader aus dem Zahn herausgelöst wird. Daraus resultiert ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Im Anschluss folgte die statistische Analyse. Bezüglich der Kräfte, die abhängig von den verschiedenen Spüllösungen aufgebracht werden

mussten, um die Spreader in dem Pullout-Versuch aus den Wurzelkanälen zu extrudieren, wurden verschiedene statistische Tests durchgeführt.

Analyse auf Normalverteilung:

- Shapiro-Wilk-Test

Parametrische Analyse:

- Varianzhomogenität (Levene-Test)
- Mittelwertgleichheit (Welch-Test)
- Mittelwertvergleiche (OneWay-ANOVA)
- paarweise Mehrfachvergleiche der Mittelwerte (Post-hoc-Tests)

Korrelationsanalyse:

- Spearman-Test

Der Signifikanzwert wurde für dieses Analyseverfahren auf $p \leq 0,05$ gesetzt beziehungsweise das Signifikanz-Niveau auf $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Anschließend wurde die fraktographische Analyse der extrudierten Stahlspreader bezüglich ihres Frakturmodus durchgeführt.

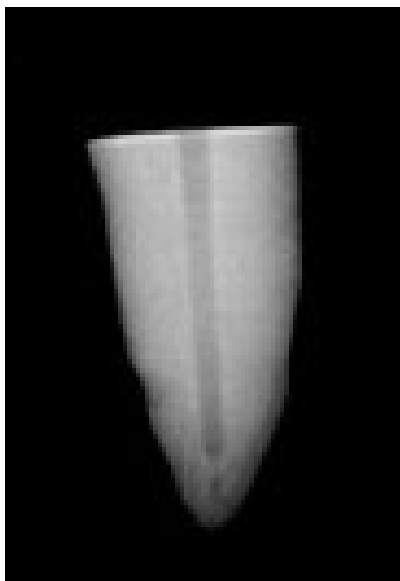


Abb. 2: Röntgenkontrolle zur Prüfung der Wurzelkanalanatomie

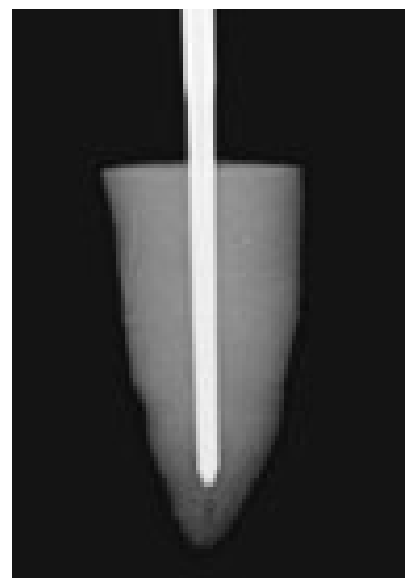


Abb. 3: Röntgenkontrolle zur Prüfung der Spreaderposition

4.1.1 Instrumentierung der Probenzähne

C-PILOT-Feilen

C-PILOT-Feilen (VDW GmbH) (siehe Abb. 4) sind Handinstrumente aus Edelstahl, die in den ISO-Größen 6, 8, 10 und der Zwischengröße 12,5 jeweils mit einer Konizität von 2 % und in den Längen 19 mm, 21 mm und 25 mm verfügbar sind. Sie haben einen quadratischen Querschnitt und sind verdrillt. Ihre inaktive Pilot-Spitze ermöglicht eine sichere Führung des Instrumentes im Wurzelkanal. Aufgrund thermischer Härtung sind sie besonders biegefest und somit besonders geeignet für die initiale Sondierung und die Erstellung eines Gleitpfades vor maschineller Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten.

K-Bohrer (K-Reamer)

K-Bohrer (K-Reamer) (VDW GmbH) (siehe Abb. 5) sind Handinstrumente aus Edelstahl, verfügbar in den ISO-Größen 06 - 140 in den Längen 21 mm, 25 mm oder 31 mm, jeweils mit einer Konizität von 2 %. Sie besitzen eine inaktive Spitze und sind mit drehend schabender Bewegung zu verwenden. In den ISO-Größen 06 bis 40 haben sie einen Vierkant-Querschnitt, der eine hohe Bruchsicherheit garantiert, in den ISO-Größen 45 bis 140 ermöglicht der Dreikant-Querschnitt eine höhere Flexibilität im Vergleich zu einem quadrangulären Querschnitt (Beer 2009).



Abb. 4: C-Pilot-Feile (.02/#06)

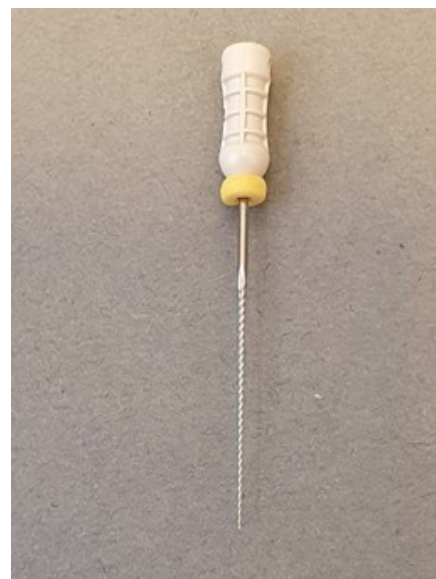
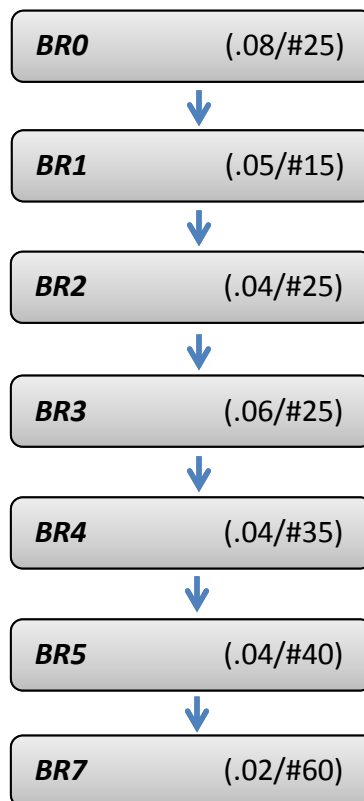


Abb. 5: K-Bohrer/K-Reamer (.02/#15)

BioRaCe-Instrumente

BioRaCe-Instrumente (*FKG Dentaire*) sind flexible Nickel-Titan-Instrumente (kurz: NiTi) zur vollrotierenden maschinellen Aufbereitung von Wurzelkanalsystemen. Aufgrund ihres Dreiecksquerschnitts haben sie scharfe Schneidekanten, wobei die nicht schneidende Sicherheitsspitze Stufenbildungen im Wurzelkanal („elbow und zip“) vermeiden soll. Weiterhin soll durch alternierende Schneidekanten das Einschrauben in den Wurzelkanal vermieden werden. Aus der elektrochemischen Oberflächenpolitur resultiert eine geringere Korrosionsneigung. Es wird empfohlen die Instrumente bei einem Drehmoment von 1 Ncm und einer Drehzahl von 500-600 U.p.m. zu verwenden. Die *BioRaCe*-Instrumente sind als Basic-Set und Extended-Set erhältlich. Der Hersteller empfiehlt die Instrumente des Basic-Sets für maximal 4 Fälle zu verwenden. Entsprechend des Krümmungsgrades der Kanäle variiert die Empfehlung für das Extended-Set zwischen einmaliger und maximal vierfacher Verwendung der Instrumente.

In diesem Versuchsaufbau wurde folgende Feilensequenz verwendet:



Die Feile *BR0* dient zur Aufbereitung der koronalen 4-6 mm des Wurzelkanals (Kanalerweiterer). Wie bei allen *BioRaCe*-Instrumenten werden auch hier nur 4 sanfte, wischende Auf-und-Ab-Bewegungen pro Arbeitsschritt empfohlen.

Instrumentierung des Wurzelkanals entsprechend der Herstellerempfehlung:

Manuelle Aufbereitungsphase:

1. manuelle Aufbereitung mit Stahlinstrumenten (2 % Konizität und ISO 08 bis ISO 15) auf volle Arbeitslänge

Rotierende Aufbereitungsphase:

2. koronale Aufbereitung mit *BR0*
3. Erreichen der Arbeitslänge (AL) mit *BR1* bis *BR3*
4. abschließende apikale Aufbereitung mit *BR4* bis *BR7*

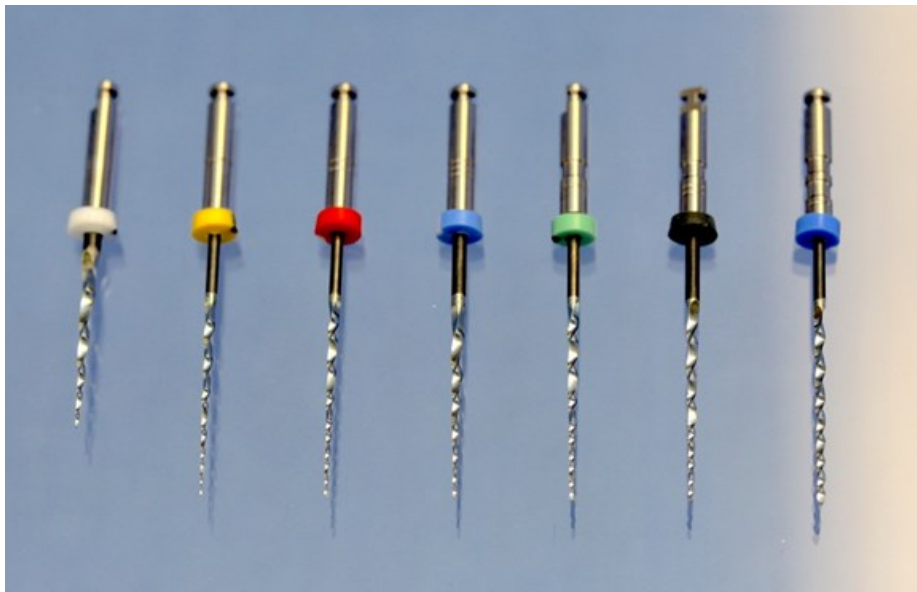


Abb. 6: *BioRaCe* Feilensequenz von *BR0* bis *BR5* sowie *BR7*

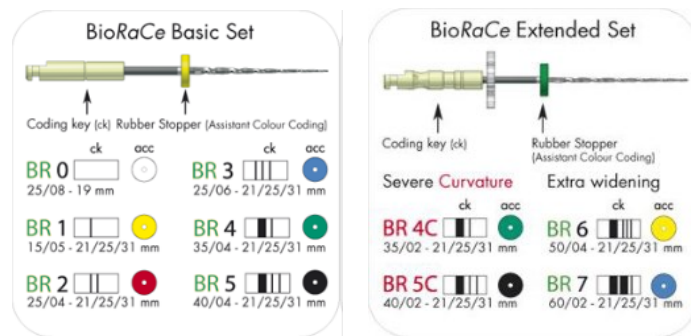


Abb. 7: BioRaCe Basic und Extended Set (Foto: FKG Dentaire SA)

EndoPilot mobil

Der *EndoPilot mobil* (Schlumbohm) vereint vier Funktionen in sich: Apexlokator zur Längenbestimmung (Endometrie) sowie drehmoment- und drehzahlüberwachter Endomotor für maschinelle Aufbereitung. Zudem verfügt der *EndoPilot* über einen Akku, der einen vom Netzkabel unabhängigen Einsatz ermöglicht. Das *EndoPilot*-Set beinhaltet eine Control Unit mit Touchscreen, einen Motor, ein vollisoliertes Winkelstück (1:1 Übertragung), einen Aufsteller für den *EndoPilot* samt Handstücken und einen Fußschalter mit Kabel. Während der Aufbereitung des Wurzelkanals verhindert die „Bi-Force“-Technik das Blockieren der Feile in gekrümmten Kanälen durch abwechselnde Links-Rechts-Drehungen (Twist-Funktion). Zusätzlich wird bei Annäherung an den Apex automatisch das Drehmoment reduziert und die Feile im apikalen Bereich bzw. am Apex stoppt kurzzeitig und läuft dann vorsichtig im Rechtslauf wieder an. So wird die Schneidleistung der Feile im apikalen Bereich begrenzt und eine anhaltende Förderung der Dentinspäne aus dem Wurzelkanal nach koronal gewährleistet. Zudem besitzt der *EndoPilot* eine Feilenbibliothek, also eine vorprogrammierte Datenbank vieler gängiger Feilensysteme. Das Feilenmanagement ermöglicht eine automatische Überwachung des Feilenverschleißes bzw. der Feilenbelastung.



Abb. 8: EndoPilot mobil-Multifunktionsgerät mit Endo-Winkelstück

4.1.2 Spülung der Probenzähne

Aqua dest.

Das Aqua dest. (Aqua destillata) von *Ampuwa (Fresenius Kabi)* ist nicht zur Infusion und Injektion bestimmt (Aqua ad iniectabilia). Es ist steril und endotoxinfrei und wurde im Rahmen des Versuchsaufbaus als Spüllösung (Zwischenspülung und Abschlusspülung) verwendet.

CHX 2 %

Die zur Abschlusspülung verwendete Chlorhexidindigluconatlösung enthält folgende Bestandteile:

- Natrium-EDTA-Dihydrat 16 g
- Chlorhexidindigluconat 2,0 g
- Wasser für Injektionszwecke ad 100,0 ml

NaOCl 5,25 %

Ebenfalls als Abschlusspflung nach erfolgter Wurzelkanalaufbereitung wurde Natriumhypochlorit (*Hypochlorit-SPEIKO*) (*SPEIKO®-Dr. Speier GmbH*) verwendet. Dies ist als gebrauchsfertige Dentallösung in einer Konzentration von 5,25 % erhältlich.

Zitronensäure 40 %

Die Zitronensäure wurde frisch angemischt. Um eine Konzentration von 40 % zu erhalten, wurden 40 g Zitronensäure auf 100 g mit Wasser aufgefüllt.

EDTA 16 %

Die Natrium-EDTA (Ethyldiamintetraacetat)-Lösung 16 % wurde in der Apotheke des UKGM (Marburg, Deutschland) hergestellt. 100 g sterile Lösung enthalten:

- Natrium-EDTA-Dihydrat 16 g
- Natriumhydroxid 2,08 g
- Wasser, gereinigt ad 100 g

4.1.3 Trocknung der Wurzelkanäle

Die Trocknung der Wurzelkanäle erfolgte mit formkongruenten *Papierspitzen* (.02/#60) (*VDW GmbH*).

4.1.4 Obturation der Wurzelkanäle

TotalFill BC Sealer

Bei dem *TotalFill BC Sealer* (Brasseler USA) handelt es sich um eine hoch röntgenopake, hydrophile, injizierbare, gebrauchsfertige biokeramische Zementpaste basierend auf einer Calciumsilikat-Formel zur Anwendung als permanente Wurzelkanalfüllung und Versiegelung. Er wird vorgemischt in einer Fertigspritze mit Einweg-Endo-Kanüle geliefert. Der *TotalFill BC Sealer* ist zusammengesetzt aus Zirkonoxid, Calciumsilicat, Calciumphosphat monobasisch, Calciumhydroxid und Füll- und Verdickungsstoffen. Für die Aushärtung nutzt der *TotalFill BC Sealer* die natürlich vorhandene Feuchtigkeit in den Dentintubuli und bildet dabei Hydroxylapatit und geht eine chemische Bindung mit dem Dentin ein. Bei der Applikation des *TotalFill BC Sealers* in den Wurzelkanal sollte die Spritzenspitze maximal bis in das koronale Drittel des Wurzelkanals eingebracht werden. Die Verarbeitungszeit kann bei Raumtemperatur mehr als vier Stunden betragen. Da zum Abbinden und Aushärten die Feuchtigkeit aus den Dentintubuli erforderlich ist, beträgt die Abbindezeit etwa vier Stunden, bei extrem trockenen Wurzelkanälen mehr als zehn Stunden. Laut Herstellerangaben findet während des Abbindens absolut keine Schrumpfung des Materials statt.



Abb. 9: *TotalFill BC Sealer*

4.1.5 Analyse des Haftverbunds

Universaltestmaschine

Zur Durchführung des Pull-out-Tests wurde die Universaltestmaschine *Zwicki 1120* (*Zwick Roell*, Ulm) mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 mm/min verwendet.

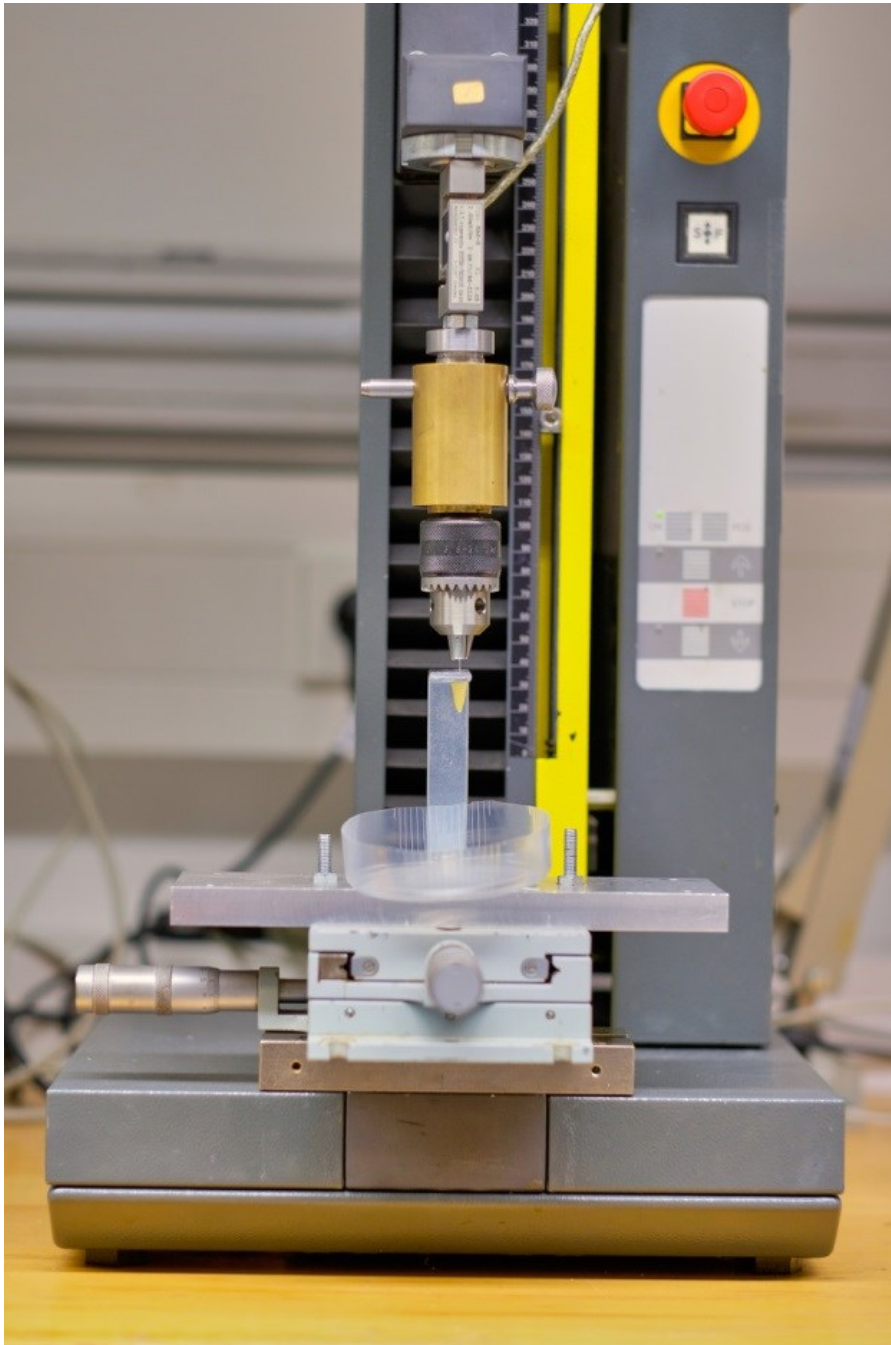


Abb. 10: Zwick 1120-Universaltestmaschine mit eingespannter Probe vor Versuchsbeginn

4.1.6 Analyse des Frakturmodus

Nach dem Pull-out-Versuch wurden die extrudierten Stahlspreader von zwei Seiten digital fotografiert (*Canon EOS 500D* mit *Canon MP-E 65 mm*) und die Oberflächen der extrudierten Stahlspreader fraktographisch (visuell, makroskopisch und mikroskopisch) untersucht, um den Frakturmodus zu bestimmen und quantitativ zu beurteilen. Dabei werden drei Frakturmodi unterschieden:

- Typ I: adhäsive Fraktur (an der Grenzfläche zwischen Sealer und Dentin)
- Typ II: adhäsive Fraktur (an der Grenzfläche zwischen Sealer und Stahlspreader)
- Typ III: kohäsive Fraktur (innerhalb des Sealers oder innerhalb des Dentins)
- Typ IV: gemischte Fraktur (Kombination aus adhäsiver und kohäsiver Fraktur)

5 Ergebnisse

Statistische Analyse

Die statistische Analyse der erhobenen Rohdaten aus dem Pullout-Versuch erfolgte mit dem Statistikpaket *SSPS Win 23.0* (IBM, Armonk, NY, USA).

5.1 Deskriptive Analyse

Tab. 5: Pullout-Kraft [MPa] in Abhängigkeit der verwendeten Spüllösungen (Normalverteilungsanalyse: Shapiro-Wilk-Test^a)

Spül-lösung	Fälle (n)	Mittelwert (MPa)	Median (MPa)	Standard-abweichung (MPa)	Minimum (MPa)	Maximum (MPa)	Interquartil-bereich (MPa)	Normal-verteilungs-analyse (p-Wert)
Aqua dest.	10	4,20	4,23	0,86	2,61	5,40	1,33	0,845
CHX	10	3,78	3,64	0,71	2,73	5,21	0,90	0,687
Alk	10	4,23	4,02	0,87	3,03	6,10	1,04	0,463
NaOCl	10	4,50	4,76	0,93	2,72	5,59	1,57	0,504
Citro	10	1,16	0,78	0,80	0,39	2,76	1,18	0,069
EDTA	10	2,77	2,15	1,32	1,47	5,20	2,30	0,082

Die Mittelwerte der Pullout-Kraft reichten von 4,50 MPa (NaOCl) bis 1,16 MPa (Citro). Innerhalb der Versuchsreihe wurde bei Alkohol (Alk) mit 6,10 MPa die größte Kraft (Maximum) gemessen, die aufgebracht werden musste, um die Spreader aus dem Wurzelkanal zu extrudieren. Die geringste Kraft (Minimum) mit 0,39 MPa wurde nach Spülung mit Zitronensäure (Citro) ermittelt, wobei dies in der Gruppe festzustellen war, die auch im Median die niedrigsten Haftwerte erzielte (0,78 MPa).

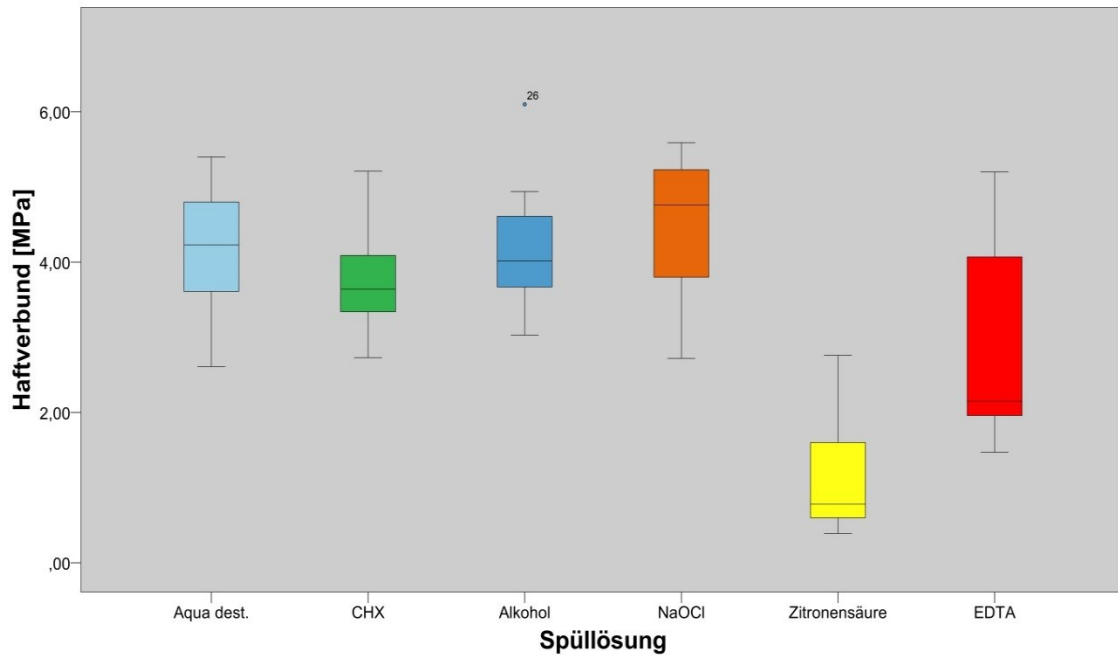


Abb. 11: Boxplot-Diagramm der ermittelten Haftverbundwerte von *TotalFill BC Sealer* nach Pullout-Analyse in Abhängigkeit der eingesetzten Spüllösungen

Das Boxplot-Diagramm stellt den Medianwert, Minimal- und Maximalwert, Interquartilbereich und milde und extreme Ausreißer, sofern sie auftreten, visuell dar. Somit können Lage und Verteilung der Werte abgelesen werden.

Die horizontale Linie innerhalb der bunten Boxen markiert die Lage des Medians (50 %-Perzentil), während die untere Grenze der Box das 25 %-Perzentil und die obere Grenze das 75 %-Perzentil der jeweiligen Spüllösung kennzeichnet. Somit werden innerhalb der Box die mittleren 50 % der Werte dargestellt, dies entspricht dem Interquartilbereich. Die kleineren Querstriche oberhalb und unterhalb der Box veranschaulichen den größten bzw. kleinsten Wert der jeweiligen Spüllösung, der noch keinen Ausreißer oder Extremwert darstellt. Als Ausreißer werden Werte definiert, deren Entfernung zur Box zwischen dem 1,5-fachen und dem 3-fachen der Boxhöhe beträgt. Extremwerte sind Werte, die um mehr als das 3-fache der Boxhöhe entfernt von dem 25 %-Perzentil bzw. dem 75 % Perzentil liegen. Für diesen Pullout-Versuch existierte nur bei Alk ein Ausreißer bei 6,10 MPa. Außerdem kann aus dem Boxplot-Diagramm abgelesen werden, dass die Werte der Pullout-Kraft für CHX, Alk, Citro und EDTA im oberen Bereich, also zwischen dem Median und dem größtem Wert, mehr

streuten, wohingegen für Aqua dest. und NaOCl die Werte im unteren Bereich zwischen dem Median und dem kleinstem Wert, mehr streuten.

5.2 Analyse auf Normalverteilung

Shapiro-Wilk-Test

Die Normalverteilung ist Grundvoraussetzung für die Zuverlässigkeit parametrischer Tests. Der Shapiro-Wilk-Test ist ein Signifikanztest, der prüft, ob eine signifikante Abweichung zur Normalverteilung vorliegt. Verglichen beispielsweise mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test zeichnet sich der Shapiro-Wilk-Test insbesondere bei der Überprüfung kleinerer Stichproben mit $n < 50$ durch seine höhere Teststärke aus. Der Shapiro-Wilk-Test überprüft die Nullhypothese, dass eine gegebene Verteilung normalverteilt ist, indem eine Wahrscheinlichkeit errechnet wird, mit der das Zurückweisen dieser Hypothese falsch ist. Wird bei diesem Test eine Signifikanz festgestellt ($p \leq 0,05$), so liegt keine Normalverteilung vor und die Zahlenreihen stammen somit nicht aus derselben Verteilung. Bei einem Signifikanzwert von $p > 0,05$ liegt eine Normalverteilung vor.

In der hier vorliegenden *In-vitro*-Studie lag innerhalb aller Gruppen der Spüllösungen Normalverteilung vor (siehe Signifikanzwerte Tab. 5).

5.3 Parametrische Analyse

5.3.1 Varianzanalyse und Gleichheit der Mittelwerte

Levene-Test

Der Levene-Test als Varianzhomogenitätstest war nicht signifikant ($p= 0,210$), woraus sich die Varianzhomogenität für die erhobenen Werte ergab.

Welch-Test

Der Welch-Test als Signifikanztest zur Bestimmung der Mittelwertgleichheit in den Gruppen war signifikant und zeigte, dass in dieser Studie keine Mittelwertgleichheit vorlag ($p < 0,001$). Somit lagen laut diesem robusten Testverfahren zur Gleichheit der Mittelwerte signifikante Unterschiede zwischen den sechs Gruppen der Spüllösungen vor.

ANOVA

Die OneWay-ANOVA-Analyse zeigte signifikante Unterschiede zwischen den sechs verschiedenen verwendeten Spüllösungen bezüglich der Pullout-Kraft ($p < 0,001$).

Post-hoc-Tests

Bei den Post-hoc-Tests handelt es sich um paarweise Mehrfachvergleiche der Mittelwerte. Mit diesem Signifikanztest wird festgestellt, welche Mittelwerte sich signifikant voneinander unterscheiden. In diesem Fall wurde der Post-hoc-Test nach Scheffé durchgeführt.

Tab. 6: Statistische Analyse mittels Post-hoc-Tests nach Scheffé

Signifikanzwert	Aqua dest.	CHX	Alk	NaOCl	Citro	EDTA
Aqua dest.		0,963	1,000	0,991	< 0,001*	0,055
CHX	0,963		0,948	0,707	< 0,001*	0,337
Alk	1,000	0,948		0,995	< 0,001*	0,046*
NaOCl	0,991	0,707	0,995		< 0,001*	0,009*
Citro	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*		0,018*
EDTA	0,055	0,337	0,046*	0,009*	0,018*	

(Werte mit * = signifikante Unterschiede)

Die Post-hoc-Analyse zeigte signifikant schlechtere Haftwerte für den *TotalFill BC Sealer* nach Spülung mit Zitronensäure gegenüber allen anderen eingesetzten endodontischen Spüllösungen (siehe Tab. 6). Ferner zeigten sich nach Spülung mit EDTA signifikant geringere Haftwerte gegenüber Alkohol und NaOCl.

5.4 Analyse des Frakturmodus

Tab. 7: Fraktographisch analysierter Frakturmodus der Spreader nach erfolgtem Pull-out-Versuch

	adhäsiv Dentin/Sealer	adhäsiv Sealer/Spreader	kohäsiv	Gemischt
Aqua dest.	1	0	2	7
CHX	0	0	0	10
Alk	0	1	3	6
NaOCl	0	0	1	9
Citro	1	0	2	7
EDTA	0	0	1	9

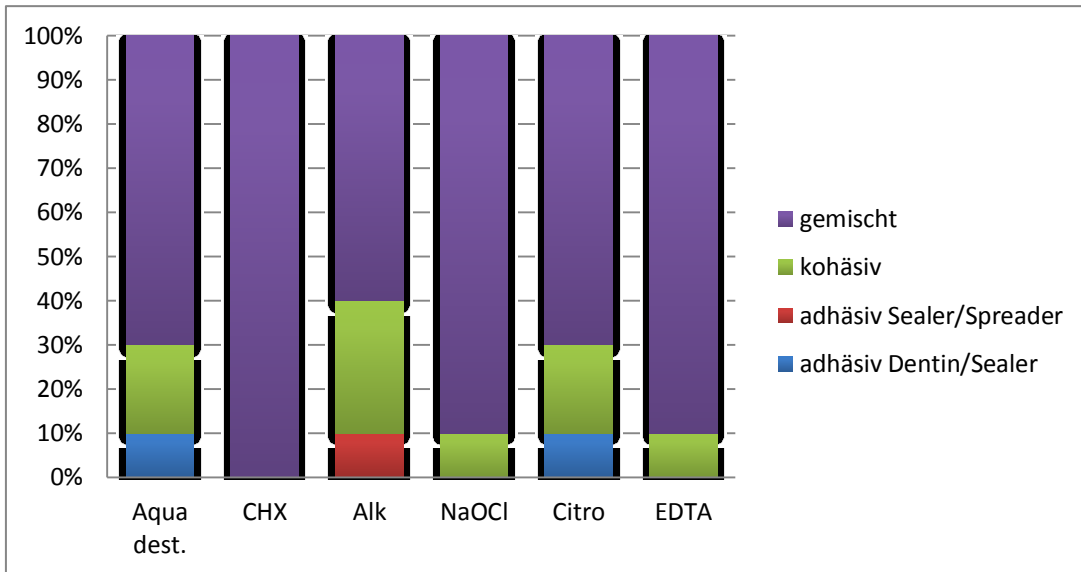


Abb. 12: Frakturmodi innerhalb der einzelnen Gruppen

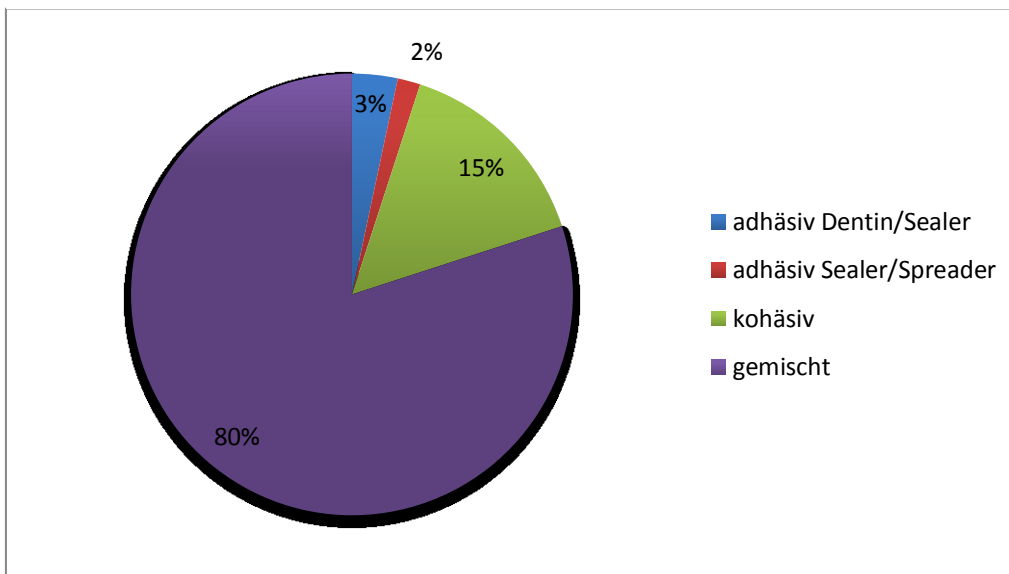


Abb. 13: Gesamtverteilung der Frakturmodi

Die fraktographische Analyse der extrudierten Spreader nach dem Pull-out-Versuch zeigte, dass es sich bei 80 % der Spreader um einen gemischten Frakturmodus, also eine Kombination von mindestens zwei Frakturmodi, handelte. Kohäsive Frakturen traten zu 15 %, adhäsive Frakturen an der Grenzfläche von Sealer und Dentin zu 3 % und adhäsive Frakturen an der Grenzfläche von Sealer und Spreader zu 2 % auf

(Abb. 4). Auch innerhalb der Gruppen der einzelnen Spüllösungen war der gemischte Frakturmodus am häufigsten vertreten (Tab. 7 und Abb. 12).

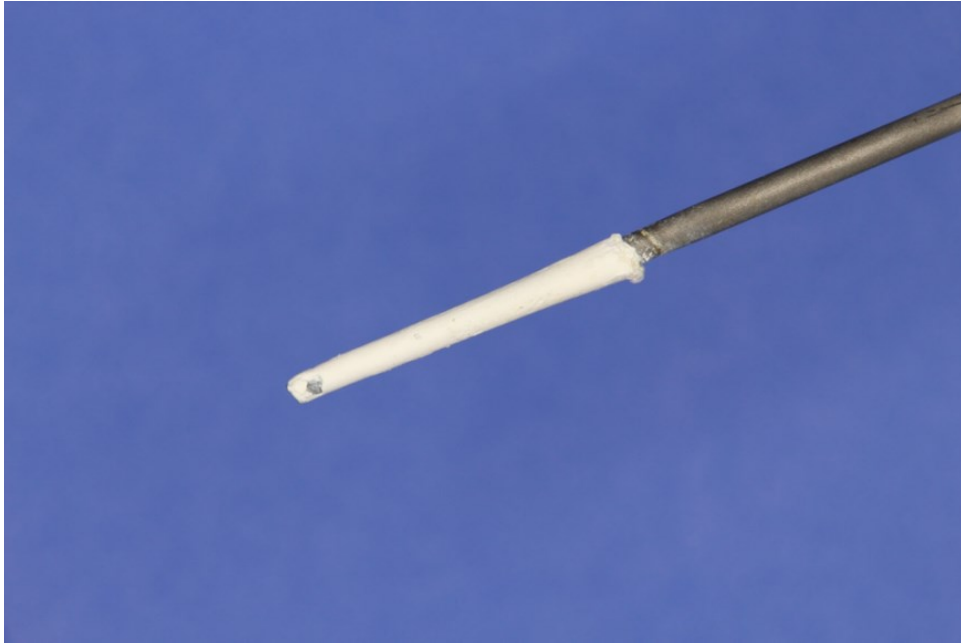


Abb. 14: Exemplarische Darstellung des adhäsiven Frakturmodus Dentin/Sealer



Abb. 15: Exemplarische Darstellung des adhäsiven Frakturmodus Sealer/Spreader



Abb. 16: Exemplarische Darstellung des kohäsiven Frakturmodus

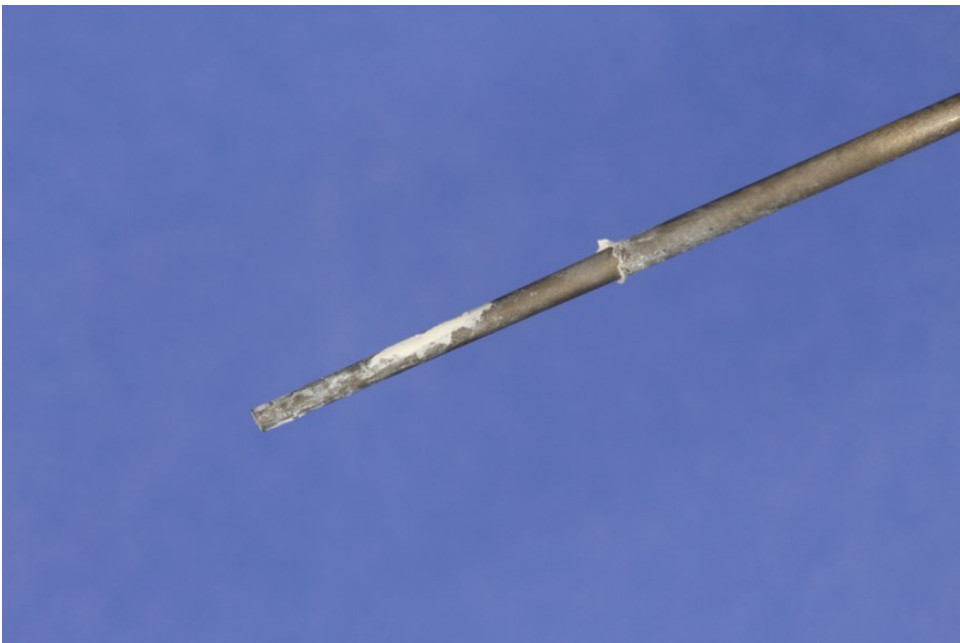


Abb. 17: Exemplarische Darstellung des gemischten Frakturmodus

5.5 Korrelationsanalyse

Spearman-Test

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen zwei Variablen zu prüfen, wurde im Rahmen der Korrelationsanalyse der Spearman-Test durchgeführt. Der Koeffizient (Spearman rho), also das Zusammenhangsmaß, kann zwischen -1 und +1 liegen. Je näher der Koeffizient an Null reicht, desto weniger stark ausgeprägt ist der Zusammenhang.

Für die Korrelation zwischen Haftverbund und Frakturmodus ergab sich ein Koeffizient von 0,074 und keine Signifikanz ($p=0,572$). Für die Korrelation zwischen Spüllösung und Frakturmodus lag der Koeffizient bei 0,001 und es lag auch hier keine Signifikanz vor ($p=0,993$). Somit gab es weder einen Zusammenhang zwischen der Höhe des Haftverbunds und des Frakturmodus, noch lag ein Zusammenhang zwischen der verwendeten Spüllösung und dem Frakturmodus vor.

Tab. 8: Korrelationsanalyse nach Spearman: Scherfestigkeit (Haftverbund) * Frakturmodus (Versagensmodus)

			Pullout-Kraft (MPa)	Versagensmodus
Spearman- rho	Pullout-Kraft (MPa)	Korrelationskoeffizient	1,000	0,074
		Signifikanz (p)	.	0,572
		N	60	60
	Versagensmodus	Korrelationskoeffizient	0,074	1,000
		Signifikanz (p)	0,572	.
		N	60	60

Tab. 9: Korrelationsanalyse nach Spearman: Einflussfaktor (Spüllösung) * Frakturmodus (Versagensmodus)

			Spüllösung	Versagensmodus
Spearman- rho	Spüllösung	Korrelationskoeffizient	1,000	0,001
		Signifikanz (p)	.	0,993
		N	60	60
	Versagensmodus	Korrelationskoeffizient	0,001	1,000
		Signifikanz (p)	0,993	.
		N	60	60

6 Diskussion

6.1 Standardisierung und Vergleichbarkeit der Methodik

Das Ziel dieser vorliegenden *In-vitro*-Studie war die Bestimmung des Einflusses verschiedener Spüllösungen auf den Haftverbund von *TotalFill BC Sealer* zum Wurzelkanalentin. Voraussetzung für eine solche Studie ist, dass eine möglichst optimale Standardisierung erzielt wird. Daher kamen zur Vorbereitung und Durchführung dieser Studie wissenschaftlich bewährte Standards zur Anwendung, um störende oder beeinflussende Variablen weitestgehend ausschließen zu können. Bereits die Auswahl der für die Studie notwendigen 60 Zähne sollte eine hohe Vergleichbarkeit ermöglichen. Es wurden ausschließlich einwurzelige Zähne mit geradem Wurzelkanalverlauf und rundem Kanalquerschnitt verwendet, die im Anschluss alle auf eine Länge von 10 mm gekürzt wurden. Eine vorherige röntgenologische Analyse sollte eventuelle Inkongruenzen von Kanalkonizität und Stiftkonizität ausschließen. Um möglichst realistische Ergebnisse bezüglich der Haftfestigkeit des Sealers zu erlangen, war es auch zwingend notwendig humane Zähne und keine Modelle von Zähnen zum Beispiel aus Kunststoff zu verwenden. Humane Zähne besitzen Dentintubuli, die die Ausbildung eines Haftverbundes des Sealers zum Wurzelkanalwandentin unterstützen. Kritisch zu betrachten ist allerdings die Tatsache, dass Probenzähne unterschiedlichen Alters verwendet wurden. Altersbedingte Veränderungen des Dentins wie Sklerosierungen und eine damit verbundene Verengung der Dentintubuli, Tertiärdentinbildung und Mikrorisse können somit womöglich den Haftverbund beeinflussen und somit zu einer nicht standardisierbaren Variable werden (Bürklein et al. 2013). Allerdings kann dem entgegen gehalten werden, dass der eingesetzte Wurzelkanalsealer allerdings auch nicht für eine spezifische Altersklasse von Zähnen entwickelt wurde und im Datenblatt hier keine entsprechenden Hinweise vorhanden sind. Somit sind also alle Altersklassen zulässig und wurden hier nicht getrennt untersucht.

Bei allen Zähnen wurde der Gleitpfad mit *C-PILOT*-Feilen und *K-Reamern* hergestellt. Die Arbeitslänge wurde einheitlich auf 8 mm festgelegt. Auch die maschinelle Präparation der Wurzelkanäle mit dem vollrotierenden Feilensystem *BioRaCe*

(FKG Dentaire) bis zur Instrumentengröße .02/#60 (BR7) mit dem drehmomentbegrenzten Aufbereitungsmotor *EndoPilot* (Schlumbohm) erfolgte gemäß der Herstellerangaben und schuf eine vergleichbare Ausgangssituation. Die Zwischenspülungen erfolgten immer mit exakt 1 ml *Aqua dest.* (Ampuwa, Fresenius Kabi). Anschließend wurden die 60 Probenzähne randomisiert in 6 Gruppen gleicher Gruppenstärke (n=10) verteilt. Entsprechend ihrer Zuordnung wurden die Wurzelkanäle dann mit einer identischen Menge (exakt 5 ml) der entsprechenden gruppenspezifischen Spüllösung gespült und zuletzt mit einheitlichen formkongruenten Papierspitzen (.02/#60) getrocknet. Die zur Obturation des Wurzelkanalsystems verwendeten Stahlspreader waren normiert und besaßen eine ISO-Größe 60. Die konischen Spreader wurden verwendet, um Guttapercha als Schwachstelle auszuschließen, da diese im Rahmen des Pullout-Versuches aufgrund der zu erwartenden Kräfte reißen würden. Um Bedingungen zu schaffen, die mit der intraoralen Situation *in vivo* vergleichbar sind, wurden die Probenzähne einzeln in je einem Eppendorf-Gefäß in einem Thermoschrank bei 37°C und 95 % Luftfeuchtigkeit durch die Zugabe von mit *Aqua dest.* getränkten Pellets gelagert.

6.1.1 Analyse des Haftverbunds

Folgende *In-vitro*-Testverfahren, um die Haftfestigkeit zu bestimmen, stehen in der Adhäsivtechnik zur Verfügung (Frankenberger 2001):

1. Scherversuch (Shear-bond-Test)
2. Zugversuch (Pull-out-Test)
3. Ausstoßversuch (Push-out-Test)
4. Mikrozugversuch A & B (Microtensile-Verfahren A & B)

Bei einem Scherversuch wird ein Zylinder aus Füllungsmaterial auf eine eingeebnete Zahnfläche aufpolymerisiert und horizontal abgeschert. Bei dem Zugversuch wird dieser Zylinder von der Zahnfläche abgezogen. Bei einem Ausstoßversuch wird eine Kavität in einer Dentinscheibe gefüllt und diese Füllung ausgestoßen. Bei dem Mikrozugversuch A wird eine Haube aus Füllungsmaterial auf eine eingeebnete Zahnfläche aufpolymerisiert, der Zahn in Scheiben geschnitten und anschließend ein

sanduhrförmiger Prüfkörper präpariert. Bei dem Mikrozugversuch B wird der Zahn mit dieser Haube aus Füllungsmaterial in Scheiben geschnitten und anschließend in Stäbchen (Frankenberger 2001; Goracci et al. 2004).

Verglichen mit dem Mikrozugversuch ist der Push-out-Test eine zuverlässigere Methode zur Bestimmung der Haftfestigkeit zwischen Wurzelkanalfüllmaterial respektive Stift und Wurzelkanalentin, da es bei dem Mikrozugversuch schon während der Probenvorbereitung häufig zu frühzeitigem Versagen des Haftverbundes und damit verbunden zu einer großen Datenvariabilität kommt (Goracci et al. 2004). Sowohl für den Push-out-Test, als auch für die Mikrozugversuche, wird die abgefüllte Zahnwurzel in 1 mm dicke Dentinscheiben geschnitten. Somit lassen sich mit diesem Test auch die regionalen Unterschiede bezüglich der Haftfestigkeit innerhalb des Wurzelkanals untersuchen. Außerdem sind die relativ flachen Dentinscheiben nicht dem normalerweise innerhalb des intakten Wurzelkanals herrschenden Schrumpfstress und Zugangsproblemen ausgesetzt (Goracci et al. 2004; Bouillaguet et al. 2003).

Um die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* zu bestimmen, wurde in der vorliegenden *In-vitro*-Studie ein Pull-out-Test nach Ebert et al. (2011) durchgeführt. Hierbei werden silikatisierte und silanisierte normierte, auf die erforderliche Größe angepasste Stahlspreader verwendet, die senkrecht, parallel zur Längsachse des Wurzelkanals, aus der Probe herausgezogen werden. Damit kann zum einen eine Verformung respektive ein Zerreißen von Guttapercha und somit ein verfälschtes Ergebnis ausgeschlossen werden, zum anderen mit dem Versuch, entsprechend der klinischen Situation, die Gesamtlänge des Wurzelkanals erfasst werden (Ebert et al. 2011). Zudem können dadurch potentielle Artefakte sowie ein vorzeitiges Versagen des Haftverbundes durch technisch aufwändige Probenherstellung und damit Ausscheiden der Proben vermieden werden, da die Zahnwurzel nicht zusätzlich in Scheiben geschnitten wird (Ebert et al. 2011). Im Rahmen der vorliegenden *In-vitro*-Studie wurden die Stahlspreader mit *CoJet Sand (3M ESPE)* abgestrahlt und hierdurch angeraut. Durch die SiO₂-Beschichtung der Al₂O₃-Partikel erfolgte somit simultan sowohl eine Anrauhung als auch eine Silikatisierung (tribochemische Beschichtung) der Stiftoberfläche (Frankenberger et al. 2000).

Die im Rahmen dieser Studie verwendete Single-Cone-Obturationstechnik mittels normierter Stahlspreader garantiert nach Wu et al. eine möglichst gleichmäßige und

hohe Sealerpenetration an der Dentinoberfläche (Wu et al. 2000). D’Arcangelo et al. zeigten, dass sowohl zu dünne als auch zu dicke Schichtstärken eines Befestigungsmaterials die Haftwerte beim Pullout-Versuch negativ beeinflussen, wobei es sich in der Studie von D’Arcangelo et al. jedoch um das selbstadhäsive Befestigungskomposit *Panavia* handelt (D’Arcangelo et al. 2007). Pane et al. zeigten für Sealer auf Epoxidharz-Basis und Sealer auf Polymethacrylat-Harz-Basis eine signifikant höhere Zugfestigkeit und Scherfestigkeit bei dünnen Sealerschichtstärken (Pane et al. 2012). Im Rahmen dieser *In-vitro*-Studie wurde durch einheitliche Wurzelkanalpräparation und Obturation mit formkongruenten Spreadern versucht eine möglichst identische Sealerschichtstärke zu erreichen. Dennoch können schwankende Sealerschichtstärken eine mögliche Erklärung für erhöhte Standardabweichungen sein. Im Gegensatz zur flexiblen Guttapercha, die als Stift auch kleinsten Kanalabweichungen problemlos folgen kann und zudem auch deformierbar ist, sind die Stahlspreader starr und erfordern daher eine optimale Instrumentierung des Wurzelkanals, um die Bedingungen der Passung und Zentrierung zu erreichen, wenn solche Stifte zur Simulation einer Wurzelkanalfüllung eingesetzt werden. Daher wurde nach der maschinellen Aufbereitung der Wurzelkanal abschließend noch einmal mit einer K-Feile ISO 60 kontrolliert und falls erforderlich nachinstrumentiert.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Medianwerte der Pullout-Kraft (MPa), die aufgebracht werden musste, um die Spreader aus dem Wurzelkanal zu extrudieren, lagen zwischen 4,76 MPa für NaOCl und 0,78 MPa für Zitronensäure. Es fiel auf, dass die Medianwerte für NaOCl (4,76 MPa), Aqua dest. (4,23 MPa), CHX (3,64 MPa) und Alkohol (4,02 MPa) eng beieinander lagen, wobei für EDTA (2,15 MPa) und Zitronensäure (0,78 MPa) deutlich weniger Kraft aufgewendet werden musste, um die Spreader aus dem Wurzelkanal zu ziehen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass im Falle von Zitronensäure und EDTA der Haftverbund des *TotalFill BC Sealers* zum Wurzelkanaldentin und/oder zum Spreader schwächer gewesen sein muss als bei NaOCl, CHX, Alkohol und Aqua dest.. Dies wurde durch die statistische Analyse mittels OneWay-ANOVA sowie den nachfolgenden Post-hoc-Analysen bestätigt.

Der Haftverbund nach Spülung mit Zitronensäure war somit signifikant schlechter als nach allen anderen Spüllösungen, zudem noch signifikant schlechter als nach Spülung der Kanäle mit EDTA. Die Spülung mit Zitronensäure vor der Obturation des Wurzelkanals führte also zum niedrigsten Haftverbund im Rahmen dieser Studie.

Endodontische Spüllösungen auf Basis von Chelatoren wie EDTA und Zitronensäure bewirken eine Demineralisierung respektive eine Dekalzifizierung des Dentins, indem sie stabile Komplexe mit Calcium aus der mineralischen Substanz des Dentins bilden. Chemisch gesehen finden nebeneinander die Komplexbildung mit Calcium und eine Protonierung des Dentins statt (Hülsmann et al. 2003). Bezogen auf dentale Adhäsivsysteme zeigten Perdigao et al., dass die Bindung an kalzifiziertes Dentin signifikant besser war als an durch EDTA vorbehandeltem dekalzifiziertem Dentin (Perdigao et al. 2001). In den Dentintubuli verbliebenes restliches EDTA, das laut Zurbriggen et al. bei bis zu 3,8 % des Originalvolumens betragen kann, könnte zusätzlich mit dem Sealer interagieren und so den Haftverbund zwischen Wurzelkanaldentin und Sealer negativ beeinflussen (Zurbriggen et al. 1975). Lee et al. erklärten, allerdings bezogen auf *MTA*, dass das restliche im Wurzelkanalsystem verbliebene EDTA Chelatkomplexe mit dem Calcium bilden könnte, welches während der Hydratationsreaktion von *MTA* freigegeben wird und somit die Abbindereaktion von *MTA* stört (Lee et al. 2007). Die geringen Haftwerte für Zitronensäure und EDTA in der hier vorliegenden *In-vitro*-Studie deuten stark darauf hin, dass die Dekalzifizierung des Wurzelkanaldentins und womöglich auch im Wurzelkanalsystem verbliebene Reste von Zitronensäure und EDTA den Haftverbund zum *TotalFill BC Sealer* negativ beeinflussen.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass bei Verwendung des *TotalFill BC Sealers* durch vorherige Spülung mit NaOCl die beste Haftfestigkeit des Sealers zum Wurzelkanaldentin und zum Spreader erreicht wurde, knapp gefolgt von Aqua dest, CHX und Alkohol. In dieser *In-vitro*-Studie wurde allerdings immer nur die Verwendung einer einzelnen Spüllösung untersucht und nicht berücksichtigt, dass im Rahmen der endodontischen Behandlung zahlreiche verschiedene endodontische Spülprotokolle zur Anwendung kommen können, um die positiven und erwünschten Eigenschaften der Spüllösungen miteinander zu kombinieren. Hierzu sind zukünftig weitere Untersuchungen erforderlich. Dennoch war der Einsatz von jeweils einer einzigen

Spüllösung pro experimenteller Gruppe beabsichtigt, um den Effekt jeder einzelnen Spülung ohne einen Überlagerungseffekt durch andere Spüllösungen im Rahmen eines Spülprotokolls zu erhalten und so eine Aussage über den Effekt der jeweiligen Spüllösung auf den Haftverbund machen zu können. Von der Verwendung von Zitronensäure und EDTA als alleiniger Spülung vor der Obturation mit dem *TotalFill BC Sealer* ist aufgrund der hier vorliegenden Ergebnisse eher abzuraten.

Tennert und Zehnder berichten von einer Demineralisation des Dentins und Herabsetzung der Härte und des Elastizitätsmoduls der mineralischen Komponenten des Dentins bei längerer Einwirkdauer von EDTA (Tennert 2013; Zehnder 2006). Auch Calt & Serper beschrieben, dass eine zehnminütige Applikation von 17 % EDTA zu exzessiven peritubulären und intertubulären Dentinerosionen führt und empfahlen daher EDTA nicht länger als eine Minute anzuwenden (Calt et al. 2002). Im Falle der vorliegenden *In-vitro-Studie* wurde aber nur recht kurz mit 5 ml EDTA gespült, so dass die Spüldauer in dieser *In-vitro-Studie* vermutlich nicht die schlechten Haftwerte nach Spülung mit EDTA erklären kann.

Bei der Diskussion der Ergebnisse dieser *In-vitro-Studie* ist außerdem zu berücksichtigen, dass aus technischen Gründen normierte Stahlspreader verwendet wurden und nicht, wie unter klinischen Bedingungen für die Wurzelkanalfüllung üblich, Guttapercha. Da aufgrund der Wurzelkanallänge und der daraus resultierenden effektiven Haftfläche im Rahmen des Pullout-Versuches höhere Kräfte notwendig waren, um den Spreader aus dem Wurzelkanal zu extrudieren, wäre das deformierbare Guttapercha schon vor der Extrusion aus dem Wurzelkanal gerissen. Faktoren wie etwa die Oberflächenbeschaffenheit der Stahlspreader respektive von Guttapercha sind Variablen, die die Ergebnisse dieser Studie vermutlich nicht ganz exakt auf die Qualität des Haftverbundes durch Obturation mit Guttapercha übertragen lassen. Dennoch zeigen die Ergebnisse dieser *In-vitro-Studie* einen klaren Trend.

Zudem sollte bedacht werden, dass trotz intensiver Trocknung der Wurzelkanäle mit formkongruenten Papierspitzen möglicherweise Rückstände der verwendeten Spülflüssigkeiten im Wurzelkanalsystem verbleiben könnten, die einen Einfluss auf die Haftfestigkeit des Sealers haben könnten. EDTA zum Beispiel besitzt die Fähigkeit, Sealer aufzulösen und somit den Haftverbund zu schwächen (Keleş et al. 2009), wobei dies für den *TotalFill BC Sealer* bis dato noch nicht untersucht wurde. Auch Roggendorf

et al. bestätigten einen Zusammenhang zwischen der Dichtigkeit der Wurzelfüllung und der Kontamination mit verbliebenen Spülflüssigkeiten. Hierbei war der Einfluss der Kontamination mit Spülflüssigkeit abhängig vom verwendeten Sealer und der verwendeten Spüllösung. Somit war in spülflüssigkeitskontaminierten Wurzelkanälen das Abdichtungsvermögen des Sealers stark von der Wahl des verwendeten Sealers abhängig (Roggendorf et al. 2005).

Auch die Feuchtigkeit des Dentins hat einen Einfluss auf die Adhäsion des Sealers zum Wurzelkanalentin. Verglichen mit *AH Plus*, *Epiphany* und *MTA Fillapex* zeigte *iRoot SP* in einem Push-out-Versuch die höchste Haftfestigkeit zum Wurzelkanalentin ungeachtet der Restfeuchtigkeit des Dentins. Höchste respektive niedrigste Haftfestigkeit zeigte *iRoot SP* allerdings unter feuchten respektive nassen Bedingungen (Nagas et al. 2012).

6.2.1 Haftfestigkeit

Die Haftfestigkeit des *iRoot SP* Sealers zum Wurzelkanalentin wurde auch von Sagsen et al., allerdings in einem Push-out-Versuch, begutachtet. *iRoot SP* in Verbindung mit Guttapercha hatte signifikant höhere Haftfestigkeitswerte als *MTA Fillapex (Angelus)*, ein weiterer neuer Sealer auf Calciumsilicat-Basis (Sagsen et al. 2011), welcher laut Herstellerangaben jedoch nur 13 % MTA enthält und somit materialtechnisch eher einem mit MTA-Partikeln angereicherten Calciumsalicylat-Sealer entspricht.

Oliveira et al. zeigten allerdings, dass der *iRoot SP* Sealer und *MTA Fillapex* eine signifikant geringere Push-out-Kraft zum Wurzelkanalentin aufwiesen als *AH Plus* und *MTA*. (Oliveira et al. 2016). Unabhängig von der verwendeten endodontischen Spüllösung zeigte der *iRoot SP* Sealer in der Studie von Tuncel et al. *in vitro* eine signifikant höhere Push-out-Haftfestigkeit verglichen mit *AH Plus*. Bei beiden Sealern erhöhte die Verwendung von Spüllösungen auf Chelatorenbasis, beispielsweise EDTA, die Haftfestigkeit zum Wurzelkanalentin, allerdings nicht signifikant (Tuncel et al. 2015).

Ersahan et al. untersuchten, ebenfalls in einem Push-out-Versuch, den Widerstand des *iRoot SP* Sealers gegen Dislokation, also die Haftfestigkeit. *iRoot SP* und *AH Plus* präsentierten hier ähnliche und signifikant höhere Haftfestigkeiten als *Sealapex* und *EndoREZ*, wobei in diesem Versuch die Wurzelkanalkavitäten nur mit Sealer und nicht

noch zusätzlich mit einem Kernmaterial gefüllt wurden und alle Proben standardisiert mit NaOCl, EDTA und anschließend destilliertem Wasser gespült wurden. Ein Grund für die hohe Haftfestigkeit mag in der extrem kleinen Partikelgröße des *iRoot SP Sealers* begründet sein, die es ihm erlaubt, gut in die Dentintubuli, laterale Kanäle und Verzweigungen eindringen zu können (Ersahan et al. 2010).

Auch Yap et al. zeigten *in vitro* für den *TotalFill BC Sealer* eine mit *AH Plus* vergleichbare Push-out-Kraft zum Wurzelkanalentin, die höher war als für *EndoREZ*. Die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* war 3 Monate nach der Obturation höher als 2 Wochen nach Obturation und zeigte somit eine zeitabhängige Steigerung des Haftverbunds (Yap et al. 2017).

Im Rahmen *des in vitro* durchgeführten Push-out-Tests von Madhuri et al. war der *EndoSequence BC Sealer* allen anderen getesteten Sealern mit der höchsten Haftfestigkeit zum Wurzelkanalentin signifikant überlegen (*MM-Seal* (Sealer auf Epoxidharz-Basis) > *Hybrid Root Seal* (dualhärtender Sealer auf Epoxidharz-Basis) > *MTA Fillapex*) (Madhuri et al. 2016).

6.2.2 Frakturmodus

Zu 80 % handelte es sich bei dem ermittelten Frakturmodus der extrudierten Spreader um eine gemischte Fraktur, also eine Kombination von mindestens zwei verschiedenen Frakturmodi. Die Schlussfolgerung, dass es sich um eine gemischte Fraktur handelte, ergab sich in etwa gleicher Häufigkeit aus allen möglichen Kombinationen der drei Frakturmodi (adhäsiv zum Dentin, adhäsiv zum Spreader, kohäsiv).

Sealerbedeckte Areale auf dem Spreader mit einer dadurch ermittelten adhäsiven Fraktur zum Dentin können möglicherweise durch Schwankungen bezüglich der Dentin-beschaffenheit innerhalb des Wurzelkanals begründet sein. Das Dentin besitzt tubuläre und atubuläre Anteile (Pashley et al. 1994). Nur in tubulären Anteilen des Dentins ist die mechanische Verankerung in die Dentintubuli durch Ausbildung von Sealertags möglich.

Eine adhäsive Fraktur zum Spreader entsteht womöglich auch aufgrund der geringen Konizität des Spreaders (2 %). Trotz optimaler Positionierung der Proben in der Universaltestmaschine wären im Rahmen des Pull-out-Versuchs möglicherweise nicht exakt achsengerechte Extrusionen der Spreader und somit eine einseitige Berührung

der Wurzelkanalwand und ein damit verbundenes Abstreifen des Sealers vom Spreader nicht auszuschließen.

Liegt eine kohäsive Fraktur vor, deutet dies auf einen schwächeren Verbund innerhalb des Sealers hin respektive bedeutet dies, dass die Adhäsion sowohl zum Dentin als auch zum Spreader größer ist, als die Verbundfestigkeit innerhalb des Sealers.

Aufgrund der unterschiedlichen Lokalisation unterschiedlicher Frakturmodi auf den Spreadern konnte keine Gesetzmäßigkeit festgestellt werden.

Der in dieser Studie ermittelte überwiegend vorherrschende gemischte Frakturmodus ließ keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Ursache für den Verlust der Haftfestigkeit zu und war in allen Gruppen der dominante Frakturmodus.

Die Korrelationsanalyse nach Spearman zeigte, dass weder eine Korrelation zwischen dem Frakturmodus und der verwendeten Spüllösung noch eine Korrelation zwischen dem Frakturmodus und der Höhe des Haftverbunds vorlag (siehe Tab. 8 und Tab. 9).

6.2.3 Smear layer

Die Haftfestigkeit des *EndoSequence BC Sealers* zum Wurzelkanaldentin wird nicht signifikant von dem Vorhandensein oder Fehlen der Schmierschicht beeinflusst (Sagsen et al. 2011). Die Schmierschicht wurde erstmals 1975 von McComb als eine aus Dentin, nekrotischem und vitalem Gewebe, inklusive Odontoblastenfortsätzen, Pulpagewebe und Bakterien bestehende, primär anorganische Schicht beschrieben, die nach der Instrumentierung der Wurzelkanalwand aufliegt (McComb et al. 1975). Im Allgemeinen wird der Einfluss des Smear layers auf den Haftverbund zwischen Dentin und Sealer immer noch kontrovers diskutiert. White et al. maßen der Abwesenheit des Smear layers eine erhöhte Penetration des Sealers in die Dentintubuli bei, verbunden mit einer erhöhten Verbindungsfläche zwischen dem Sealer und dem Dentin. Dies verbessere die Eigenschaft des Sealers apikale und koronale Undichtigkeiten zu verhindern und könnte die Retention des Sealers durch diese mechanische Verbindung verbessern (White et al. 1984). Saleh et al. sahen allerdings keinen Zusammenhang zwischen der Penetration des Sealers in die Dentintubuli nach Entfernung der Schmierschicht und einer erhöhten Haftfestigkeit. In ihrer *In-vitro*-Studie wurden die höchsten Haftwerte beschrieben, wenn die Schmierschicht nicht entfernt wurde (Saleh et al. 2003). Vermutlich reagierten in diesen Fällen die Sealer vor allem mit der

Oberfläche der Schmierschicht (Lee et al. 2002). Timpawat et al. beschrieben sogar eine signifikant erhöhte Mikroleakage im apikalen Bereich des obturierten Wurzelkanals nach Entfernung der Schmierschicht verglichen mit einer vorhandenen intakten Schmierschicht (Timpawat et al. 2001). Shahravan et al. wiederum bestätigten, dass die Entfernung der Schmierschicht unabhängig vom verwendeten Sealer den flüssigkeitsdichten Verschluss des Wurzelkanalsystems verbesserte (Shahravan et al. 2007). Zudem wurde durch die Entfernung der Schmierschicht eine deutlich gründlichere Desinfektion des Wurzelkanalsystems erreicht (Violich et al. 2010).

6.3 Abschlussbewertung: Prüfung der Arbeitshypothesen

Arbeitshypothese 1:

Die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* zum Wurzelkanalentin zeigt signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen endodontischen Spüllösungen.

Im Rahmen der vorliegenden *In-vitro*-Studie ergab die statistische Auswertung signifikante Differenzen hinsichtlich der Extrusionskraft der mittels *TotalFill BC Sealer* im Wurzelkanal zementierten Stifte in Abhängigkeit von der verwendeten endodontischen Spüllösung. Wurde vor der Obturation mit dem *TotalFill BC Sealer* der Wurzelkanal mit NaOCl gespült, wurde die höchste Haftfestigkeit erreicht, knapp gefolgt von Aqua dest, CHX und Alkohol. Eine Spülung mit Aqua. dest., Alkohol und NaOCl resultierte in einer signifikant höheren Haftfestigkeit gegenüber einer Spülung mit EDTA. Eine Spülung mit Zitronensäure zeigte gegenüber allen anderen Spüllösungen hingegen eine signifikant geringere Haftfestigkeit.

Die Arbeitshypothese 1 wird angenommen.

Arbeitshypothese 2:

Der Einsatz von Chelatoren als endodontische Spüllösung führt zu einer signifikanten Verschlechterung des Haftverbunds von *TotalFill BC Sealer*.

Die statistische Analyse zeigte, dass der Haftverbund nach Spülung mit Zitronensäure signifikant schlechter war als nach allen anderen Spüllösungen. Der Haftverbund nach Spülung mit EDTA war signifikant besser als nach Spülung mit Zitronensäure. Nach Spülung mit EDTA ergaben sich signifikant schlechtere Haftwerte als mit Alkohol und

NaOCl, aber keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Haftverbunds zu der Spülung mit Aqua dest. und CHX.

Die geringen Haftwerte für Zitronensäure und EDTA in der hier vorliegenden *In-vitro*-Studie deuten stark darauf hin, dass die Dekalzifizierung des Wurzelkanalodontins durch den Einsatz von endodontischen Spüllösungen auf Basis von Chelatoren und womöglich auch im Wurzelkanalsystem verbliebene Reste von Zitronensäure und EDTA den Haftverbund zum *TotalFill BC Sealer* negativ beeinflussen.

Die Arbeitshypothese 2 wird teilweise angenommen.

6.4 Klinische Relevanz

Ein stabiler Haftverbund zum Wurzelkanalodontin und zum Obturationsmaterial in statischen und dynamischen Situationen ist von immenser klinischer Bedeutung, da der Haftverbund eine interne Stabilisierung eines durch die Wurzelkanalinstrumentierung zentral geschwächten Zahnes bewirken kann und somit zum Zahnerhalt beitragen kann (Hedge et al. 2015, Ulusoy et al. 2017). Nur so kann der Zahn respektive besonders die Wurzel stabilisiert und vor möglicher Wurzelfraktur oder Fraktur des Pulpakammerbodens bei Belastung geschützt und somit eine mögliche Extraktion verhindert werden (Lang 2003). In vielen Fällen wird im Anschluss an die Obturation des Wurzelkanalsystems ein Glasfaserstift im Rahmen der postendodontischen Therapie inseriert (Edelhoff et al. 2003). Auch hierfür ist ein stabiler Haftverbund des Sealers zum Wurzelkanalodontin und zum Obturationsmaterial von außerordentlicher Bedeutung, damit durch die extrusiven Kräfte bei der Stiftkanalpräparation kein Dislodgement, also keine Ablösung, der gesamten Wurzelfüllung stattfindet, sondern nur der Platz für die Stiftinsertion geschaffen wird und die Wurzelfüllung im apikalen Bereich verbleibt (Edelhoff et al. 2003). Ein Dislodgement würde eine vollständige Neuobturation erforderlich machen und somit den Behandlungsablauf zeitlich und wirtschaftlich negativ beeinflussen, ebenso auch die für den Patienten durch eine solche zusätzliche Behandlung entstehenden Nachteile wie der Zeitaufwand sowie die hierdurch resultierende Strahlenbelastung, die durch eine erneut erforderlich werdende Wurzelkanalbehandlung entstehen

würde. Bei der Resektion der Wurzelspitze im Rahmen eines chirurgischen Eingriffs besteht ebenso die Gefahr des Dislodgements der Wurzelkanalfüllung, so dass eine Ablösung der Wurzelkanalfüllung durch die resultierenden Kräfte und Instrumente (Bohrer, Diamantschleifer oder piezochirurgische Instrumente) eintreten kann. Dies zeigt also die Bedeutung des Haftverbundes von Wurzelkanalsealern.

6.5 Fazit und klinischer Ausblick

In dieser *In-vitro-Studie* sollte der Einfluss verschiedener endodontischer Spüllösungen auf die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* mittels eines Pull-out-Versuchs untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem NaOCl als Spüllösung geeignet ist, da die Spülung mit dieser Lösung im höchsten Haftwert in dieser Studie resultierte. Somit kann NaOCl als endodontische Standardspüllösung ohne Einschränkung hinsichtlich des Erzielens eines hohen Haftverbundes von *TotalFill BC Sealer* eingesetzt werden. CHX, Aqua dest. und Alkohol zeigten geringere Haftwerte, die allerdings nicht signifikant niedriger waren als nach Spülung mit NaOCl. Somit können auch CHX, Aqua dest. und Alkohol als Spüllösungen uneingeschränkt für den Einsatz mit *TotalFill BC Sealer* empfohlen werden. Zitronensäure und EDTA scheinen für die Ausbildung eines hohen Haftverbundes eher ungeeignet, da sie diesen signifikant reduzierten. Die zuvor diskutierten Vorteile der Schmierschichtentfernung durch diese beiden Chelatoren müssen somit individuell betrachtet werden. Da in dieser *In-vitro-Studie* allein der Effekt von Einzelspülungen auf den Haftverbund analysiert wurde, sollte nachfolgend der Haftverbund nach Einsatz verschiedener endodontischer Spülprotokolle untersucht werden. Möglicherweise sind Chelatoren im Rahmen eines Spülprotokolls weniger problematisch, wobei allerdings bislang keine Belege hierfür existieren.

Allerdings sind bis dato auch noch viele Zusammenhänge unberücksichtigt, die im zahnärztlichen Alltag Anwendung finden. So wurden im Rahmen dieser *In-vitro-Studie* die Wurzelkanäle bis zur Instrumentengröße 60/.02 aufbereitet und im Sinne der Single-Cone-Technik obturiert. Prospektiv wäre es sicherlich interessant, in weiteren Studien den Einfluss der Aufbereitungsgröße sowie der Form und Konizität und den Einfluss der Obturationstechnik (laterale Kondensation, Warmfülltechniken) auf die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* zu untersuchen.

Es wurden zudem nur gerade Wurzelkanäle mit rundem Wurzelkanalquerschnitt verwendet. In Zukunft dürfte auch von Interesse sein, wie ein ovaler Wurzelkanalquerschnitt respektive ein stark gekrümmter Wurzelkanal den Haftverbund beeinflusst.

Auch die Wirkung einer im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung häufig verwendeten medikamentösen Einlage oder deren Rückständen auf die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* ist bisher nicht bekannt. Von den Haftwerten, die in der hier vorliegenden *In-vitro*-Studie für die CHX-Gruppe ermittelt wurden, kann zumindest ansatzweise darauf geschlossen werden, dass CHX als medikamentöse Einlage keine stärker negativen Effekte haben dürfte. Für Calciumhydroxid als medikamentöse Einlage wäre dessen kompliziertere Entfernbarkeit zu nennen, so dass hieraus resultierende Effekte genauer beleuchtet werden müssten. Auch die Alkalisierung des Dentins (Schäfer et al. 1999) und daraus entstehende Veränderungen wie Rissbildungen oder die Degradation des Kollagens könnten sich negativ auf den Haftverbund auswirken.

Zudem ist die Art der Trocknung des Wurzelkanals (Papierspitze, Absaugkanüle, Mikropüster, Heat Probe) als möglicherweise beeinflussender Faktor für die Haftfestigkeit des *TotalFill BC Sealers* bislang noch nicht untersucht worden (Tasdemir et al. 2014).

Zusätzlich wäre es sicherlich sinnvoll, die empfohlenen Spüllösungen (NaOCl, CHX, Aqua dest. und Alkohol) in das Datenblatt des *TotalFill BC Sealers* aufzunehmen, ebenso wie die Effekte noch zu untersuchender Spülprotokolle.

Ein geringerer Haftverbund kann außerdem auch ein Hinweis auf Probleme mit der Struktur des ausgehärteten Sealers sein, da beispielsweise die mechanische Festigkeit und die Härte des Sealers, zumindest an der Grenzfläche zum Dentin, negativ beeinflusst worden sein könnten. Hier dürfte möglicherweise auch die tubuläre Struktur des Dentins eine Rolle spielen, welche potenziell Reste der Spülflüssigkeiten enthalten könnte, die somit einen Einfluss auf die Aushärtung des Sealers bewirken könnten. Dieser Zusammenhang bedarf ebenfalls weiterer Untersuchung.

Verglichen mit *AH Plus*, dem aufgrund seiner physikochemischen Eigenschaften aktuellen Goldstandard in der Endodontie und daher gängigen Referenzmaterial in vielen Studien, verhält sich der *TotalFill BC Sealer* bezüglich seiner Eigenschaften,

insbesondere hinsichtlich seiner bioaktiven Eigenschaften, vielversprechend. Der frisch angemischte *TotalFill BC Sealer* war *in-vitro* weniger zytotoxisch als frisch angemischtes *AH Plus* (Zhou et al. 2015). Auch *ex vivo* zeigte sich *AH Plus* signifikant stärker zytotoxisch (Zhang et al. 2010). *TotalFill BC Sealer* überzeugte teilweise auch durch eine höhere Haftfestigkeit als *AH Plus* (Nagas et al. 2012), was jedoch von anderen Studien nicht bestätigt wurde (Dabaj et al. 2018).

Bezüglich der apikalen Versiegelungsfähigkeit verhielten sich *AH Plus* und *TotalFill BC Sealer* gleichwertig (Zhang et al. 2009). Aber auch hier stehen vergleichende Studien aus.

Es bleibt also weiterhin eine Herausforderung für die Endodontologie, durch optimale Kombination einer oder mehrerer geeigneter Spüllösungen, die keine negativen Effekte auf das Dentin haben sollten und einem idealen Sealer mit starker Haftfestigkeit eine optimale Wurzelfüllung zu generieren, die insgesamt einen dichten und frakturresistenten Monoblock zu Wurzelkanaldentin und Guttapercha generiert, welcher den Zahn langfristig stabilisieren kann und somit einen dauerhaften Zahnerhalt ermöglicht.

TotalFill BC Sealer ist in dieser Hinsicht bereits sehr vielversprechend, wenn auch noch nicht alle Zusammenhänge untersucht werden konnten und weiterer Analysen bedürfen.

7 Zusammenfassung

7.1 Einleitung

Das oberste Ziel einer Wurzelkanalbehandlung ist die Elimination oder zumindest eine weitgehende Reduktion von Mikroorganismen aus dem infizierten Wurzelkanalsystem. Dies wird durch die chemomechanische Aufbereitung und anschließende vollständige Obturation des Wurzelkanalsystems erreicht. Für eine suffiziente Obturation des Wurzelkanalsystems spielt die Haftfestigkeit des Sealers sowohl zum Wurzelkanalentin als auch zum Kernmaterial, meist Guttapercha, eine entscheidende Rolle, um so einen langfristigen und stabilen Verbund der Wurzelkanalfüllung zum Zahn zu erzielen. Das Ziel der vorliegenden Studie war die Analyse der Extrusionskraft des *TotalFill BC Sealers* in Abhängigkeit von unterschiedlichen endodontischen Spüllösungen mittels eines Pull-out-Testverfahrens.

7.2 Material und Methode

Zur Durchführung der vorliegenden Studie wurden 60 extrahierte humane Zähne mit geradem Wurzelkanalverlauf und rundem Kanalquerschnitt ausgewählt. Diese wurden dekapitiert, die Wurzelkanalanatomie mittels Röntgenkontrolle geprüft, der Gleitpfad präpariert und die Arbeitslänge auf 8 mm festgelegt. Nach maschineller Aufbereitung mit *BioRaCe* Feilen bis .02/#60, begleitet von Zwischenspülungen mit 1 ml Aqua dest. nach jedem Feilenwechsel, wurden die 60 Zähne randomisiert in 6 Gruppen (n=10) eingeteilt. Die Abschlusspülung (5 ml) der Zähne der unterschiedlichen Gruppen erfolgte mit unterschiedlichen endodontischen Spüllösungen (Aqua dest., CHX, Alkohol, NaOCl, Zitronensäure und EDTA). Nach Trocknung der Wurzelkanäle mit Papierspitzen wurden die Wurzelkanäle mit dem *TotalFill BC Sealer* und Spreadern obturiert und die Obturation röntgenologisch kontrolliert. Nach 14 Tagen folgten der Pull-out-Versuch mit einer *Zwick-Universaltestmaschine 1120* und die sich daran anschließende statistische Auswertung (SPSS 23.0). Des Weiteren wurden die Spreader fraktographisch bezüglich ihres Frakturmodus analysiert.

7.3 Ergebnisse

Im Rahmen der statistischen Auswertung zeigte Zitronensäure signifikant geringere Pullout-Werte verglichen mit allen anderen Spüllösungen. Aqua dest., Alkohol und NaOCl hatten signifikant höhere Pullout-Werte als EDTA, wobei nach Spülung mit EDTA allerdings signifikant höhere Haftwerte resultierten als nach Spülung mit Zitronensäure.

7.4 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem NaOCl als Spüllösung geeignet ist, da die Spülung mit dieser Lösung in den höchsten Haftwerten in dieser Studie resultierte. Somit kann NaOCl als endodontische Standardspüllösung ohne Einschränkung hinsichtlich des Haftverbunds von *TotalFill BC Sealer* zum Wurzelkanalentin eingesetzt werden. CHX, Aqua dest. und Alkohol zeigten geringere Haftwerte, allerdings nicht signifikant niedrigere Werte als nach Spülung mit NaOCl. Somit sind auch CHX, Aqua dest. und Alkohol als Spüllösungen geeignet.

Zitronensäure und EDTA sind aufgrund ihres negativen Effekts auf den Haftverbund eher ungeeignet.

8 Summary

8.1 Introduction

The primary goal of root canal treatment is the elimination or at least a large reduction of microorganisms from the infected root canal system. This can be achieved by the chemomechanical preparation and subsequent complete obturation of the root canal system. In order to create a sufficient obturation of the root canal system the bond strength of the sealer to both the root canal dentin and the core material, usually guttapercha, plays a decisive role to achieve a long-term and stable connection of the root canal filling to the tooth.

The aim of the present study was to analyze the extrusion force of the *TotalFill BC Sealer* depending on different endodontic irrigating solutions by means of a pull-out testing procedure.

8.2 Material and Method

To carry out the present study, 60 extracted human teeth with a straight root canal and a round channel cross-section were selected. These were decapitated, the root canal anatomy was checked by radiographs, the glide path was prepared and instrumentation was established to a working length of 8 mm. After rotary preparation of the root canal using *BioRaCe* files up to .02/#60, repeated irrigation with 1 ml of aqua dest. after each change of file, the 60 teeth were divided into 6 groups (n=10). The final irrigation (5 ml) of each tooth in the 6 experimental groups was carried out with one of the endodontic irrigating solutions (aqua dest., CHX, alcohol, NaOCl, citric acid and EDTA). After drying the root canals with paper points, the root canals were obturated with the *TotalFill BC Sealer* and spreaders and the obturation was controlled by x-rays. After 14 days, the pull-out tests using a *Zwick universal* testing machine 1120 followed and subsequent to it the statistical evaluation (SPSS 23.0). Furthermore, the spreaders were analyzed fractographically with respect to their fracture mode.

8.3 Results

As part of the statistical evaluation, citric acid showed significantly lower pullout values compared to all other irrigating solutions. Aqua dest., alcohol and NaOCl had significantly higher pullout values than EDTA. However, irrigation with EDTA resulted in significantly higher bond strength values compared with citric acid.

8.4 Conclusion

The results showed that especially NaOCl is suitable as an irrigating solution, as the rinsing with this solution resulted in the highest bond strength values in this study. Thus, NaOCl as the standard endodontic irrigating solution can be recommended without restrictions with regard to the bond strength of *TotalFill BC Sealer* to root canal dentin. CHX, aqua dest., and alcohol showed lower bond strength values, but not significantly lower values than after rinsing with NaOCl. Thus, CHX, aqua dest., and alcohol are also suitable as irrigating solutions. Citric acid and EDTA are rather unsuitable due to their negative effect in terms of bond strength.

9 Anhang

Geräte und Materialien

Probenvorbereitung

diamantierte Trennscheibe	HORICO, Hopf, Ringleb & Co. GmbH & CIE, Berlin (D)
<i>Digora</i> -Röntgensystem	Soredex, Schutterwald (D)
Handstück	KaVo, Biberach (D)
Skalpell	Aesculap, Melsungen (D)

Probeninstrumentierung

<i>BioRaCe</i> Feilen	FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds (CH)
<i>C-PILOT</i> Feilen	VDW GmbH, München (D)
<i>EndoPilot</i>	Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt (D)
<i>K-Bohrer (K-Reamer)</i>	VDW GmbH, München (D)

Probenspülung

Aqua dest. (Ampuwa)	Fresenius Kabi, Bad Homburg (D)
CHX-Lösung 2%	Apotheke des Universitätsklinikum Gießen und Marburg (UKGM), Marburg (D)
EDTA-Lösung 15%	Apotheke des UKGM, Marburg (D)
NaOCl-Lösung 3%	SPEIKO-Dr. Speier GmbH, Münster (D)

Wurzelkanalfüllung

<i>CoJet</i> Sand	3M ESPE, Neuss (D)
Papierspitzen ISO 60	VDW GmbH, München (D)
<i>TotalFill BC Sealer</i>	Brasseler USA, Savannah, GA (USA)

Haftverbundanalyse

Zwick-Universaltestmaschine 1120	Zwick Roell, Ulm (D)
Canon EOS 500D mit Canon MP-E 65 mm	Canon Inc., Tokyo (J)

Statistische Auswertung

<i>SSPS Win 23.0</i>	IBM, Armonk, NY (USA)
----------------------	-----------------------

10 Literaturverzeichnis

1. Al-Khatib ZZ, Baum RH, Morse DR, Yesilsoy C, Bhambhani S, Furst ML: The antimicrobial effect of various endodontic sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1990 Dec; 70(6): 784-90
2. American National Standards/American Dental Association. ANSI/ADA Specification no. 57: Endodontic Sealing Material. Chicago: American National Standards/American Dental Association; 2000
3. Amin SA, Seyam RS, El-Samman MA: The effect of prior calcium hydroxide intracanal placement on the bond strength of two calcium silicate-based and an epoxy resin-based endodontic sealer. *J Endod* 2012 May; 38(5): 696-9
4. Ballullaya SV, Vinay V, Thumu J, Devalla S, Bollu IP, Balla S: Stereomicroscopic Dye Leakage Measurement of Six Different Root Canal Sealers. *J Clin Diagn Res* 2017 Jun; 11(6): ZC65-ZC68
5. Beck-Mannagetta J, Necek D: Radiologic findings in aspergillosis of the maxillary sinus. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1986 Sep; 62(3): 345-9
6. Beer R: Die Wurzelkanalaufbereitung – Grundlage des Erfolgs. *ZWP* 7+8/2009; 34-40
7. Beltes P, Koulaouzidou E, Kotoula V, Kortsaris AH: In vitro evaluation of the cytotoxicity of calcium hydroxide-based root canal sealers. *Endod Dent Traumatol* 1995 Oct; 11(5): 245-9
8. Bodrumlu E, Semiz M: Antibacterial activity of a new endodontic sealer against *Enterococcus faecalis*. *J Can Dent Assoc* 2006 Sep; 72(7): 637
9. Borges RP, Sousa-Neto MD, Versiani MA, Rached-Júnior FA, De-Deus G, Miranda CE, Pécora JD: Changes in the surface of four calcium silicate-containing endodontic materials and an epoxy resin-based sealer after a solubility test. *Int Endod J* 2012 May; 45(5): 419-28
10. Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH: Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin. *Dent Mater* 2003 May; 19(3): 199-205

11. Bouillaguet S, Wataha JC, Lockwood PE, Galgano C, Golay A, Krejci I: Cytotoxicity and sealing properties of four classes of endodontic sealers evaluated by succinic dehydrogenase activity and confocal laser scanning microscopy. *Eur J Oral Sci* 2004 Apr; 112(2): 182-7
12. Bouillaguet S, Wataha JC, Tay FR, Brackett MG, Lockwood PE: Initial in vitro biological response to contemporary endodontic sealers. *J Endod* 2006 Oct; 32(10): 989-92
13. Broisman H, van Houte J, Krakow AA: Antimicrobial effects of N₂ in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1978 Jan; 45(1): 116-22
14. Briseño BM, Willershausen B: Root canal sealer cytotoxicity on human gingival fibroblasts: 2. Silicone- and resin-based sealers. *J Endod* 1991 Nov; 17(11): 537-40
15. Bürklein S, Hülsmann M: Zahnerhaltung bei älteren Patienten. *Bayerisches Zahnärzteblatt* 2013 Apr; 3: 54-61
16. Caicedo R, von Fraunhofer JA: The properties of endodontic sealer cements. *J Endod* 1988 Nov; 14(11): 527-34
17. Calt S, Serper A: Time-dependent effects of EDTA on dentin structures. *J Endod* 2002 Jan; 28(1): 17-9
18. Camargo CH, Camargo SE, Valera MC, Hiller KA, Schmalz G, Schweikl H: The induction of cytotoxicity, oxidative stress, and genotoxicity by root canal sealers in mammalian cells. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009 Dec; 108(6): 952-60
19. Candeiro GT, Correia FC, Duarte MA, Ribeiro-Siqueira DC, Gavini G: Evaluation of radiopacity, pH, release of calcium ions, and flow of a bioceramic root canal sealer. *J Endod* 2012 Jun; 38(6): 842-5
20. Carvalho-Júnior JR, Guimarães LF, Correr-Sobrinho L, Pécora JD, Sousa-Neto MD: Evaluation of solubility, disintegration, and dimensional alterations of a glass ionomer root canal sealer. *Braz Dent J* 2003; 14(2): 114-8
21. Chan CP1, Jeng JH, Hsieh CC, Lin CL, Lei D, Chang MC: Morphological alterations associated with the cytotoxic and cytostatic effects of citric acid on cultured human dental pulp cells. *J Endod* 1999 May; 25(5): 354-8

22. Colombo M, Poggio C, Dagna A, Meravini MV, Riva P, Trovati F, Pietrocola G: Biological and physico-chemical properties of new root canal sealers. *J Clin Exp Dent* 2018 Feb 1; 10(2): e120-e126
23. Coolidge ED: The diagnosis and treatment of conditions resulting from diseased dental pulps. *J Nat Dent Assoc* 1919; 6(4): 337-49
24. Dabaj P, Kalender A, Eldeniz AU: Push-Out Bond Strength and SEM Evaluation in Roots Filled with Two Different Techniques Using New and Conventional sealers. *Materials (Basel)* 2018 Sept; 11(9): 1620
25. D'Arcangelo C, Cinelli M, De Angelis F, D'Amario M: The effect of resin cement film thickness on the pullout strength of a fiber-reinforced post system. *J Prosthet Dent* 2007 Sep; 98(3): 193-8
26. Davies A: The mode of action of chlorhexidine. *J Periodontal Res Suppl* 1973; 12: 68-75
27. De Almeida WA, Leonardo MR, Tanomaru Filho M, Silva LA: Evaluation of apical sealing of three endodontic sealers. *Int Endod J* 2000 Jan; 33(1): 25-7
28. De Chevigny C, Dao TT, Basrani BR, Marquis V, Farzaneh M, Abitbol S, Friedman S: Treatment outcome in endodontics: the Toronto study-- phase 4: initial treatment. *J Endod* 2008 Mar; 34(3): 258-63
29. De-Deus G, Brandão MC, Fidel RA, Fidel SR: The sealing ability of GuttaFlow in oval-shaped canals: an ex vivo study using a polymicrobial leakage model. *Int Endod J* 2007 Oct; 40(10): 794-9
30. 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 Jan; 33(1): 46-52
31. Donnelly A, Sword J, Nishitani Y, Yoshiyama M, Agee K, Tay FR, Pashley DH: Water sorption and solubility of methacrylate resin-based root canal sealers. *J Endod* 2007 Aug; 33(8): 990-4
32. Ebert J, Leyer A, Günther O, Lohbauer U, Petschelt A, Frankenberger R, Roggendorf MJ: Bond strength of adhesive cements to root canal dentin tested with a novel pull-out approach. *J Endod* 2011 Nov; 37(11): 1558-61

33. Edelhoff D, Heidemann D, Kern M, Weigl P: Aufbau endodontisch behandelter Zähne. (Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK, der DGZPW und der DGZ): DGZMK 2003
34. Elayouti A, Achleithner C, Löst C, Weiger R: Homogeneity and adaptation of a new gutta-percha paste to root canal walls. *J Endod* 2005 Sep; 31(9): 687-90
35. Ersahan S, Aydin C: Dislocation resistance of iRoot SP, a calcium silicate-based sealer, from radicular dentine. *J Endod* 2010 Dec; 36(12): 2000-2
36. Ersahan S, Aydin C: Solubility and apical sealing characteristics of a new calcium silicate-based root canal sealer in comparison to calcium hydroxide-, methacrylate resin- and epoxy resin-based sealers. *Acta Odontol Scand* 2013 May-Jul; 71(3-4): 857-62
37. Estrela C, Estrela CR, Barbin EL, Spanó JC, Marchesan MA, Pécora JD: Mechanism of action of sodium hypochlorite. *Braz Dent J* 2002; 13(2): 113-7
38. Europäische Gesellschaft für Endodontologie: Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung. *Endodontie* 2006; 15(4): 387-401
39. Farzaneh M, Abitbol S, Lawrence HP, Friedman S: Treatment outcome in endodontics-the Toronto Study. Phase II: initial treatment. *J Endod* 2004 May; 30(5): 302-9
40. Ferguson JW, Hatton JF, Gillespie MJ: Effectiveness of intracanal irrigants and medications against the yeast *Candida albicans*. *J Endod* 2002 Feb; 28(2): 68-71
41. Ferraz CC, Gomes BP, Zaia AA, Teixeira FB, Souza-Filho FJ: Comparative study of the antimicrobial efficacy of chlorhexidine gel, chlorhexidine solution and sodium hypochlorite as endodontic irrigants. *Braz Dent J* 2007; 18(4): 294-8
42. Flores DS, Rached FJ Jr, Versiani MA, Guedes DF, Sousa-Neto MD, Pécora JD: Evaluation of physicochemical properties of four root canal sealers. *Int Endod J* 2011 Feb; 44(2): 126-35
43. Frankenberger R: Materialkundliche Grundlagen der Adhäsivtechnik. *DentNet Masters 3M ESPE Expert Education* (Hrsg.): Die Adhäsivtechnologie. Ein Leitfaden für Theorie und Praxis. 3M ESPE, (2001): 21-24

44. Frankenberger R, Krämer N, Sindel J: Repair strength of etched vs silica-coated metal-ceramic and all-ceramic restorations. *Oper Dent* May-Jun 2000; 25(3): 209-15
45. Friedman S, Abitbol S, Lawrence HP: Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study. Phase 1: initial treatment. *J Endod* 2003 Dec; 29(12): 787-93
46. Gatewood RS: Endodontic materials. *Dent Clin North Am* 2007 Jul; 51(3): 695-712
47. Gerosa R, Menegazzi G, Borin M, Cavalleri G: Cytotoxicity evaluation of six root canal sealers. *J Endod* 1995 Sep; 21(9): 446-8
48. Gettleman BH, Messer HH, ElDeeb ME: Adhesion of sealer cements to dentin with and without the smear layer. *J Endod* 1991 Jan; 17(1): 15-20
49. Geurtsen W: Biocompatibility of root canal filling materials. *Aust Endod J* 2001 Apr; 27(1): 12-21
50. Ghoneim AG, Lutfy RA, Sabet NE, Fayyad DM: Resistance to fracture of roots obturated with novel canal-filling systems. *J Endod* 2011 Nov; 37(11): 1590-2
51. Gomes BP, Vianna ME, Zaia AA, Almeida JF, Souza-Filho FJ, Ferraz CC: Chlorhexidine in endodontics. *Braz Dent J* 2013; 24(2): 89-102
52. Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, Tay F, Ferrari M: The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci* 2004 Aug; 112(4): 353-61
53. Grande NM, Plotino G, Lavorgna L, Ioppolo P, Bedini R, Pameijer CH, Somma F: Influence of different root canal-filling materials on the mechanical properties of root canal dentin. *J Endod* 2007 Jul; 33(7): 859-63
54. Greenstein G, Berman C, Jaffin R: Chlorhexidine. An adjunct to periodontal therapy. *J Periodontol* 1986 Jun; 57(6): 370-7
55. Grossman LI: Solution of pulp tissue by chemical agents. *J Am Dent Assoc* 1941; 28(2): 223-25
56. Grossman LI: Obturation of the canal. *Endodontic practice* 1981, 10th edition; 297-300
57. Grossman LI: Obturation of the root canal. *Endodontic practice* 1988, 11th edition; 242-270

58. Haapasalo M: Control and elimination of endodontic infection. *Endodontic Journal* 4, 10 (2003); 10-18
59. Haapasalo M, Shen Y, Qian W, Gao Y: Irrigation in endodontics. *Dent Clin North Am* 2010 Apr; 54(2): 291-312
60. Hauman CH, Love RM: Biocompatibility of dental materials used in contemporary endodontic therapy: a review. Part 1. Intracanal drugs and substances. *Int Endod J* 2003 Feb; 36(2): 75-85
61. Hegde V, Arora S: Fracture resistance of roots obturated with novel hydrophilic obturation systems. *J Conserv Dent* May-Jun 2015; 18(3): 261-4
62. Heil J, Reifferscheid G, Waldmann P, Leyhausen G, Geurtsen W: Genotoxicity of dental materials. *Mutat Res* 1996 Jul 5; 368(3-4): 181-94
63. Hess D, Solomon E, Spears R, He J: Retreatability of a bioceramic root canal sealing material. *J Endod* 2011 Nov; 37(11): 1547-9
64. Holland R, de Souza V: Ability of a new calcium hydroxide root canal filling material to induce hard tissue formation. *J Endod* 1985 Dec; 11(12): 535-43
65. Huang TH, Lii CK, Chou MY, Kao CT: Lactate dehydrogenase leakage of hepatocytes with AH26 and AH Plus sealer treatments. *J Endod* 2000 Sep; 26(9): 509-11
66. Huang TH, Yang JJ, Li H, Kao CT: The biocompatibility evaluation of epoxy resin-based root canal sealers in vitro. *Biomaterials* 2002 Jan; 23(1): 77-83
67. 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 Feb; 35(2): 153-8
68. Hülsmann M, Heckendorff M, Lennon Á: Chelating agents in root canal treatment: mode of action and indications for their use. *Int Endod J* 2003 Dec; 36(12): 810-30
69. Hülsmann M, Schäfer E, Heidemann D, Petschelt A, Raab WHM, Weiger R: „Good clinical practice“: Die Wurzelkanalbehandlung (Stellungnahme des Endodontie-Beirats der DGZ). Gemeinsame Stellungnahme der DGZ und der DGZMK, Version 1.b, Stand 23.07.2007; *Dtsch Zahnärztl Z* 2005, 60(8)

70. Hume WR: The pharmacologic and toxicological properties of zinc oxide-eugenol. *J Am Dent Assoc* 1986 Nov; 113(5): 789-91
71. International Organization for Standardization ISO 6876 dental root canal sealing materials. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2001
72. Kazemi RB, Safavi KE, Spångberg LS: Dimensional changes of endodontic sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1993 Dec; 76(6): 766-71
73. Keleş A, Köseoğlu M: Dissolution of root canal sealers in EDTA and NaOCl solutions. *J Am Dent Assoc* 2009 Jan; 140(1): 74-9
74. Khongkhunthian P, Reichart PA: Aspergillosis of the maxillary sinus as a complication of overfilling root canal material into the sinus: report of two cases. *J Endod* 2001 Jul; 27(7): 476-8
75. Kleier DJ, Averbach RE, Mehdipour O: The sodium hypochlorite accident: experience of diplomates of the American Board of Endodontics. *J Endod* 2008 Nov; 34(11): 1346-50
76. Knupfer WH: Ein universelles biokeramisches Obturationsmaterial. *Endodontie Journal* 1/2014
77. Koch MJ: Formaldehyde release from root-canal sealers: influence of method. *Int Endod J* 1999 Jan; 32(1): 10-6
78. Koch K, Brave D: Bioceramic technology - the game changer in endodontics. *Endodontic Practice US* 2009 Apr; 13-17
79. Kolokuris I, Beltes P, Economides N, Vlemmas I: Experimental study of the biocompatibility of a new glass-ionomer root canal sealer (Ketac-Endo). *J Endod* 1996 Aug; 22(8): 395-8
80. Koulaouzidou EA, Papazisis KT, Beltes P, Geromichalos GD, Kortsaris AH: Cytotoxicity of three resin-based root canal sealers: an in vitro evaluation. *Endod Dent Traumatol* 1998 Aug; 14(4): 182-5
81. Koulaouzidou EA, Margelos J, Beltes P, Kortsaris AH: Cytotoxic effects of different concentrations of neutral and alkaline EDTA solutions used as root canal irrigants. *J Endod* 1999 Jan; 25(1): 21-3
82. Kovac J, Kovac D: Effect of irrigating solutions in endodontic therapy. *Bratislava medical journal* 2011; 112(7): 410-15

83. Lang H: Stabilisierung endodontisch behandelter Zähne. DZZ 60 (03/2005); 128-130
84. Lee KW, Williams MC, Camps JJ, Pashley DH: Adhesion of endodontic sealers to dentin and gutta-percha. J Endod 2002 Oct; 28(10): 684-8
85. Lee YL, Lin FH, Wang WH, Ritchie HH, Lan WH, Lin CP: Effects of EDTA on the hydration mechanism of mineral trioxide aggregate. J Dent Res 2007 Jun; 86(6): 534-8
86. Leonardo MR, Silva LA, Utrilla LS, Assed S, Ether SS: Calcium hydroxide root canal sealers--histopathologic evaluation of apical and periapical repair after endodontic treatment. J Endod 1997 Jul; 23(7): 428-32
87. Leonardo MR, da Silva LA, Almeida WA, Utrilla LS: Tissue response to an epoxy resin-based root canal sealer. Endod Dent Traumatol 1999 Feb; 15(1): 28-32
88. Leonardo MR, Tanomaru Filho M, Silva LA, Nelson Filho P, Bonifácio KC, Ito IY: In vivo antimicrobial activity of 2% chlorhexidine used as a root canal irrigating solution. J Endod. 1999 Mar; 25(3): 167-71
89. 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 Aug; 88(2) :221-5
90. Lertchirakarn V, Timyam A, Messer HH: Effects of root canal sealers on vertical root fracture resistance of endodontically treated teeth. J Endod 2002 Mar; 28(3): 217-9
91. Leyhausen G, Heil J, Reifferscheid G, Waldmann P, Geurtsen W: Genotoxicity and cytotoxicity of the epoxy resin-based root canal sealer AH plus. J Endod 1999 Feb; 25(2): 109-13
92. Limkangwalmongkol S, Abbott PV, Sandler AB: Apical dye penetration with four root canal sealers and gutta-percha using longitudinal sectioning. J Endod 1992 Nov; 18(11): 535-9
93. Lodiene G, Morisbak E, Bruzell E, Ørstavik D: Toxicity evaluation of root canal sealers in vitro. Int Endod J 2008 Jan; 41(1): 72-7
94. Loushine BA, Bryan TE, Looney SW, Gillen BM, Loushine RJ, Weller RN, Pashley DH, Tay FR: Setting properties and cytotoxicity evaluation of a premixed bioceramic root canal sealer. J Endod 2011 May; 37(5): 673-7

95. Madhuri GV, Varri S, Bolla N, Mandava P, Akkala LS, Shaik J: Comparison of bond strength of different endodontic sealers to root dentine: An in vitro Push-out test. *J Conserv Dent* 2016 Sep-Oct; 19(5): 461-464
96. Marquis VL, Dao T, Farzaneh M, Abitbol S, Friedman S: Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study: Phase III: initial treatment. *J Endod* 2006 Apr; 32(4): 299-306
97. Marending M, Luder HU, Brunner TJ, Knecht S, Stark WJ, Zehnder M: Effect of sodium hypochlorite on human root dentine - mechanical, chemical and structural evaluation. *Int Endod J* 2007 Oct; 40(10): 786-93
98. McComb D, Smith DC: A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *J Endod* 1975 Jul; 1(7): 238-42
99. McMichen FR, Pearson G, Rahbaran S, Gulabivala K: A comparative study of selected physical properties of five root-canal sealers. *Int Endod J* 2003 Sep; 36(9): 629-35
100. Mittal M, Chandra S, Chandra S: Comparative tissue toxicity evaluation of four endodontic sealers. *J Endod* 1995 Dec; 21(12): 622-4
101. Mohammadi Z: Sodium hypochlorite in endodontics: an update review. *Int Dent J* 2008 Dec; 58(6): 329-41
102. Mohammadi Z, Abbott PV: The properties and applications of chlorhexidine in endodontics. *Int Endod J* 2009 Apr; 42(2): 288-302
103. Mohammadi Z, Shalavi S: Is chlorhexidine an ideal vehicle for calcium hydroxide? A microbiologic review. *Iran Endod J* 2012 Summer; 7(3): 115-22
104. Mohammadi Z, Shalavi S: Antimicrobial activity of sodium hypochlorite in endodontics. *J Mass Dent Soc* 2013 Spring; 62(1): 28-31
105. Mohammadi Z, Shalavi S: Antifungal effects of root canal irrigants and medicaments. An update review. *N Y State Dent J* 2014 Aug-Sep; 80(5): 58-63
106. Moshonov J, Trope M, Friedman S: Retreatment efficacy 3 months after obturation using glass ionomer cement, zinc oxide-eugenol, and epoxy resin sealers. *J Endod* 1994 Feb; 20(2): 90-2
107. Naenni N, Thoma K, Zehnder M: Soft tissue dissolution capacity of currently used and potential endodontic irrigants. *J Endod* 2004 Nov; 30(11): 785-7

108. Nagas E, Uyanik MO, Eymirli A, Cehreli ZC, Vallittu PK, Lassila LV, Durmaz V: Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers. *J Endod* 2012 Feb; 38(2): 240-4
109. Oh S, Cho SI, Perinpanayagam H, You J, Hong SH, Yoo YJ, Chang SW, Shon WJ, Yoo JS, Baek SH, Kum KY: Novel Calcium Zirconate Silicate Cement Biomineralize and Seal Root Canals. *Materials (Basel)* 2018 Apr 11; 11(4). pii: E588
110. Ørstavik D, Nordahl I, Tibballs JE: Dimensional change following setting of root canal sealer materials. *Dent Mater* 2001 Nov; 17(6): 512-9
111. Pane ES, Palamara JEA, Messer HH: Behavior of resin-based endodontic sealer cements in thin and thick films. *Dent Mater* 2012 Sept; 28(9): 150-9
112. Pascon EA, Spångberg LS: In vitro cytotoxicity of root canal filling materials: 1. Gutta-percha. *J Endod* 1990 Sep; 16(9): 429-33
113. Pascon EA, Leonardo MR, Safavi K, Langeland K: Tissue reaction to endodontic materials: methods, criteria, assessment, and observations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1991 Aug; 72(2): 222-37
114. Pashley D, Walton R: Histology and physiology of the dental pulp. *Endodontics* 1994, 320-354
115. Pawar SS, Pujar MA, Makandar SD: Evaluation of the apical sealing ability of bioceramic sealer, AH plus & epiphany: An in vitro study. *J Conserv Dent* 2014 Nov; 17(6): 579-82
116. Perdigao J, Eiriksson S, Rosa BT, Lopes M, Gomes G: Effect of calcium removal on dentin bond strengths. *Quintessence Int* 2001 Feb; 32(2): 142-6
117. Pinheiro CR, Guinesi AS, Pizzolitto AC, Bonetti-Filho I: In vitro antimicrobial activity of Acroseal, Polifil and Epiphany against *Enterococcus faecalis*. *Braz Dent J* 2009; 20(2): 107-11
118. Pupo J, Biral RR, Benatti O, Abe A, Valdrighi L: Antimicrobial effects of endodontic filling cements on microorganisms from root canal. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1983 Jun; 55(6): 622-7
119. Pumarola J, Berastegui E, Brau E, Canalda C, Jiménez de Anta MT: Antimicrobial activity of seven root canal sealers. Results of agar diffusion and agar dilution tests. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1992 Aug; 74(2): 216-20

120. Ray H, Seltzer S: A new glass ionomer root canal sealer. *J Endod* 1991 Dec; 17(12): 598-603
121. Richardson IG: The calcium silicate hydrates. *Cement and concrete research* 2008; 38: 137-58
122. Roggendorf MJ, Ebert J, Herbstleb E, Kentsch C, Petschelt A, Frankenberger R: Apikale Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen unter Kontamination mit verschiedenen Spülflüssigkeiten *Dtsch Zahnärztl Z* 60, A161 (2005)
123. Ryan S: Chlorhexidine as a canal irrigant: a review. *Compend Contin Educ Dent* 2010 Jun; 31(5): 338-42
124. Sagsen B, Ustün Y, Demirbuga S, Pala K: Push-out bond strength of two new calcium silicate-based endodontic sealers to root canal dentine. *Int Endod J* 2011 Dec; 44(12): 1088-91
125. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo MP, Orstavik D: Adhesion of endodontic sealers: scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. *J Endod* 2003 Sep; 29(9): 595-601
126. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo M, Ørstavik D: Survival of *Enterococcus faecalis* in infected dentinal tubules after root canal filling with different root canal sealers in vitro. *Int Endod J* 2004 Mar; 37(3): 193-8
127. Scarparo RK, Grecca FS, Fachin EV: Analysis of tissue reactions to methacrylate resin-based, epoxy resin-based, and zinc oxide-eugenol endodontic sealers. *J Endod* 2009 Feb; 35(2): 229-32
128. Scelza MF, Daniel RL, Santos EM, Jaeger MM: Cytotoxic effects of 10% citric acid and EDTA-T used as root canal irrigants: an in vitro analysis. *J Endod* 2001 Dec; 27(12): 741-3
129. Schäfer E, Behaissi AAI: Alkaline effects of calcium hydroxide-containing gutta-percha points. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999 Oct; 54 (10): 614-8
130. Schäfer E, Hickel R: Wurzelkanalfüllpasten und -füllstifte. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und DGZ, Version 1.0, Stand 6/99; *Dtsch Zahnärztl Z* 2000; 55 (9)
131. Schäfer E, Zandbiglari T: Solubility of root-canal sealers in water and artificial saliva. *Int Endod J* 2003 Oct; 36(10): 660-9

132. Schäfer E, Bössmann K: Antimicrobial efficacy of chlorhexidine and two calcium hydroxide formulations against *Enterococcus faecalis*. J Endod 2005 Jan; 31(1): 53-6
133. Schwarze T, Leyhausen G, Geurtsen W: Long-term cytocompatibility of various endodontic sealers using a new root canal model. J Endod 2002 Nov; 28(11): 749-53
134. Schweikl H, Schmalz G, Stimmelmayer H, Bey B: Mutagenicity of AH26 in an in vitro mammalian cell mutation assay. J Endod 1995 Aug; 21(8): 407-10
135. Serper A, Calt S: The demineralizing effects of EDTA at different concentrations and pH. J Endod 2002 Jul; 28(7): 501-2
136. Shahravan 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 Feb; 33(2): 96-105
137. Shalhav M, Fuss Z, Weiss EI: In vitro antibacterial activity of a glass ionomer endodontic sealer. J Endod 1997 Oct; 23(10): 616-9
138. Shipper G, Teixeira FB, Arnold RR, Trope M: Periapical inflammation after coronal microbial inoculation of dog roots filled with gutta-percha or resilon. J Endod 2005 Feb; 31(2): 91-6
139. Sim TP, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K: Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. Int Endod J 2001 Mar; 34(2): 120-32
140. Siqueira JF Jr, Rôças IN, Lopes HP, de Uzeda M: Coronal leakage of two root canal sealers containing calcium hydroxide after exposure to human saliva. J Endod 1999 Jan; 25(1): 14-6
141. Siqueira JF Jr, Favieri A, Gahyva SM, Moraes SR, Lima KC, Lopes HP: Antimicrobial activity and flow rate of newer and established root canal sealers. J Endod 2000 May; 26(5): 274-7
142. Souza M, Cecchin D, Farina AP, Leite CE, Cruz FF, Pereira Cda C, Ferraz CC, Figueiredo JA: Evaluation of chlorhexidine substantivity on human dentin: a chemical analysis. J Endod. 2012 Sep; 38(9): 1249-52

143. Spångberg L, Engström B, Langeland K: Biologic effects of dental materials. 3. Toxicity and antimicrobial effect of endodontic antiseptics in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1973 Dec; 36(6): 856-71
144. Spångberg LS, Barbosa SV, Lavigne GD: AH 26 releases formaldehyde. *J Endod* 1993 Dec; 19(12): 596-8
145. Stevens RW, Strother JM, McClanahan SB: Leakage and sealer penetration in smear-free dentin after a final rinse with 95% ethanol. *J Endod* 2006 Aug; 32(8): 785-8
146. Susini G, About I, Tran-Hung L, Camps J: Cytotoxicity of Epiphany and Resilon with a root model. *Int Endod J* 2006 Dec; 39(12): 940-4
147. Tagger M, Tagger E: Periapical reactions to calcium hydroxide-containing sealers and AH 26 in monkeys. *Endod Dent Traumatol* 1989 Jun; 5(3): 139-46
148. Tanomaru Filho M, Leonardo MR, Silva LA, Aníbal FF, Faccioli LH: Inflammatory response to different endodontic irrigating solutions. *Int Endod J* 2002 Sep; 35(9): 735-9
149. Tasdemir T, Er K, Celik D, Tahan E, Serper A, Ceyhanli KT, Yesilyurt C: Bond strength of calcium silicate-based sealers to dentine dried with different techniques. *Med Princ Pract* 2014; 23(4): 373-6
150. Teixeira FB, Teixeira EC, Thompson JY, Trope M: Fracture resistance of roots endodontically treated with a new resin filling material. *J Am Dent Assoc* 2004 May; 135(5): 646-52
151. Tennert C: Die Desinfektion des Wurzelkanalsystems. *Dtsch Zahnärztl Z* 2013; 68(11): 696-706
152. Timpawat S, Vongsavan N, Messer HH: Effect of removal of the smear layer on apical microleakage. *J Endod* 2001 May; 27(5): 351-3
153. Trope M, Ray HL Jr: Resistance to fracture of endodontically treated roots. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1992 Jan; 73(1): 99-102
154. Tuncel B, Nagas E, Cehreli Z, Uyanik O, Vallittu P, Lassila L: Effect of endodontic chelating solutions on the bond strength of endodontic sealers. *Braz Oral Res* 2015; 29(1): 1-6

155. Ulusoy ÖI, Paltun YN: Fracture resistance of roots with simulated internal resorption defects and obturated using different hybrid techniques. *J Dent Sci* 2017 Jun; 12(2): 121-125
156. Vaghela DJ, Kandaswamy D, Venkateshbabu N, Jamini N, Ganesh A: Disinfection of dentinal tubules with two different formulations of calcium hydroxide as compared to 2% chlorhexidine: As intracanal medicaments against *Enterococcus faecalis* and *Candida albicans*: An in vitro study. *J Conserv Dent* 2011 Apr-Jun; 14(2): 182-86
157. Versiani MA, Carvalho-Junior JR, Padilha MI, Lacey S, Pascon EA, Sousa-Neto MD: A comparative study of physicochemical properties of AH Plus and Epiphany root canal sealants. *Int Endod J* 2006 Jun; 39(6): 464-71
158. Vianna ME, Gomes BP, Berber VB, Zaia AA, Ferraz CC, de Souza-Filho FJ: In vitro evaluation of the antimicrobial activity of chlorhexidine and sodium hypochlorite. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2004 Jan; 97(1): 79-84
159. Violich DR, Chandler NP: The smear layer in endodontics - a review. *Int Endod J* 2010 Jan; 43(1): 2-15
160. von Fraunhofer JA, Branstetter J: The physical properties of four endodontic sealer cements. *J Endod* 1982 Mar; 8(3): 126-30
161. White RR, Goldman M, Lin PS: The influence of the smeared layer upon dentinal tubule penetration by plastic filling materials. *J Endod* 1984 Dec; 10(12): 558-62
162. White RR, Hays GL, Janer LR: Residual antimicrobial activity after canal irrigation with chlorhexidine. *J Endod* 1997 Apr; 23(4): 229-31
163. Wilcox LR, Wiemann AH: Effect of a final alcohol rinse on sealer coverage of obturated root canals. *J Endod* 1995 May; 21(5): 256-8
164. Willershausen I, Callaway A, Briseño B, Willershausen B: In vitro analysis of the cytotoxicity and the antimicrobial effect of four endodontic sealers. *Head Face Med* 2011 Aug 10; 7:15
165. Willershausen I: Infektionskontrolle in der Endodontie. *Wissen kompakt* 2013; 7(1): 13-22

166. 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 Oct; 94(4): 499-502
167. Wu MK, Ozok AR, Wesselink PR: Sealer distribution in root canals obturated by three techniques. *Int Endod J* 2000 Jul; 33(4): 340-5
168. Xuereb M, Vella P, Damidot D, Sammut CV, Camilleri J: In situ assessment of the setting of tricalcium silicate-based sealers using a dentin pressure model. *J Endod* 2015 Jan; 41(1): 111-24
169. Yamaguchi M, Yoshida K, Suzuki R, Nakamura H: Root canal irrigation with citric acid solution. *J Endod* 1996 Jan; 22(1): 27-9
170. Yang Q, Troczynski T, Liu DM: Influence of apatite seeds on the synthesis of calcium phosphate cement. *Biomaterials* 2002 Jul; 23(13): 2751-60
171. Yap WY, Aziz ZACA, Azami NH, Al-Haddad AY, Khan AA: An in vitro Comparison of Bond Strength of Different Sealers/Obturation Systems to Root Dentin using the Push-Out Test at 2 Weeks and 3 Months after Obturation. *Med Princ Pract* 2017; 26(5): 464-469
172. Yesilsoy C, Koren LZ, Morse DR, Kobayashi C: A comparative tissue toxicity evaluation of established and newer root canal sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1988 Apr; 65(4): 459-67
173. Zehnder M, Lehnert B, Schönenberger K, Waltimo T: Spüllösungen und medikamentöse Einlagen in der Endodontie. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2003; 113(7): 756-63
174. Zehnder M: Root canal irrigants. *J Endod* 2006 May; 32(5): 389-98
175. Zhang W, Li Z, Peng B: Assessment of a new root canal sealer's apical sealing ability. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009 Jun; 107(6): 79-82
176. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M: Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *J Endod* 2009 Jul; 35(7): 1051-5
177. Zhang W, Li Z, Peng B: Ex vivo cytotoxicity of a new calcium silicate-based canal filling material. *Int Endod J* 2010 Sep; 43(9): 769-74

178. Zhang W, Li Z, Peng B: Effects of iRoot SP on mineralization-related genes expression in MG63 cells. *J Endod* 2010 Dec; 36(12): 1978-82
179. Zhou HM, Shen Y, Zheng W, Li L, Zheng YF, Haapasalo M: Physical properties of 5 root canal sealers. *J Endod* 2013 Oct; 39(10): 1281-6
180. Zhou HM, Du TF, Shen Y, Wang ZJ, Zheng YF, Haapasalo M6: In vitro cytotoxicity of calcium silicate-containing endodontic sealers. *J Endod* 2015 Jan; 41(1): 56-61
181. Zmener O: Tissue response to a new methacrylate-based root canal sealer: preliminary observations in the subcutaneous connective tissue of rats. *J Endod* 2004 May; 30(5): 348-51
182. Zmener O, Banegas G, Pameijer CH: Bone tissue response to a methacrylate-based endodontic sealer: a histological and histometric study. *J Endod* 2005 Jun; 31(6): 457-9
183. Zoufan K, Jiang J, Komabayashi T, Wang YH, Safavi KE, Zhu Q: Cytotoxicity evaluation of Gutta Flow and Endo Sequence BC sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011 Nov; 112(5): 657-61
184. Zurbriggen T, del Rio CE, Brady JM: Postdebridement retention of endodontic reagents: a quantitative measurement with radioactive isotope. *J Endod* 1975 Sep; 1(9): 298-9

11 Verzeichnis meiner akademischen Lehrer

Meine akademischen Lehrer waren folgende Damen und Herren in Aachen:

Conrads, Diedrich, Gais, Gressner, Handt, Korr, Krenz, Lampert, Lückhoff, Riediger,
Rübben, Schaper, Spiekermann, Steinau

12 Danksagung

Ich möchte zunächst Herrn Prof. Dr. Roland Frankenberger, dem Direktor der Abteilung für Zahnerhaltungskunde an der Philipps-Universität Marburg, für die Möglichkeit danken, in seiner Abteilung die Dissertation durchführen zu können.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Priv.-Doz. Dr. Matthias J. Roggendorf, Oberarzt der Abteilung für Zahnerhaltungskunde an der Philipps-Universität Marburg, für die Überlassung des Themas und seine hervorragende Betreuung, seine Motivation und seinen unermüdlichen Einsatz. Seine wertvollen konstruktiven Kommentare bereicherten die Arbeit maßgeblich.

Herrn Dr. Franz-Josef Faber und Herrn Dr. Hubert C. Roggendorf danke ich für die Unterstützung in der Durchführung des experimentellen Teils, sowie für die Unterstützung im praktischen Versuchsablauf und die Möglichkeit, die Zwick-Universaltestmaschine an der Universität zu Köln verwenden zu können.

Ein weiterer Dank richtet sich an meine Familie, besonders an meine Schwester Dr. Anna Elisabeth Dahlhoff und alle anderen Personen, die mir während der Dissertation mit Ratschlägen und mentaler Unterstützung zur Seite standen.