AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND- UND KIEFERHEILKUNDE

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Roland Frankenberger
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

Poliklinik für Zahnerhaltung

Einfluss endodontischer Spüllösungen auf den Haftverbund zwischen einem Wurzelkanal-Sealer auf Tricalciumsilikat-Basis *(BioRoot RCS)* und dem Wurzeldentin

---

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
in dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Fehmi Koc
aus Kassel

Marburg, 2025

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am:

29.01.2025

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Prof. Dr. Hertl

Referent: Priv.-Doz. Dr. M. J. Roggendorf

1. Korreferent: Prof. Dr. med. dent. Nicole Arweiler

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1 Anhang A V
1.1 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis V
1.2 Abkürzungsverzeichnis VI
2 Zusammenfassung VII
3 Summary IX
4 Einleitung 1
4.1 Wurzelkanalbehandlung 3
4.1.1 Indikation für eine Wurzelkanalbehandlung 4
4.1.2 Wurzelkanalaufbereitung 5
4.1.3 Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanals 6
4.2 Spülflüssigkeiten 7
4.2.1 Natriumhypochlorit 7
4.2.2 Ethylendiamintetraessigsäure 9
4.2.3 Citronensäure 10
4.2.4 Chlorhexidin 11
4.2.5 Alkohol 13
4.2.6 *QMix 2in1* 13
4.3 Schmierschicht 14
4.4 Wurzelkanalfüllung 15
4.4.1 Wurzelkanalfüllpasten 16
4.4.2 Sealer auf Glasionomerzement-Basis 16
4.4.3 Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis 17
4.4.4 Sealer auf Epoxidharz-Basis 17
4.4.5 Sealer auf Tricalciumsilikat-Basis (*BioRoot RCS*) 18
5 Ziel der Studie 24
6 Material und Methoden 25
7 Ergebnisse 32
8 Diskussion 35
8.1 Diskussion der Methoden 37
8.2 Diskussion der Ergebnisse 43
9 Prüfung der Arbeitshypothesen 48
10 Schlussfolgerungen 50

11 Literaturverzeichnis 52
12 Anhang B 72
12.1 Ergebnisse der fraktografischen Analyse 72
12.2 Materialliste 74
13 Verzeichnis der akademischen Lehrer 75
14 Tabellarischer Lebenslauf 76
15 Ehrenwörtliche Erklärung 77
16 Danksagung 78

1 Anhang A

1.1 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Einstellungen der *Zwick*-Universalprüfmaschine 30

Tab. 2: Beschreibung der vier möglichen Frakturmodi 31

Tab. 3: Ergebnisse der Haftverbundanalyse nach dem Pull-out-Testverfahren 33

Tab. 4: Ergebnisse der Auswertung nach paarweiser statistischer Analyse mittels Mann-Whitney-Test 34

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs 25

Abb. 2: Ausgewählte Zähne vor und nach dem Trimmen auf 9 mm 26

Abb. 3: *BioRaCe*-NiTi-Instrumente – eingesetztes *BioRaCe*-Instrumenten-Set von *BR0* bis *BR5* sowie *BR7* 27

Abb. 4: Pull-out-Foto *BioRoot RCS* vor dem Zugversuch mit noch am Spreader hängendem Zahn 28

Abb.5: Pull-out-Foto einer Probe nach dem Zugversuch mit dem dislozierten Spreader 28

Abb.6: Boxplot-Diagramm des Haftverbunds 32

Abb.7: Beispielbilder für die Frakturmodi 35

1.2 Abkürzungsverzeichnis

AL	Arbeitslänge
Al_2O_3	Aluminiumoxid
Aqua dest.	destilliertes Wasser
ANOVA	analysis of variance (Analyse auf Varianzen)
Ca	Calcium
Ca^{2+}	Calcium-Ion
CHX	Chlorhexidin
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
E. faecalis	Enterococcus faecalis
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
F_{max}	maximale Kraft
GIZ	Glasionomerzement
ISO	International Organization for Standardization
MPa	Megapascal
N	Newton
NaCl	Natriumchlorid
NaOCl	Natriumhypochlorit

2 Zusammenfassung

Einleitung

In vielen Studien wurden bisher die Veränderungen beschrieben, die Spüllösungen im Dentin hervorrufen. Darüber hinaus beschäftigen sich auch viele Studien mit dem kumulativen Einfluss von verschiedenen Spülprotokollen auf den Haftverbund zwischen Sealer und Dentin. Noch nicht untersucht wurde bislang der Einfluss der einzelnen Spülflüssigkeiten auf den Haftverbund zwischen dem neuen biokompatiblen und -aktiven Sealer *BioRoot RCS* (Septodont) und dem Wurzelkanaldentin.

Material und Methoden

Für die Studie wurden extrahierte humane Zähne unterschiedlichen Alters verwendet, die nach der Extraktion bis zum Beginn der Versuche in 0,5%iger Chloramin-T-Lösung gelagert wurden. Untersucht wurden 70 Zähne mit geradem Wurzelkanal und rundem Wurzelquerschnitt. Die Auswahl der einzelnen Zähne erfolgte nach einer röntgenologischen Beurteilung der Kanalmorphologie. Ausgeschlossen wurden Zähne mit gekrümmtem Wurzelkanal, einem obliterierten Kanal oder einem zu weiten Kanaldurchmesser. Für die Studie wurden Zähne mit geraden, nicht frakturierten und kariesfreien Wurzeln sowie einem intakt ausgebildeten Apex, das heißt einem abgeschlossenen Wurzelwachstum und ohne Wurzelresorptionen, ausgewählt. Die Wurzeln wurden danach auf eine Länge von 9 mm gekürzt und anschließend in sieben Gruppen eingeteilt:

Gruppe 1: NaOCl (3 %) (Natriumhypochlorit)
Gruppe 2: EDTA (17 %) (Ethylendiamintetraacetat)
Gruppe 3: CHX (2 %) (Chlorhexidin)
Gruppe 4: *QMix 2in1* (Lösung von Chlorhexidin, einem Tensid und EDTA)
Gruppe 5: Alkohol (95 %)
Gruppe 6: Citronensäure (40 %)
Gruppe 7: Aqua dest. (destilliertes Wasser)

Nach der Aufbereitung mit dem *BioRaCe*-System von # 20 bis # 60 wurden die Kanäle der einzelnen Gruppen mit 5 ml der jeweiligen Flüssigkeit für drei Minuten gespült. Nach der Spülung wurde der Kanal mit Papierspitzen getrocknet, um ein weiteres Einwirken zu verhindern. Nachfolgend wurde der auf Tricalciumsilikat basierende Sealer *BioRoot RCS* mit einem Kunststoffspatel angemischt und mit einer Papierspitze in die Wurzelkanäle eingebracht, wobei auch die Spreader befüllt wurden.

Ergebnisse

Bei der Beurteilung der Haftwerte zeigte sich, dass nach der Spülung mit NaOCl die höchsten Haftverbunde gemessen wurden (Median: 2,71 MPa), die sich jedoch nicht signifikant von der Kontrollgruppe mit Wasser (Median: 2,8 MPa) unterscheiden. Die geringsten Haftwerte ergeben sich bei der Spülflüssigkeit CHX (Median: 1,26). Bei der vorgenannten Betrachtungsweise geht hervor, dass *Qmix 2in1*, ein Tensid aus Chlorhexidin und EDTA ebenfalls geringe Haftwerte aufweist. (Median: 1,85 MPa). Der Haftverbund nach der Spülung mit CHX war signifikant schlechter als bei allen anderen Spülungen. Zudem war der Haftwert nach der Spülung mit *QMix 2in1* signifikant schlechter als nach der Spülung mit NaOCl, da *QMix 2in1* ebenfalls CHX enthält.

Schlussfolgerungen

Jede Spülflüssigkeit hat einen kleinen Effekt auf die Haftfestigkeit des Sealers. Die höchste Haftfestigkeit erreichte NaOCl neben der Kontrollgruppe mit Wasser. Bei EDTA und Citronensäure, die eine dekalzifizierende Wirkung haben und die Schmierschicht auflösen, konnten nach NaOCl die höchsten Haftwerte erreicht werden. Daraus kann geschlossen werden, dass der Sealer eine andere Haftfestigkeit aufweist, wenn die Schmierschicht belassen wird. Calcium-Ionen spielen vermutlich eine relevante Rolle bei dem Haftverbund zwischen Dentin und Sealer.

3 Summary

Introduction

Many studies have described the changes induced by rinsing solutions in dentin. In addition, many studies also deal with the cumulative influence of different rinsing protocols on the adhesive bond between sealer and dentin. The influence of the individual rinsing liquids on the bond between the new biocompatible and biologically active sealer *BioRoot RCS* (Septodont) and the root canal dentin has not yet been investigated.

Material and methods

Extracted human teeth of different ages were used for the study. After extraction, they were stored in 0.5% chloramine T solution until the start of the experiments. Seventy teeth with straight root canals and round root cross-sections were examined. The selection of individual teeth was based on a radiographic assessment of canal morphology. Teeth with a curved root canal, an obliterated canal or an excessively wide canal diameter were excluded. Teeth with straight, non-fractured and caries-free roots and an intact apex, i.e. completed root growth and no root resorptions, were selected for the study. The roots were then short decoronated end to a length of 9 mm and then divided into seven groups:

Group 1: NAOCI (3%) (sodium hypochlorite)
Group 2: EDTA (17%) (ethylendiaminetetraacetate)
Group 3: CHX (2%) (chlorhexidinedigluconate)
Group 4: *Qmix 2in1* (solution of chlorhexidinedigluconate, a surfactant and EDTA)
Group 5: Alcohol (95%)
Group 6: Citric acid (40%)
Group 7: Distilled water

After preparation with the *BioRaCe* system from # 20 to # 60, the channels of each group were rinsed with 5 ml of the respective irrigation for three minutes.

After irrigation the canal was dried with paper tips to prevent further exposure. The tricalcium silicate-based sealer *BioRoot RCS* was mixed with a plastic spatula and applied to the root canals with a paper tip, filling the spreaders as well.

Results

The assessment of the bond strength values showed that the highest bond strength values were measured after irrigation with NaOCl (median: 2.71 megapascals (MPa)), although there were no significant differences compared to the control group with water (median: 2.8 MPa). The lowest bond strength were found with the rinsing liquid CHX (median: 1.26). The Results shows that *Qmix 2in1*, a surfactant made from CHX and EDTA, also has low bond values. (Median: 1.85 MPa). The bond after rinsing with CHX was significantly worse than with all other rinsings. In addition, the bond strength after rinsing *with QMix 2in1* was significantly worse than after rinsing with NaOCl, because *QMix 2in1* also contains CHX.

Conclusion

Each rinsing solution has a small effect on the adhesive strength of the sealer. NaOCl achieved the highest adhesive strength next to the control group with water. With EDTA and citric acid, which have a decalcifying effect and dissolve the smear layer, the highest adhesion values were achieved after NaOCl. Consequently, it can be concluded that the sealer has a different adhesive strength if the smear layer is left in place. Calcium ions probably play a relevant role in the bond between dentin and sealer.

4 Einleitung

Die Endodontie ist ein Teilbereich der Zahnheilkunde, der sich mit der Anatomie, Histologie und Physiologie des Endodontiums und der Ätiologie, Epidemiologie, Pathologie, Prävention, Diagnostik und Therapie von Erkrankungen des Endodonts und den benachbarten periradikulären Geweben des Endodonts beschäftigt [115]. Die endodontische Behandlung verfolgt mehrere Ziele, die für den betroffenen Zahn von Bedeutung sind: Diesbezüglich geht es um die Erhaltung eines Zahnes mit entzündeter oder infizierter Pulpa, die Vermeidung der Schädigung oder Erkrankung von Nachbarstrukturen (apikales und laterales Parodont, Alveolarknochen) und die Heilung von bereits manifesten pathologischen Veränderungen. Im Zuge der historischen Entwicklung der Endodontie wurde bereits frühzeitig deutlich, dass die Zahnextraktion nicht immer die primäre Lösung ist. So wurde mit einem Schädelfund aus der Wüste Negev, der auf ein Alter von 200 v. Chr. geschätzt wird, erstmals ein Bronzedraht gefunden, der bis in den Wurzelkanal eines oberen Schneidezahns eingeführt worden war [66]. Im Jahr 1782 wurden von Fauchard in seinem Werk „Le chirurgien dentiste“ Instrumente zur Trepanation beschrieben. Für die Aufbereitung der Wurzelkanäle und das Kauterisieren wurden gebogene Messingdrähte von der Länge einer Stricknadel verwendet, die mehrmals glühend erhitzt und in die Kavität eingebracht wurden [66]. Kavitäten und Kanäle wurden mit Blei gefüllt oder mit Stiftkronen versorgt [66]. Aus dem Jahre 1824 stammt die erste überlieferte Rechnung über eine Wurzelkanalfüllung mit gestopfter Goldfolie, die von Hodson gefunden wurde [66]. Die Methoden der Wurzelkanalbehandlung wurden in der Folgezeit grundlegend weiterentwickelt, sodass heutzutage unterschiedliche Behandlungsmethoden und Produkte für eine möglichst lange Erhaltung der natürlichen Zähne in der Mundhöhle zur Verfügung stehen. Der Jahresbericht 2017 der Kassenzahnärztlichen Bundesvereinigung zeigt daher auch eine Zunahme der Wurzelkanalbehandlungen. Die Anzahl der Extraktionen ging dadurch in den alten Bundesländern im Zeitraum von 1975 bis 2014 von 18,4 Mio. auf 10,6 Mio. zurück [94]. In den neuen Bundesländern verringerte sie sich im Zeitraum von 1991 bis 2014 von 4,7 Mio. auf 2,2 Mio. [94]. Die Wurzelkanalbehandlung hat demgegenüber immer stärker an Bedeutung gewonnen. So kam es in den alten

Bundesländern in diesem Zeitraum zu einem Anstieg der Wurzelkanalbehandlungen von 3,2 Mio. auf 6,1 Mio. [94].

Die Zähne werden vom Zahninneren versorgt, und beim Wachstum werden dort auch die Zahnhartsubstanzen gebildet. Zum Aufgabengebiet eines Endodontologen gehören die Behandlung devitaler und traumatisierter Zähne, Wurzelkanalbehandlungen und Wurzelspitzenresektionen. Wurzelkanalbehandlungen verfolgen immer das Ziel, den Zahnerhalt zu sichern. Für die endodontische Behandlung gibt es verschiedene Ansätze, die zu einem erfolgreichen Ergebnis führen sollen. Entscheidend für eine gelungene Wurzelkanalbehandlung ist es, die Hohlräume in der Wurzel bis zur Spitze zu reinigen und zu desinfizieren. Dafür werden verschiedene Spüllösungen verwendet, um Bakterien oder andere Erreger zu entfernen. Für eine optimale Wurzelkanalbehandlung benötigt der Zahnarzt unterschiedliche Instrumente, Medikamente, Spüllösungen und geeignetes Füllungsmaterial. Der Dentalmarkt macht die Auswahl für den Zahnarzt allerdings nicht leicht, weil in verschiedenen Abständen neue Spüllösungen, neues Füllungsmaterial und andere Instrumente entwickelt und auf den Markt gebracht werden. Wissenschaftliche Studien belegen, dass das Spülen der Wurzelkanäle ein essenzieller Schritt bei der Endodontie ist [157;78]. Diese Spülungen sollen die Keimzahl erheblich reduzieren und eine mikrobielle Wiedervermehrung im Wurzelkanalsystem verhindern. Mit einer rein instrumentellen Bearbeitung des Wurzelkanals kann die Keimzahl zwar deutlich verringert werden, dabei wird jedoch nur ca. ein Drittel der Wurzelkanaloberfläche erreicht [78]. Zudem entsteht an Stellen, an denen das Dentin bearbeitet wurde, eine Schmierschicht [112], weshalb für eine vollständige Desinfektion des Wurzelkanalsystems eine Spülung mit einer geeigneten Spüllösung erforderlich ist. Relevante Anforderungen an Spülflüssigkeiten sind neben der Desinfektionswirkung die biologische Verträglichkeit, die gewebeauflösende Wirkung sowie eine einfache Applizierbarkeit [82]. Zusätzlich zu diesen Anforderungen gibt es bei der Wurzelkanalspülung Faktoren, die zu Problemen führen können, wie beispielsweise die Schmierschicht, die komplette Reinigung, der Biofilm oder das Dentinerosium. Bislang gibt es noch keine Spülflüssigkeit, die allen Anforderungen gerecht wird, weshalb Zahnärzte unterschiedliche Spüllösungen verwenden [151]. Die am häufigsten verwendeten Spüllösungen sind NaOCl, EDTA und Chlorhexidin. Neben den

Spüllösungen ist auch das Angebot bei den Füllungsmaterialien groß, wobei es verschiedene Sealer mit unterschiedlicher Verarbeitung und Zusammensetzung gibt. In zahlreichen Studien wurden bisher die Veränderungen des Dentins durch den Einfluss der Spüllösungen beschrieben. Auch der kumulative Einfluss verschiedener Spülprotokolle auf den Haftverbund zwischen Sealer und Dentin wird in vielen Studien untersucht. Der Einfluss der einzelnen Spülflüssigkeiten auf den Haftverbund zwischen dem neuen biokompatiblen und -aktiven Sealer *BioRoot RCS* der Firma Septodont und dem Wurzelkanaldentin wurde hingegen bislang noch nicht untersucht.

Der Sealer *BioRoot RCS* wurde im Jahr 2015 von Septodont auf Tricalciumsilikat-Basis entwickelt. Zu den Erfolg versprechenden Eigenschaften von *BioRoot RCS* gehören eine hohe Biokompatibilität und -aktivität sowie gute antibakterielle Eigenschaften [130]. *BioRoot RCS* ist somit in der Lage, die knochenähnliche Hydroxylapatit-Formation und die Proliferation von periapikalen Zellen zu induzieren, wodurch die Heilung gefördert werden kann [130]. Für den langfristigen Erfolg einer Wurzelkanalfüllung ist die Haftkraft zwischen Sealer und Wurzeldentin entscheidend [59;104]. Aufgrund der noch nicht so langen Verfügbarkeit des Produktes *BioRoot RCS* gibt es allerdings bisher keine wissenschaftlichen Daten zur Haftkraft gegenüber dem Wurzeldentin und zum Einfluss verschiedener endodontischer Spüllösungen. In der vorliegenden Arbeit werden daher der Haftverbund zwischen dem Sealer *BioRoot RCS* und dem Wurzelkanaldentin und der Einfluss vorheriger Spülungen anhand von sieben gängigen Spülflüssigkeiten untersucht.

4.1 Wurzelkanalbehandlung

Ziel einer Wurzelkanalbehandlung ist es, das periradikuläre Gewebe zu schützen. Eine Indikation für eine Wurzelkanalbehandlung besteht dann, wenn eine entzündete oder nekrotische Pulpa vorliegt oder eine iatrogene Devitalisierung angestrebt wird, um beispielsweise eine Stiftkrone wegen einer reduzierten koronalen Zahnhartsubstanz einzusetzen [8].

4.1.1 Indikation für eine Wurzelkanalbehandlung

Eine Wurzelkanalbehandlung umfasst nach der Indikationsstellung eine mechanische und chemische Aufbereitung des Zahnes, die Füllung der Kanäle mit geeigneten Füllungsmaterialien und einen dauerhaft dichten Verschluss der Kanaleingänge [115]. Eine Wurzelkanalbehandlung bzw. Wurzelkanalfüllung sollte die folgenden Aufgaben erfüllen: [91;174;115].

- Entfernung des Pulpagewebes – einschließlich Bakterien aus den Wurzelkanälen
- Reinigung und Desinfektion des gesamten Wurzelkanalsystems – inklusive Inaktivierung bakterieller Toxine
- Füllen des gesamten Hohlraumes (Wurzelkanäle) mit entsprechenden gewebefreundlichen Materialien, um eine Reinfektion zu verhindern

Die Hauptaufgaben einer Wurzelkanalbehandlung sind die Eliminierung aller Mikroorganismen und ihrer Abfall- und Nebenprodukte aus dem Wurzelkanal sowie die Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanals [91;174].
Um einen Zahn zu erhalten, sollte statt einer Zahnextraktion zunächst eine Wurzelkanalbehandlung durchgeführt werden. Durch diese wird die Kaufunktion nicht beeinträchtigt und eine Schädigung oder Erkrankung von Nachbarstrukturen vermieden. Eines der Ziele einer Wurzelkanalbehandlung besteht daher darin, pathologische Veränderungen zu heilen [91].
Ist das infizierte Pulpagewebe entfernt und der Wurzelkanal frei von Mikroorganismen, sollte eine bakteriendichte Wurzelkanalfüllung vorgenommen werden. Zur Vermeidung einer koronalen Leakage ist es relevant, die Zugangskavität bakteriendicht zu verschließen, da es ansonsten zu einer Reinfektion kommen kann [91;146;157].
In diesem Zusammenhang stellt die postendodontische Restauration einen relevanten Bestandteil der Therapie dar, der wesentlich zum nachhaltigen Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung und somit zu einer langfristigen Erhaltung der Funktion eines avitalen Zahnes beiträgt [120].
Wesentliche Ziele der mechanischen Wurzelkanalpräparation sind die Entfernung des vitalen und nekrotischen Gewebes, die Reduzierung der

Mikroorganismen und die Präparation einer Wurzelkanalform, die eine ausreichende wandständige Obturation ermöglicht [126].
Aufgrund der infizierten Pulpa können die Bakterien und Mikroorganismen gegebenenfalls bis zu 200 µm tief in die Dentintubuli eindringen, sodass eine vollständige Entfernung der Bakterien nicht möglich ist [171]. Die mechanische Wurzelkanalaufbereitung kann die Keimzahl um das 100- bis 1000-Fache verringern, eine komplette Keimfreiheit kann dadurch jedoch nicht erreicht werden [156].
Durch die verschiedenen Spülflüssigkeiten, die unterschiedlichen Aufbereitungstechniken und die medikamentösen Einlagen soll die Anzahl der Bakterien noch weiter verringert werden [91].
Für die Desinfektion infizierter Wurzelkanäle ist vor allem die apikale Präparationsgröße ein bedeutender Faktor. Dabei ist für eine Desinfektion des apikalen Wurzelkanalabschnitts die Instrumentengröße der International Organization for Standardization ISO 50 gegenüber der Instrumentengröße ISO 25 effizienter [141].
Bei der Aufbereitung ist darauf zu achten, dass der Krümmungsradius erhalten bleibt, wobei der Kanal mindestens auf ISO 30 oder 35 erweitert werden sollte [8].
Die Wurzelkanalbehandlung wird in zwei komplexen Schritten vollzogen – in der mechanisch-chemischen Wurzelkanalaufbereitung und der Wurzelkanalfüllung [185]. Dabei geht es in erster Linie um die Beseitigung der Infektion im Wurzelkanal und die Verhinderung einer Reinfektion des Wurzelsystems und des apikalen Parodonts [185].

4.1.2 Wurzelkanalaufbereitung

Es gibt zwei Arten von Wurzelkanalaufbereitungen – zum einen die herkömmliche Methode mit Feilen und zum anderen die maschinelle Methode mit hoch flexiblen Nickel-Titan-Feilen. Bei der herkömmlichen Methode wird der Wurzelkanal mit Feilen gereinigt, erweitert und geglättet. Durch diese Art der Aufbereitung können sich jedoch kleine Partikel im Wurzelkanal verkeilen und den Kanal verstopfen. Handfeilen können in seltenen Fällen auch in den Wurzelkanälen abbrechen, wobei beides unter bestimmten Umständen zum Verlust des Zahnes führen kann [82]. Bei der maschinellen Methode kann die Wurzelspitze mithilfe von Nickel-Titan-Feilen und drucklosen Auf-und-ab-Bewegungen gut erreicht

werden. Dadurch wird nicht nur eine schnellere Aufbereitung ermöglicht, sondern auch eine eventuelle Verblockung des Kanals weitgehend verhindert. Jedoch kann auch hier ein Instrument im Wurzelkanal abbrechen [82].

4.1.3 Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanals

Nach der Instrumentierung des Wurzelkanals erfolgt eine erneute ausgiebige Spülung mit antimikrobiellen Substanzen. Bewährt haben sich in diesem Zusammenhang unter anderem NaOCl, Chlorhexidin (CHX) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2) als Spüllösungen für die Desinfektion, und EDTA und Citronensäure für die Entfernung der Schmierschicht [82]. Manche Behandler halten diesen Schritt für einen besonders relevanten Aspekt der Wurzelkanalbehandlung, weil sie davon ausgehen, dass die Schmierschicht zahlreiche Bakterien beherbergt und eine adäquate Adaptation des Wurzelfüllmaterials verhindert. Das Ausschwemmen von Dentinspänen oder Füllungsresten kann mit physiologischer NaOCl-Lösung durchgeführt werden. Danach kann unmittelbar vor der Wurzelkanalfüllung Alkohol für die Kanaltrocknung eingesetzt werden [82]. Darüber hinaus werden für den dentalen Gebrauch zahlreiche andere Spülflüssigkeiten mit unterschiedlichen Funktionen verwendet. Für ein optimales Ergebnis sollte eine Spülflüssigkeit über die folgenden relevanten Eigenschaften verfügen [82]:

- Auflösung des organischen und anorganischen Materials sowie der Schmierschicht und eine Desintegration des Biofilms
- breite bakterizide Wirkung
- Inaktivierung bakterieller Toxine
- gute Gewebeverträglichkeit und geringe Toxizität
- erleichtertes mechanisches Arbeiten mit Feilen durch Schmiereffekt
- Abtransport von Debris und Dentinspänen
- keine gegenseitige Neutralisation der verwendeten Flüssigkeiten
- geringe Oberflächenspannung

Mit einer mechanischen Aufbereitung des Wurzelkanals kann keine Keimfreiheit erreicht werden. Sie kann nur zu einer Verringerung der Keimzahl führen, weil

manche Abschnitte des Kanals mit der mechanischen Aufbereitung nicht erfasst werden können [156].

4.2 Spülflüssigkeiten

Die Anzahl der Bakterien, die die Aufbereitung und Desinfektion im Wurzelkanal überleben, sollte so gering wie möglich sein, weshalb versucht werden sollte, ihnen die Nahrungsgrundlage zu entziehen.
Aufgrund dessen empfiehlt sich neben der vollständigen Entfernung der organischen Gewebereste auch die der Schmierschicht.
Das Reinigen, Desinfizieren und Aufbereiten des Wurzelkanalsystems mit Spülflüssigkeiten sind die relevantesten Faktoren bei der endodontischen Behandlung [29]. Diesbezüglich verwiesen bereits McComb und Smith darauf, dass ein Aufbereiten des Kanals mit den üblichen Methoden zur Bildung einer Schmierschicht an der Dentinwand führen kann [112]. Diese Schmierschicht enthält sowohl organische als auch anorganische Bestandteile, die zusätzlich mit Bakterien durchzogen sind [165;184]. Die Schmierschicht hat durchschnittlich eine Dicke von 1 bis 2 µm und dringt bis zu 40 µm in die Dentintubuli ein [174]. In der Literatur wird darüber diskutiert, ob sich die Entfernung der Schmierschicht positiv auf die Adhäsion zwischen den Wurzelkanalfüllmaterialien und dem Dentin auswirkt [186]. In einigen Studien konnte nachgewiesen werden, dass zum Beispiel bei *AH 26* bei der Entfernung der Schmierschicht durch geeignete Spülflüssigkeiten ein erhöhter Haftverbund und nur geringe Microleckagen entstanden sind, während es bei anderen Sealern, wie beispielsweise *Ketac Endo*, durch die Schmierschicht zu keiner Beeinträchtigung der Adhäsion gegenüber dem Dentin kam [162;164;168].

4.2.1 Natriumhypochlorit

NaOCl ist gegenüber den meisten der endodontisch relevanten Mikroorganismen effektiv antimikrobiell wirksam und hat zusätzlich eine auflösende Wirkung auf vitales und avitales Gewebe [35;152]. Durch eine Erwärmung der Lösung von Zimmertemperatur (20 °C) auf Körpertemperatur (37 °C) erhöhen sich deren gewebeauflösende und antimikrobielle Wirkung signifikant [79; 152]. Die in der

Literatur empfohlene Konzentration für die Desinfektion der Kanäle sollte zwischen 1 und 3 % betragen. Von entscheidender Bedeutung ist auch die Einwirkzeit von 30 bis 60 Minuten [163], denn erst danach wird der Biofilm aufgelöst und zerstört. Deshalb muss der Kanal während der mechanischen Aufbereitung permanent mit NaOCl gespült werden [151]. NaOCl wirkt proteolytisch, wobei es die Peptidketten fragmentiert und die Protein-Endgruppen chloriert. Die lytische Wirkung gegenüber Mikroorganismen und Gewebe sowie die auflösende Wirkung gegenüber der organischen Dentinmatrix ergeben sich durch die entstehenden N-Chloramine, die weiter abgebaut werden [184]. Die beliebte Aktivierung mit Ultraschall führt bei NaOCl zu einer Verbesserung seiner Wirkungen [92]. Durch die Unterstützung mit Ultraschall kommt es zum sogenannten Acoustic Streaming, wodurch die Spülflüssigkeit bis in die apikale Region eindringen und ihre Wirkung entfalten kann [92]. Außerdem wird die Flüssigkeit durch den Ultraschall erwärmt, was zu einem besseren Austausch der Flüssigkeit beiträgt [92]. Zudem wurde eine gute antibakterielle Wirkung gegen ein großes Keimspektrum bei einer akzeptablen Zytotoxizität auch gegenüber Pilzen wie *Candida albicans* bestätigt [153]. Auch gegen den Keim *Enterococcus faecalis (E. faecalis)* konnte bei Revisionsbehandlungen eine gute Wirksamkeit nachgewiesen werden [179]. In wässriger Lösung dissoziiert NaOCl in Hypochlorit-Ionen (ClO^-) und Natrium-Ionen, wobei die ClO^- dann mit Wasser unter Bildung von hypochloriger Säure (HOCl) und Hydroxid-Ionen reagieren. ClO^- und HOCl sind starke Oxidationsmittel [189]. Die Spülflüssigkeit hat einen pH-Wert zwischen 12 und 13 und wirkt stark oxidierend [184]. Der Wirkmechanismus von NaOCl bezieht sich auf die Zerstörung der Bakterienhülle und die Chlorierung von funktionellen Gruppen [188].

Die antimikrobielle Wirksamkeit ist hingegen nur in einem geringen Umfang von der Konzentration der Spülflüssigkeit abhängig. Von entscheidender Bedeutung sind dafür ein regelmäßiger Austausch der Spülflüssigkeit, die Verweildauer der Spüllösung im Wurzelkanal und das insgesamt eingesetzte Volumen, da die Wirkung von der Anzahl der freien ClO^- abhängt [88;189]. Für die Verwendung von NaOCl wird eine 1 bis 3%ige Konzentration empfohlen [88;187]. Kommt es bei einer 0,5%igen Konzentration zu einem Kontakt mit vitalem Gewebe, wird die Flüssigkeit durch das zirkulierende Blut fortgetragen, ohne toxisch auf das gesunde Gewebe einwirken zu können [88]. Vitales Gewebe kann bei höheren

Konzentrationen wie 5,25 % aufgelöst werden. Bei einem Kontakt des periapikalen Gewebes kann es bei höheren Konzentrationen zu periapikalen Gewebenekrosen, Nervenschädigungen und starken Schmerzen kommen [137;188]. Ein Kontakt mit der Haut und den Schleimhäuten kann zu Kolliquationsnekrosen führen, und ein Kontakt mit dem Auge zu Irritationen der Cornea [162].
Die organischen Bestandteile der Schmierschicht können durch NaOCl nicht vollständig entfernt werden [115;190], denn die Fähigkeit von NaOCl zur Gewebeauflösung ist konzentrationsabhängig und erfolgt nur, solang freies Chlor (OCl^- und HOCl) in der Lösung vorhanden ist [153]. NaOCl verfügt daher über eine erhöhte Wirksamkeit bei niedrigkonzentrierten Lösungen und behält seine gute antimikrobielle Wirksamkeit bei einer geringen Toxizität. NaOCl wird unwirksam, wenn es mit EDTA oder Citronensäure verwendet wird [153;190]. Demgegenüber beeinflusst NaOCl das EDTA bei seiner Wirkung nicht [153]. Da Serumproteine und Dentinspäne schnell die Wirksamkeit von NaOCl herabsetzen können, ist ein ständiger Austausch der Spüllösung erforderlich. Eine Erhöhung des umgesetzten Volumens verbessert dabei nicht nur den Abtransport des erzeugten Dentinabriebs und beugt dadurch Verblockungen vor, sondern führt auch nachweislich zu einer besseren Keimreduktion [179].

4.2.2 Ethylendiamintetraessigsäure

Ethylendiamintetraessigsäure bzw. EDTA, das Tetraanion der Ethylendiamintetraessigsäure, ist ein sechszähniger Komplexbildner. Die Natriumsalze von EDTA wirken in einer wässrigen Lösung mit Konzentrationen zwischen 10 bis 17 % als potente Chelatbildner, wobei sie vor allem Calcium-Ionen binden können. EDTA kann dadurch vor allem die anorganischen Bestandteile der Schmierschicht entfernen, Calcium aus dem Dentin herauslösen und in der Folge eine Eröffnung der Dentintubuli ermöglichen, wodurch sich eine antimikrobielle Wirkung entfalt et [184]. Das Wurzeldentin wird dadurch chemisch erweicht, was das Auffinden und die Katheterisierung enger und kalzifizierter Kanäle erleichtert [90]. EDTA wird als Spüllösung oder Paste verwendet und dient hauptsächlich zur Entfernung der anorganischen Bestandteile der Schmierschicht [90]. Im Unterschied zu NaOCl weist EDTA eine geringe irritierende Wirkung auf das apikale Gewebe auf [171]. Das Herauslösen von Calcium-Ionen hängt von der Konzentration und

Einwirkdauer des EDTAs ab [90]. In der Endodontologie werden am häufigsten 15%ige Lösungen mit einem pH-Wert von 7,3 eingesetzt [90]. Der Wirkmechanismus von EDTA ist begrenzt, weil ein Molekül aufgrund seiner Größe immer nur an ein Calciumion binden kann. Die demineralisierende Wirkung endet daher, wenn alle Chelator-Moleküle mit Calcium besetzt sind [177]. Deshalb wird die Lösung schnell unwirksam und muss öfter gewechselt werden [180]. Da EDTA höchstwahrscheinlich an das Hartgewebe bindet, verfügt es über keine Tiefenwirkung im Dentin [85;123;171]. Der koronale und mittlere Teil des Wurzelkanals ist etwas weiter als der apikale Teil, weshalb es dort zu einem stärkeren Reinigungs- und Erosionseffekt kommt [90;147]. Eine zehnminütige Anwendung von EDTA sorgt für eine starke Erosion des Dentins, insbesondere im koronalen und mittleren Kanaldrittel [195]. Eine Einwirkdauer des EDTAs von einer Minute ermöglicht bereits einen demineralisierenden Effekt auf das Kanalwanddentin [171]. EDTA ist in der Lage, Calcium-Ionen aus dem Dentin zu lösen und so die Schmierschicht aufzulösen. In diesem Zusammenhang konnte nachgewiesen werden, dass es durch bestimmte Einwirkzeiten zu einer signifikanten Verringerung der Dentinhärte kommt [184].
Wird NaOCl mit EDTA kombiniert, kommt es zu einer verstärkten Erosion, da die durch EDTA frei gewordenen organischen Anteile des Dentins durch NaOCl aufgelöst werden können [105;146;171]. EDTA behält seine antibakterielle Wirkung sowie seine bindende Wirkung gegenüber Calcium-Ionen auch dann, wenn NaOCl vorhanden ist, da es dieses inaktiviert. Demgegenüber verliert NaOCl bei der Mischung mit EDTA seine gewebeauflösende Wirkung [153].

4.2.3 Citronensäure

Auch Citronensäure wird zur Entfernung der Schmierschicht verwendet. Bei höheren Konzentrationen (bis zu 50 %) wird jedoch nicht nur die Schmierschicht aufgelöst, sondern es werden auch Teile des peritubulären Dentins angegriffen [80;45]. Im Unterschied zu EDTA verfügt Citronensäure zusätzlich über einen starken antibakteriellen Effekt [179]. Es handelt sich um eine organische Säure, die mit mehrwertigen Metall-Ionen Komplexe bildet. Der organische Teil der Schmierschicht wird dabei durch die Citronensäure entfernt [179]. Die Calcium-Ionen werden unabhängig von der Konzentration – aber abhängig vom pH-Wert

– aus dem Dentin herausgelöst [192]. Die stärkste Demineralisation zeigte sich bei Citronensäure bei einem pH-Wert von 1,1 bis 1,9 [80]. Die Effektivität steht in keinem Zusammenhang mit dem pH-Wert, da bei unterschiedlichen pH-Werten jeweils die gleiche Menge von Calcium-Ionen frei wird [173]. Die optimale Einwirkdauer für Citronensäure wurde in vielen Studien erforscht, ein eindeutiges Ergebnis wurde allerdings nicht gefunden. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die meisten Calcium-Ionen in den ersten drei bis fünf Minuten in Lösung gehen [118;148;173]. Kontrovers wird diskutiert, ob Citronensäure die Schmierschicht besser entfernt als EDTA, weil es zu einer höheren Anzahl von Komplexbildungen mit Calcium kommt [112;118;190].

EDTA in 17%iger Konzentration führt zu einer rauen Oberfläche des intertubulären Dentins. Im Gegensatz dazu ergab sich bei Citronensäure bei dem intertubulären Dentin eine glatte Oberfläche [155]. Die antimikrobielle Wirkung ist pH-abhängig, da Citronensäure bei einem niedrigen pH-Wert in der Lage ist, Proteine und Enzyme zu denaturieren [184]. Aufgrund der fehlenden Wirksamkeit von Citronensäure gegenüber *C. albicans* und *E. faecalis* kann sie nicht die primäre Spüllosung in der Endodontologie sein [159]. Deshalb kann NaOCl als Spüllösung auch nicht sinnvoll durch Citronensäure ersetzt werden.

Die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) empfiehlt die Anwendung von Citronensäure zur Auflösung der Schmierschicht, weist aber gleichzeitig auf die Gefahr der Auflösung intertubulären Dentins bei hohen Konzentrationen (30 %) hin [82].

4.2.4 Chlorhexidin

CHX wird bereits seit längerer Zeit als Alternative für NaOCl diskutiert und in 0,1 bis 2%igen Lösungen verwendet.

Die Wirkung von CHX beruht auf einer Adsorption an der Zellwand von Mikroorganismen, die zu einem Austritt intrazellulärer Komponenten führt [64]. Bei geringen Konzentrationen wirkt CHX bakteriostatisch, während es bei höheren Konzentrationen bakterizid wirkt [64]. Im Unterschied zu NaOCl zeigt CHX jedoch keine gewebeauflösende Wirkung und kann Endotoxine nicht neutralisieren [64]. Allerdings verfügt es über eine gute Gewebeverträglichkeit und eine geringe Toxizität [64]. Darüber hinaus weist CHX im Unterschied zu den anderen

Spüllösungen eine außerordentliche Substantivität auf: Auch nach zwölf Wochen zeigten Dentinproben, die zehn Minuten mit 2%iger CHX-Lösung behandelt worden waren, noch eine antibakterielle Wirkung [64].

Die niedrige Toxizität, die hohe Substantivität und eine starke antibakterielle Wirkung sind daher bedeutende Eigenschaften von CHX [135;189]. Ein Bindungsort für das positiv geladene CHX, das an negativ geladene Gewebestrukturen bindet, ist Hydroxylapatit als Bestandteil des natürlichen Zahnes [190]. Die gebundenen Moleküle können über einen längeren Zeitraum in kleinen Mengen freigesetzt werden [145;151], sodass eine antibakterielle Wirkung über die Einwirkzeit hinaus möglich ist, was als Substantivität bezeichnet wird [187].

Auf der Schleimhaut in der Mundhöhle sollte die Konzentration bei 0,1 bis 0,2 % liegen, und für die Spülung im Wurzelkanal sollte eine Konzentration von 2 % verwendet werden [145;186]. Eine gewebeauflösende Wirkung ist bei CHX nicht bekannt, und gegen gramnegative Bakterien ist CHX weniger wirksam. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass bakterielle Lipopolysaccharide nicht inhibiert werden [116]. Deshalb wird CHX auch nicht als Standardspülflüssigkeit für die Wurzelkanaldesinfektion eingesetzt. Ein Vorteil von CHX besteht hingegen darin, dass es eine gute Biokompatibilität aufweist und in einer geringen Konzentration unbedenklich ist. Der antibakterielle Effekt beruht auf dem stark basischen, positiv geladenen, hydrophoben und lipophilen Charakter von CHX, durch den es die Bakterienzellmembran überwinden kann [168].

Die Phospholipide der Bakterienzellmembran werden durch das positiv geladene CHX-Molekül gebunden, wodurch die Bakterienzellwand beschädigt, wird [87]. Chlorhexidin führt in geringen Konzentrationen allerdings lediglich zu einer Bakteriostase, und erst bei höheren Konzentrationen kommt es durch Präzipitation und Koagulation des bakteriellen Zytoplasmas zu einem zytotoxischen Effekt [87, 180]. CHX wirkt auch gegen Keime und Pilze, die sich häufig im Wurzelkanal befinden, sowie gegen Keime, die insbesondere bei endodontischen Revisionsfällen nach endodontischen Misserfolgen vorkommen [176]. Diese Keime sind gegen NaOCl und Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) teilweise resistent, weshalb zusätzlich mit CHX gespült werden sollte [176]. Im Unterschied zu NaOCl weisen EDTA und Chlorhexidin nur einen geringen gewebeauflösenden Effekt auf [153].

Die Eigenschaft der Substantivität kann wegen der kurzen Spülzeit und dem damit verbundenen kurzen Kontakt mit dem Dentin nicht vollständig entfaltet

werden, weil die Zeit nicht ausreicht, um den Wurzelkanal mit CHX-Molekülen zu sättigen [106]. Die antibakterielle Wirkung wird durch Dentinspäne und Serumproteine reduziert [163;193]. Wird CHX in Kombination mit NaOCl eingesetzt, kann es durch eine Reaktion von NaOCl mit CHX zu Verfärbungen des Dentins und rötlichen Ausfällungen von Parachloranilin kommen [59;104]. Um beide Spüllösungen verwenden zu können, wird daher eine Zwischenspülung mit Alkohol oder EDTA empfohlen, mit der die Bildung von Parachloranilin verhindert werden kann [186]. Eine Zwischenspülung mit Kochsalzlösung oder Aqua dest. konnte die Ausbildung von Parachloranilin nur reduzieren [103].

4.2.5 Alkohol

Spülungen des Wurzelkanals mit Alkohol können mit einer Konzentration von 70 bis 95 % vor der Obturation zur Trocknung des Kanals verwendet werden. Ob Alkohol einen negativen oder positiven Effekt auf den Haftverbund hat, konnte noch nicht geklärt werden. Stevens et al. konnten zeigen, dass eine Abschlussspülung mit 95%igem Ethanol zu keiner besseren Vernetzung des Sealers mit dem Dentin führt [164]. In anderen Studien wurde hingegen nachgewiesen, dass mit einer Spülung mit Alkohol eine Erhöhung der Penetration des Sealers in das Dentin und eine Verringerung einer Leakage in der Wurzelkanalfüllung erreicht werden konnten [139]. Alkohol verfügt über ungenügende antimikrobielle Eigenschaften, kann aber bei einer Applikation unmittelbar vor der Wurzelkanalfüllung für eine Trocknung des Kanals verwendet werden [139]. Bei einer Konzentration von 70 bis 96 % ermöglicht er durch eine schnelle Verdunstung eine Mitnahme von Feuchtigkeit aus dem Wurzelkanalsystem und dadurch eine beschleunigte Trocknung [139]. Außerdem kommt es im Zuge dessen zu einer Tiefentrocknung der Dentintubuli [82]. Darüber hinaus reduziert Alkohol dabei die Oberflächenspannung der Wurzelkanalwand und erleichtert damit die Penetration des Sealers in die Dentintubuli [139].

4.2.6 *QMix 2in1*

QMix 2in1 ist eine klare Lösung von Chlorhexidin, einem Tensid und EDTA. Die antibakterielle Wirkung von *QMix 2in1* ist *in vitro* stärker als die einer 2%igen NaOCl-Lösung und einer 2%igen CHX-Lösung, jedoch geringer als die einer

6%igen NaOCl-Lösung [178]. Bei der Entfernung der Schmierschicht ist *QMix 2in1* einer 17%igen EDTA-Lösung *in vitro* überlegen [54].
Ein Vorteil von *QMix 2in1* ist seine geringere Toxizität im Vergleich mit einer 3%igen NaOCl-Lösung, einer 2%igen CHX-Lösung und einer 17%igen EDTA-Lösung. Es fehlen bislang jedoch weitere Untersuchungen, um die Wirksamkeit von *QMix 2in1* in vitro bewerten zu können [54;130].

4.3 Schmierschicht (Smear layer)

Bei einer Wurzelkanalbehandlung und der damit verbundenen mechanischen Präparation des Kanals mit Feilen entsteht immer eine Schmierschicht, ein sogenannter Smear Layer, auf der Oberfläche des Wurzelkanalwanddentins [112]. Die Schmierschicht besteht aus Pulparesten, denaturiertem Kollagen, Dentinspänen, Odontoblasten-Fortsätzen und bei infizierter Pulpa auch aus Bakterien und Pilzen [76;141]. Die Schmierschicht wird in zwei Typen unterteilt: eine oberflächliche und die Kanalwand bedeckende und eine in die Dentintubuli hineingepresste Schmierschicht, die primär aus anorganischen Anteilen und einer nicht genau definierten Matrix besteht [112]. Der Smear Layer kann bis zu 40 µm in die Dentinkanäle eindringen [174], was zu einer Verstopfung der Dentintubuli führen kann, wodurch die Einwirkung von Spülflüssigkeiten und medikamentösen Einlagen behindert werden, kann [169;184]. Grund hierfür ist, dass durch diese Schicht eine dichte Verbindung des Sealers zum Wurzelkanaldentin und eine Penetration des Sealers in die Dentintubuli verhindert wird [166;186]. Dadurch kann es zu einer Microleakage kommen, die zu einer Reinfektion und Reinflammation des periapikalen Gewebes führen kann [154]. Aufgrund dessen werden heutzutage in der Regel Spülflüssigkeiten verwendet, mittels derer diese Schmierschicht entfernt werden kann [90;105]. Mit den Wurzelkanalfüllpasten kann nur dann eine tiefe Penetration in die Dentintubuli erreicht werden, wenn die Schmierschicht vollständig entfernt wurde [156].
In diesem Zusammenhang werden für die Auflösung der anorganischen Anteile Chelatoren wie Ethylendiamintetraessigsäure oder Citronensäure und für die Auflösung der organischen Anteile NaOCl verwendet [64]. Damit die Spülflüssigkeiten ihre optimale Wirkung entfalten können, sollte die Schmierschicht bereits vorher entfernt werden [90;105]. Zudem wird dadurch die Adaption des Wurzelkanalfüllmaterials an die Kanalwände verbessert [186]. Es ist dennoch

umstritten, ob die Entfernung der Schmierschicht notwendig ist [176], da vermutet wird, dass sich durch die Entfernung dieser Schicht und die damit verbundenen geöffneten Dentinkanälchen die Bakterien in den Kanälchen vermehren und leichter an der Wurzelaußenseite hervordringen können [63;107;145;162].
Eine Verbesserung der Dichtigkeit und Wandständigkeit einer Wurzelkanalfüllung durch die Entfernung der Schmierschicht konnte belegt werden [78]. Außerdem können sich, die in der Schmierschicht eingeschlossenen Bakterien vermehren und über längere Zeit am Leben bleiben [4;21;183]. Auch die DGZMK empfiehlt in ihrer Stellungnahme zur Wurzelkanalspülung eine Entfernung der Schmierschicht [40].

4.4 Wurzelkanalfüllung

Nach der erfolgreichen biomechanischen Aufbereitung und Desinfektion des Wurzelkanals ist es von zentraler Bedeutung, den Wurzelkanal dauerhaft und hermetisch zu verschließen, um eine erneute Besiedlung durch Mikroorganismen und eine Passage von Flüssigkeiten zu verhindern [151]. Außerdem werden dadurch verbliebene Mikroorganismen isoliert und von ihrer Substratzufuhr ausgeschlossen.
Die Wurzelkanalfüllung sollte hauptsächlich aus einem (halb-)festen Kernmaterial in Form eines oder mehrerer Wurzelkanalfüllstifte in einer Kombination mit einer erhärtenden Wurzelkanalfüllpaste (Sealer) bestehen, wobei der Sealer die Inkongruenzen zwischen der Form der Wurzelkanalwand und der des Kernmaterials volumenstabil ausfüllen soll [172].
Dabei dürfen ausschließlich Materialien zum Einsatz kommen, die nach dem Medizinproduktegesetz für solche Indikationen als geeignet ausgewiesen wurden (CE-Zertifizierung). Weichbleibende WF-Pasten sind für einen definitiven Verschluss eines Wurzelkanals ebenso wenig geeignet wie Wurzelkanalfüllungen, die lediglich aus einer Paste (ohne Stifte) bestehen [172]. In der vorliegenden Arbeit wurden anstelle der üblicherweise für die Obturation verwendeten Guttaperchastifte vorbehandelte Spreader verwendet und mit *BioRoot RCS* zementiert. Daher wird an dieser Stelle nicht weiter auf die verschiedenen Füllstifte eingegangen, sondern nur auf die Sealer.

4.4.1 Wurzelkanalfüllpasten

Wie schon bei der mechanischen Aufbereitung besteht auch beim Legen der Füllung das Problem einer abweichenden Anatomie der Wurzelkanäle von der Idealform der genormten Füllstifte [172]. Aufgrund dessen kommt den Sealern die Aufgabe zu, diese Inkongruenzen auszugleichen und auch in kleine Seitenkanäle und Dentintubuli einzudringen, um sie zu verschließen. Dafür sollte der ideale Sealer über unterschiedliche Eigenschaften verfügen, die Grossman wie folgt zusammenfasste [73]:

- gute Adhäsion gegenüber dem Kanaldentin und dem Wurzelkanalfüllstift
- hermetische Versiegelung des Kanalsystems
- Radioopazität
- Volumenstabilität
- keine Verfärbung der Zahnstruktur
- keine Begünstigung des Bakterienwachstums (bakteriostatisch)
- langsame Aushärtung
- Unlöslichkeit in Gewebeflüssigkeit
- Biokompatibilität
- Löslichkeit in Lösungsmitteln eventuell erforderlich bei Revisionen

Da aktuell kein Material alle Anforderungen erfüllt, wird eine Kombination aus einem Stift, in der Regel Guttapercha, und einer Wurzelkanalfüllpaste, dem Sealer, verwendet. Guttapercha allein ist nicht in der Lage, einen dauerhaft dichten Verschluss im Wurzelkanal herzustellen [158]. Der Sealer hat die Aufgabe, den Spalt zwischen dem Guttaperchastift und der Dentinwand auszufüllen sowie laterale Kanäle und den Kanal von apikal und koronal gegenüber Flüssigkeiten und Bakterien zu verschließen [151].

4.4.2 Sealer auf Glasionomerzement-Basis

Bei den Sealern auf Glasionomerzement-(GIZ-)Basis wird ein Calcium-Aluminium-Fluoro-Silikatglaspulver mit einer Polycarbonsäurelösung vermischt. Durch eine Säure-Base-Reaktion unter Bildung eines Calcium-Aluminium-Carboxylats kommt es zu einer Härtung des Sealers. Die Biokompatibilität, das

Abdichtungsvermögen sowie die Gewebeverträglichkeit werden als gut bewertet. Beispiele für diese Art von Sealern sind *Ketac Endo* (3M ESPE) und *Endion* (Voco), die beide als gewebeverträglich gelten [129;158;194]. Sealer auf GIZ-Basis sind nicht resorbierbar. Die chemische Bindung gegenüber der Zahnhartsubstanz ist im Vergleich mit anderen Sealern nicht zwingend höher bzw. von Vorteil. Der Haftverbund zum Dentin bei Sealern auf GIZ-Basis weist gegenüber anderen Sealern (*Tubli-Seal*, *AH Plus* und *Fibrefill*) keine höheren Werte auf [42]. Ein Belassen der Schmierschicht verschlechterte die Haftung von Sealern auf GIZ-Basis auf dem Kanalwanddentin [133;167]. Langzeituntersuchungen zu Sealern auf GIZ-Basis wurden bisher allerdings noch nicht durchgeführt, da diese Sealer kaum noch verkauft werden. *Ketac Endo* und *Endion* werden mittlerweile nicht mehr hergestellt. Lediglich das *Active-GP*-System (GIZ-Sealer und mit GIZ-Partikeln angereicherte Guttapercha-Füllstifte) ist heute noch auf dem Markt verfügbar.

4.4.3 Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis

Diese Sealer werden als Zweikomponenten-Präparate angeboten, die nach dem Vermischen von Flüssigkeit und Pulver aufgrund der Bildung eines Zink-Eugenolates erhärten. Studien konnten zeigen, dass dieses Eugenolat gewebelöslich ist, weshalb diese Wurzelkanalfüllstoffe nur in einer Kombination mit Kernmaterialien (Wurzelkanalfüllstiften) verwendet werden dürfen [122;195].
Unter diesen Bedingungen zeigte der Sealer gute Ergebnisse, und es kam zu einem randständigen Verschluss des Wurzelkanals [122].
Das zytotoxische und kontaktallergene Potenzial des Eugenols kann allerdings im Oberkiefer zu Aspergillosen führen, wenn es zu einer Überpressung des Sealers kommt [195]. Beispiele für Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis sind *Grossman's Cement*, *Roth's Sealer* und *Tubli-Seal*.

4.4.4 Sealer auf Epoxidharz-Basis

Der bekannteste Vertreter eines Sealers auf Epoxidharz-Basis ist *AH 26,* ein Epoxidharz, das durch das Vermischen von zwei Komponenten erhärtet. Unmittelbar nach dem Anmischen kommt es zu einer Freisetzung von Formaldehyd, was als kritisch bewertet wird, da es zytotoxisch ist und nicht im Zahn verweilt,

sondern über Hohlräume im Zahn (Periapex, Dentintubuli) und durch Diffusion in das Zahngewebe und den Kieferknochen wandert [181;184]. Wegen seiner Zusammensetzung und vor allem wegen des Formaldehyds besitzt *AH 26* ein neurotoxisches Potenzial [172]. *AH Plus* ist eine Weiterentwicklung des Produkts, bei dem der Formaldehyd in einer Polymerisationsreaktion umgesetzt und daher nicht mehr freigesetzt wird, wodurch alle zytotoxischen und mutagenen Eigenschaften beseitigt werden konnten [15;162]. Durch eine Polyadditionsreaktion kommt es zu einer Reaktion, wobei Epoxidami-Polymere, entstehen. Diese Polymere gewährleisten die Eigenschaften des Produkts *AH Plus*: gute adhäsive Haftung, Dichtigkeit nach der Aushärtung, Biokompatibilität und hervorragende Dimensionsstabilität [173;195]. Eine uneingeschränkte Biokompatibilität ist jedoch nicht gegeben [86]. Eine ausgezeichnete antimikrobielle Wirkung beim Vorhandensein von endodontischen Problemkeimen wie *E. faecalis* ist einer der Vorteile [180]. Die Penetration der Dentinkanälchen und der Haftverbund zum Dentin sind bei *AH Plus* im Vergleich mit anderen Sealern am stärksten ausgeprägt [111]. Roggendorf et al. konnten durch Microleakage-Untersuchungen zeigen, dass *AH Plus* optimale Abdichtungseigenschaften aufweist [139]. Aufgrund der vielen positiven Eigenschaften wird *AH Plus* in der Literatur auch als Goldstandard für die Wurzelkanalbehandlung bezeichnet [124].

4.4.5 Sealer auf Tricalciumsilikat-Basis (*BioRoot RCS*)

Die Firma Septodont hat mit *BioRoot RCS* einen Sealer entwickelt, der auf Tricalciumsilikat basiert und gute Eigenschaften für einen erfolgreichen Einsatz aufweisen soll [28;153]. In der vorliegenden Dissertation wurde der Haftverbund zwischen dem Wurzelkanaldentin und dem Sealer *BioRoot RCS (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Frankreich)* untersucht.

Dabei handelt es sich nicht um das erste Präparat auf Tricalciumsilikat-Basis. Bereits in den 90er-Jahren wurde das Produkt *MTA (Mineral Trioxid Aggregat*) eingeführt. *MTA* bildet in Verbindung mit Wasser ein Gel mit einem pH-Wert von 12,5. Die verschiedenen Oxide (Natrium- und Kaliumoxide, Aluminiumoxid, Magnesiumoxid, Eisenoxid, Siliciumdioxid) des *MTAs* erhärten nach etwa vier Stunden [173]. In seiner Zusammensetzung ist es identisch mit dem baumarktüblichen Portlandzement [62], und bei einem sauren pH-Wert ist *MTA* löslich [172].

Studien bestätigen ein ideales Abdichtungsverhalten gegenüber Bakterien und eine ausgezeichnete Biokompatibilität von *MTA* [172]. Außerdem wurde festgestellt, dass sich menschliche Osteoblasten gut an *MTA* anlagern [193]. Diese positiven Eigenschaften sorgen dafür, dass *MTA* ein breites Indikationsspektrum in der Endodontologie aufweist. Trotz der vielen Vorteile gibt es aber auch Nachteile. Ein Nachteil von *MTA* ist der hohe Preis, was einerseits zu einem mehrfachen Benutzen der Originalverpackung verleitet und zum anderen zum Erwerb ähnlicher Produkte von der Konkurrenz geführt hat, die günstiger sind als das Original *MTA*. Weitere Nachteile des Produktes ergeben sich durch die Schwierigkeit, die korrekte Zementkonsistenz zu erreichen, die schwere klinische Handhabung, die langen Aushärtungszeiten und die schlechte Revidierbarkeit [152;172]. Außerdem kann *MTA* zu Zahnverfärbungen führen, die nach einer Applikation in diesem Bereich oftmals im zervikalen Wurzelbereich auftreten [139;142]. Diesbezüglich wurde zunächst angenommen, dass die Eisenkomponente im grauen *MTA* für diese Verfärbungen verantwortlich ist. Da allerdings auch nach der Anwendung des weißen *MTAs* Zahnverfärbungen beobachtet wurden, werden sie mittlerweile auf den Radioopaker Bismutoxid zurückgeführt [73].

Nach Anwendung von *MTA* in der apikalen Chirurgie wurde jedoch bislang noch nicht über sichtbare Zahnverfärbungen berichtet. Die Nachteile machten es schwierig, einen Zement herzustellen, der auf Calciumsilikat-Basis beruht und lediglich positive Eigenschaften aufweist. Die Firma Septodont entwickelte das Produkt *Biodentine,* um ein Material herzustellen, das den Indikationsbereich von *MTA* abdeckt, bei dem aber die negativen Eigenschaften reduziert oder vollständig ausgeschlossen werden können. Das Pulver von *Biodentine* enthält Dicalciumsilikat, Calciumcarbonat und als Kontrastmittel Zirkonoxid, das mit einer Flüssigkeit vermischt wird, die Calciumchlorid und Polycarboxylat enthält [38].

Aufgrund seiner Eigenschaften ist dieser Zement eine Alternative zu *MTA*. Die Verarbeitung ist einfacher und kann mit Zementstopfern oder einem Heidemannspatel erfolgen. Die Abbindezeit liegt bei zwölf Minuten, was im Vergleich zu *MTA* mit zweieinhalb Stunden deutlich kürzer ist [38]. *Biodentine* verbindet die positiven Eigenschaften des *MTAs*, wie zum Beispiel Biokompatibilität, Bioaktivität und Abdichtungsvermögen, mit einer verkürzten Abbindezeit und einer einfacheren Verarbeitung in einem Produkt [172]. Weil *Biodentine* kein Sealer ist, hat

die Firma Septodont *Biodentine* zur Wurzelkanalfüllpaste *BioRoot RCS* weiterentwickelt.

Bei dem Abbindevorgang von *BioRoot RCS* soll laut Hersteller keine Schrumpfung auftreten, wodurch eine dichte Wurzelkanalfüllung gewährleistet werden soll [153]. *BioRoot RCS* weist gute Löslichkeitseigenschaften, eine angemessene Aushärtungszeit und eine adäquate Röntgenopazität auf [189]. Die Fließfähigkeit ist nach Khalil et al. im Vergleich mit *AH Plus* geringer, wohingegen die Schichtdicke größer ist [96].

In einer Studie von Viapiana et al. konnten dagegen keine Unterschiede bei der Fließfähigkeit und der Penetration der Sealer in die Dentintubuli festgestellt werden [66]. Es wird davon ausgegangen, dass *BioRoot RCS* bei jeder kalten Obturationsmethode verwendet werden kann. Zudem ist es hydrophil und dringt aufgrund der Partikelgröße der Mineralien in die Dentintubuli ein [153]. Das Bakterienwachstum wird sowohl durch die hermetische und biokompatible Versiegelung als auch durch die Freisetzung eines calciumhydroxidbedingten pH-Werts von 11 verhindert [153]. Gemäß Hersteller zeichnen die antibakteriellen Eigenschaften, die hohe Biokompatibilität und die bioaktiven Eigenschaften den Sealer *BioRoot RCS* besonders aus [153]. Außerdem wird auf die hohe Versiegelung des gesamten Wurzelkanals durch Guttapercha in Kombination mit dem Sealer *BioRoot RCS* hingewiesen [153]. Der Sealer soll in der Lage sein, einen basischen pH-Wert bei der Wurzelkanalfüllung aufrechtzuerhalten und so eine Proliferation periapikaler Zellen zu stimulieren, was zu einer Heilung periapikaler Läsionen beitragen kann [153]. Laut Hersteller induziert der Sealer außerdem eine Neuformation von Hydroxylapatit [153]. Studien von Camps et al. und Dimitrova-Nakov konnten die gute Biokompatibilität und Bioaktivität von *BioRoot RCS* bestätigen [28;164]. Die Frakturanfälligkeit endodontisch behandelter Zähne ist einer der Nachteile einer Wurzelkanalbehandlung [178]. Bei der Verwendung von *BioRoot RCS* im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung zeigte sich, dass die Frakturresistenz von Zähnen erhöht wurde [178]. Die Bestandteile von *BioRoot RCS* – insbesondere die Tricalciumsilikate – können mit der Gewebeflüssigkeit eine Hydroxylapatit-Schicht bilden, die einem Knochen ähnelt [192].

BioRoot RCS soll laut Hersteller über eine ausgeprägte Adhäsion zum Dentin und zu Guttapercha verfügen, wodurch das Risiko der Entstehung von Spalträumen verringert, wird [153]. Außerdem soll *BioRoot RCS* aufgrund seiner

Hydrophilie in der Lage sein, auch in Gegenwart von Feuchtigkeit seine endgültige Härte ausbilden zu können [153].
Eine Studie des Herstellers konnte belegen, dass der Sealer hinsichtlich der Bildung einer Microleakage ähnlich gute Ergebnisse aufweist wie eine Wurzelkanalfüllung mit einem Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis und Guttapercha [153].
Sealer auf Tricalciumsilikat-Basis wirken wegen ihres alkalischen Charakters antimikrobiell [96] – insbesondere dann, wenn EDTA als finale Spülflüssigkeit verwendet wird [66]. Ein alkalischer pH-Wert wirkt daher Resorptionen und Entzündungen entgegen [85]. *BioRoot RCS* weist eine optimale pH-Wert-Gestaltung auf, weil es durch die Freisetzung von Calciumhydroxid zu einer Verschiebung des pH-Werts ins Alkalische kommt, was wiederum zu einer guten antibakteriellen Wirkung führt [153]. Unter Bioaktivität wird verstanden, dass ein Sealer in der Lage ist, eine knochenähnliche Hydroxylapatit-Formation und eine Proliferation von periapikalen Zellen zu induzieren, wodurch die Heilung gefördert wird [130]. Tricalciumsilikate aus dem Sealer fördern das Fibroblasten-Wachstum [192]. Die mineralische Zusammensetzung sorgt dafür, dass die Verfärbung der Zähne weniger stark auffällt, wodurch bei wurzelkanalbehandelten Zähnen im Frontbereich auch der ästhetische Aspekt berücksichtigt werden kann [66]. *BioRoot RCS* enthält kein Bismutoxid zur Verbesserung der Röntgenopazität [66]. Bismutoxid führt, wie gezeigt werden konnte, zu Zahnverfärbungen, wenn es mit NaOCl in Berührung kommt [66], dass bei Wurzelkanalbehandlungen routinemäßig als Spüllösung verwendet wird. Für die erforderliche Röntgenopazität wird Zirkonoxid zu *BioRoot RCS* hinzugefügt [182].
Aufgrund der ähnlichen Zusammensetzung von *Biodentine* und *BioRoot RCS* können die Ergebnisse der Studien zu *Biodentine* teilweise übernommen werden, um die Eigenschaften von *BioRoot RCS* zu bestätigen. So zeigte *Biodentine* eine niedrige Farbstoffpenetration an der Grenze zwischen Dentin und *Biodentine*, was vergleichbar mit der von Komposit und Dentinadhäsiven ist [38,174]. Die gute adhäsive Eigenschaft von *Biodentine* kann durch die Entwicklung einer Mineralinfiltrationszone erklärt werden. Der alkalische Charakter von *Biodentine* sorgt für eine alkalische Ätzung der Dentinoberfläche und zugleich für eine Infiltration des Dentins, da die Ätzung die Oberfläche durchlässiger macht [3]. Eine der relevantesten Eigenschaften von *BioRoot RCS* ist die Biokompatibilität. Die

wenigen bisher verfügbaren Studien bestätigen diese Eigenschaft sowie eine gute Gewebeverträglichkeit von *BioRoot RCS* [28;164;178].

In verschiedenen Vergleichsstudien zu den unterschiedlichen Sealern, unter anderem *AH Plus*, *MTA* und *Pulp Canal Sealer* (Kerr), traten die besten Ergebnisse bei *BioRoot RCS* auf – speziell hinsichtlich dessen Biokompatibilität [89;178]. Durch Präparationen oder Füllungstherapien und die damit verbundene Freilegung des Dentins kommt es zu einer Eröffnung der Dentintubuli und dadurch zu einer Verletzung oder Zerstörung von Odontoblasten. Diese Verletzung führt zu einer Freisetzung von Wachstumsfaktoren, wodurch die Odontoblasten-Aktivität ansteigt [156;158]. Die erhöhte Aktivität wird vermutlich durch Signalmoleküle gesteuert – den sogenannten Transforming Growth Factor. Die Applikation von *MTA* oder *Biodentine* (Calciumhydroxid oder Calciumsilikatzementen) sorgt ebenfalls dafür, dass diese Gewebefaktoren bzw. Signalmoleküle (transforming growth factor(TGF-β1)) freigesetzt werden [86;105;169]. Heutzutage verwenden viele Zahnärzte bei einer Wurzelkanalbehandlung einen einzigen Guttaperchastift je Wurzelkanal. Durch diese Technik kann es jedoch noch immer zu einer Reinfektion des Kanals kommen, da eine vollständige Abdichtung des Kanals mit Sealer und Guttapercha nach wie vor schwierig ist. Daher wird von einer Einstifttechnik abgeraten [130;128]. Bioaktive Sealer wie das *BioRoot RCS* eröffnen für die Einstifttechnik neue Wege, denn laut Herstellerangaben können die Bioaktivität und Biokompatibilität von *BioRoot RCS* die Undichtigkeiten im Wurzelkanal verringern [153]. *BioRoot RCS* ist bioaktiv, sodass es eine Stimulierung physiologischer Prozesse im Knochen und eine Mineralisierung von dentalen Strukturen bewirkt und dadurch tiefer in die Dentintubuli eindringt [28;164]. Im Unterschied zum Sealer *AH Plus* zeigt *BioRoot RCS* keinen zytotoxischen Effekt auf parodontale Stammzellen [188]. Es schafft vielmehr ein günstiges Umfeld für eine periapikale Heilung und verfügt über bioaktive Eigenschaften wie Biokompatibilität, Hydroxylapatit-Bildung, Mineralisierung der Dentinstruktur, Schaffung eines alkalischen pH-Werts und einer geeigneten Abdichtung [189]. Hydraulische Zemente, die auch als Biokeramiken bezeichnet werden, weisen eine gute Biokompatibilität, Bioaktivität und eine antimikrobielle Wirkung auf und sind in der Lage, periapikales Gewebe zu mineralisieren [3]. Aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften sind Biokeramiken bedeutende Alternativen für die Wurzelkanalfüllung. Im Zuge dessen geht es sowohl um ihr hydrophiles

Verhalten, wodurch ihre Wirkung im Dentin nicht behindert, wird [96], als auch um ihre gute Benetzbarkeit, ihre verminderte Viskosität und ihre besseren Eigenschaften zur Abdichtung des Kanals [96]. Duarte et al. haben herausgefunden, dass der innerhalb der Abbindezeit auftretende basische pH-Wert von über 12 antibakteriell wirkt [165].

Weil *BioRoot RCS* darüber hinaus eine knochenähnliche Hydroxylapatit-Formation und eine Proliferation von periapikalen Zellen induzieren kann, wodurch eine Förderung der Heilung möglich ist, ist davon auszugehen, dass es sich um einen Erfolg versprechenden Sealer handeln könnte [130].

5 Ziel der Studie

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, den Einfluss verschiedener Spüllösungen auf den Haftverbund zwischen dem Dentin und dem Sealer *BioRoot RCS* zu untersuchen. Für die Ermittlung der Haftwerte wurde das Pull-out-Verfahren nach Ebert et al. [188] verwendet, und danach wurde zusätzlich analysiert, ob ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Werten und den Frakturmodi besteht.

Endodontische Spülflüssigkeiten können den Haftverbund zwischen Sealer und Wurzelkanaldentin beeinflussen [165;187]. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Studie die folgenden Arbeitshypothesen überprüft:

Arbeitshypothese 1:
Bei den untersuchten Spüllösungen zeigen sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der Effekte auf den Haftverbund von *BioRoot RCS*.

Arbeitshypothese 2:
Chelatoren verbessern den Haftverbund signifikant gegenüber den Spüllösungen, die die Schmierschicht nicht entfernen.

Arbeitshypothese 3:
Die Wurzelkanalspülung mit dem Kombinationspräparat *QMix 2in1* führt zu einem signifikant besseren Haftverbund als die Verwendung der einzelnen Spüllösungen.

6 Material und Methoden

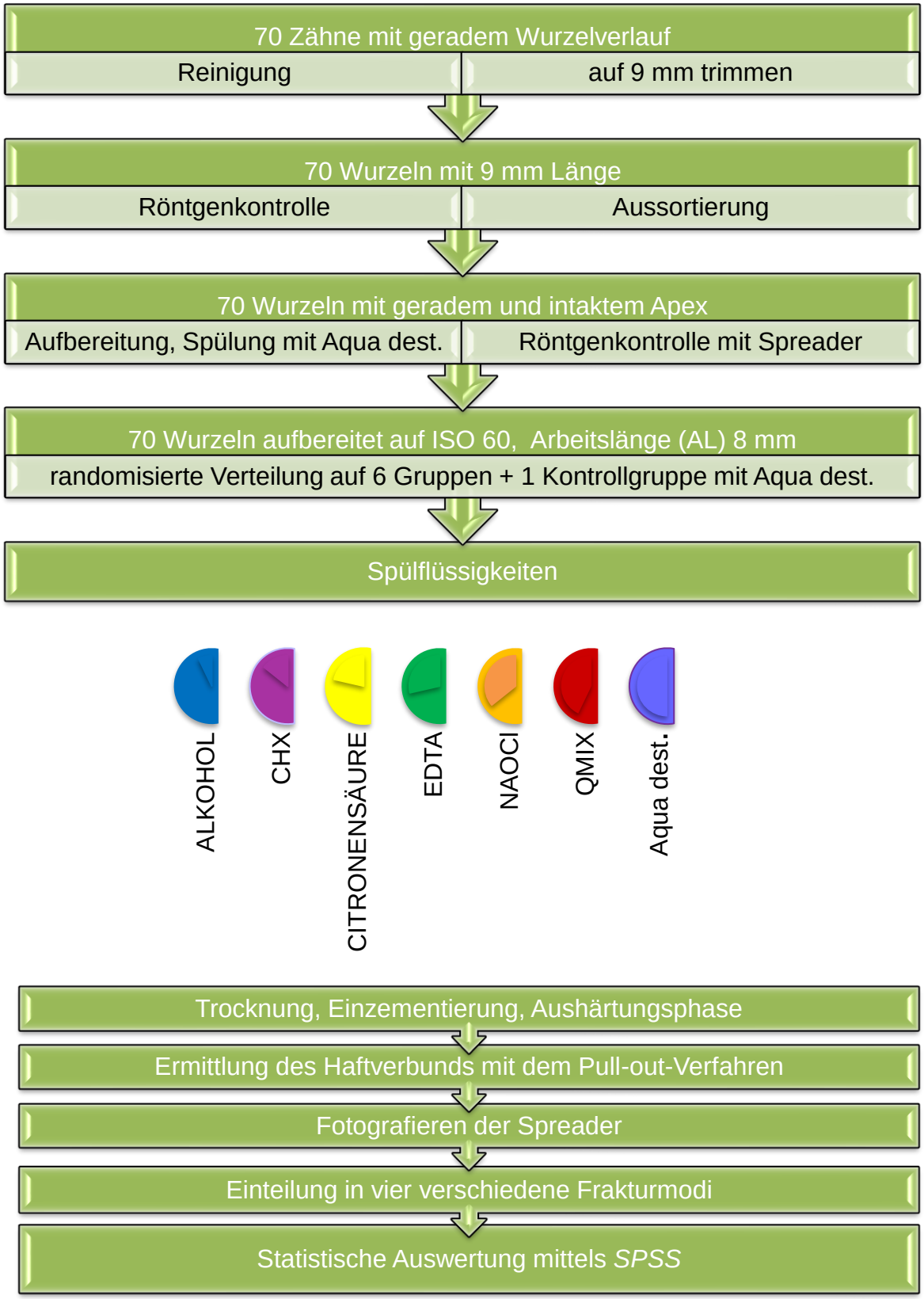

Abb. 1: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

Auswahl und Vorbereitung der Probenzähne

Für die Studie wurden extrahierte humane Zähne unterschiedlichen Alters verwendet, die nach der Extraktion bis zum Beginn der Versuche in Natriumazid-Lösung lagerten (0,9%ige isotonische Natriumchlorid-(NaCl-)Lösung mit 0,001 % Natriumazid). Die Zähne wurden bei niedergelassenen Zahnärzten der Region, nach der Extraktion für die Studie gesammelt. Untersucht wurden 70 Zähne mit geradem Wurzelkanal und rundem Wurzelquerschnitt. Die Auswahl der einzelnen Zähne erfolgte nach einer röntgenologischen Beurteilung der Kanalmorphologie. Nicht verwendet wurden Zähne mit gekrümmtem Wurzelkanal, obliteriertem Kanal oder einem zu großen Kanaldurchmesser. Zähne mit geraden, nicht frakturierten und kariesfreien Wurzeln und einem intakt ausgebildeten Apex, das heißt mit einem abgeschlossenen Wurzelwachstum bzw. ohne Wurzelresorptionen, wurden für die Studie ausgewählt. Nach grober Säuberung wurden mittels Scaler (*Hu-Friedy*) und Skalpell (*B. Braun*, Tuttlingen, Deutschland) der noch vorhandene Faserapparat, das Granulationsgewebe und die Konkremente entfernt. Die gesäuberten Zähne wurden im Anschluss an der Schmelz-Zement-Grenze mit einem Trimmer (*Dentaurum*) auf 9 mm dekapitiert. In der nachfolgenden Abb. 2 wird veranschaulicht, wie die Dekapiturierung aussieht.

Abb. 2: Ausgewählte Zähne vor und nach dem Trimmen auf 9 mm

Die Kanäle wurden vollrotierend maschinell mit der *Crown-down*-Technik mit einem drehmomentkontrollierenden Motor (*EndoPilot,* Schlumbohm, Brokstedt, Deutschland) und *BioRaCe*-Instrumenten (*FKG Dentaire,* La Chaux-de-Fonds, Schweiz) aus Nickel-Titan zunächst auf ISO 60 (*BR7*, Taper .02) mit einer AL von 8 mm aufbereitet.

Dadurch wurde erreicht, dass die Aufbereitung 1 mm vor dem röntgenologischen Apex endet. Als Spülung zwischen dem Feilen wurde Aqua dest. verwendet. Die Zwischenlagerung der auf diese Weise behandelten Wurzeln und Proben fand in Aqua dest. statt, um ein Austrocknen des Dentins zu verhindern.

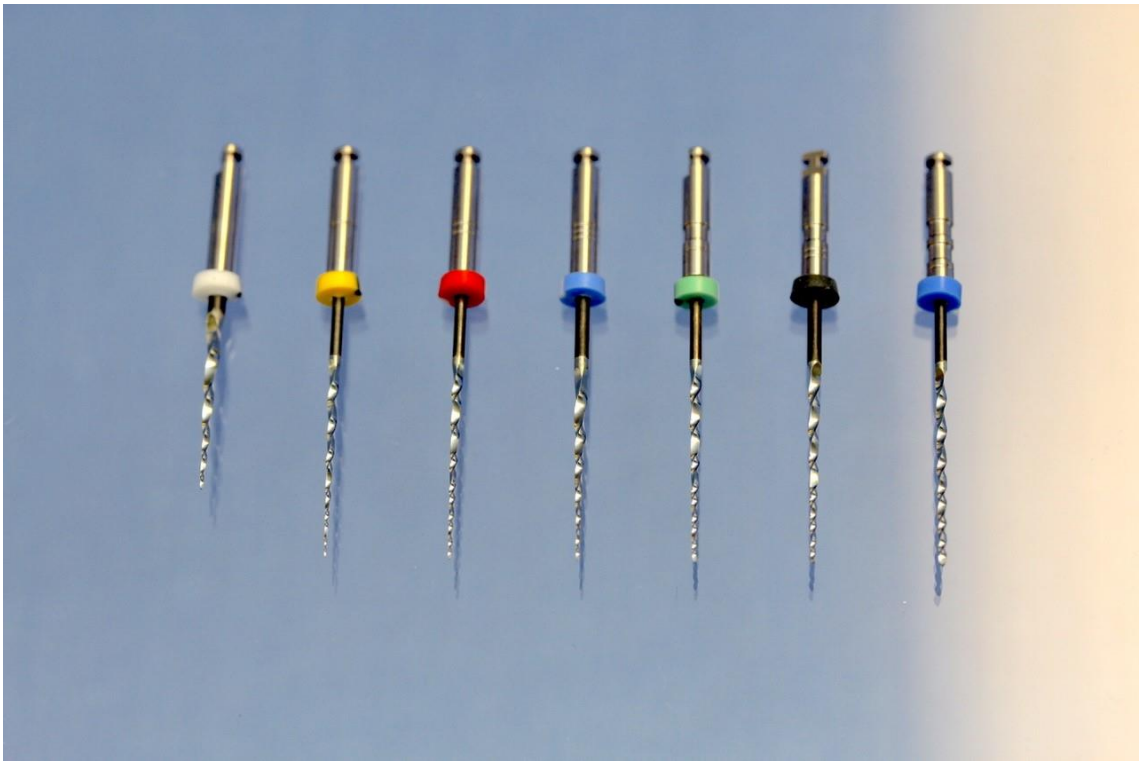

Abb. 3: *BioRaCe*-NiTi-Instrumente – eingesetztes *BioRaCe*-Instrumenten-Set von *BR0* bis *BR5* sowie *BR7*

Für den Versuchsaufbau wurden Stahl-Spreader-Rohlinge (*Dentsply*, Konstanz, Deutschland) der ISO-Größe 25 auf die ISO-Größe 55 adjustiert und anschließend nach einer Einprobe auf *Tug-fit*-Passung verwendet. Sie wurden vor dem Einsetzen entgratet, entfettet, und anschließend wurde die Oberfläche sandgestrahlt (Pulver: Al_2O_3 *Korox* 50 µm, BEGO, Bremen, Deutschland; Sandstrahler: *MultiPoint*, Schütz Dental, Rosbach, Deutschland). Danach wurden sie gereinigt, aktiviert und mit Pulver (*CoJet-Sand* 30 µm, 3M ESPE, St. Paul, MN, USA; Sandstrahler: *MicroEtcher CD,* Danville Materials, CA, USA) silikatisiert.

Um den exakten Sitz im Kanal zu kontrollieren, wurden Röntgenbilder mit adjustierten Spreadern angefertigt und ausgewertet.

Abb. 4: Pull-out-Foto *BioRoot RCS* vor dem Zugversuch mit noch am Spreader hängendem Zahn

Abb. 5: Pull-out-Foto einer Probe nach dem Zugversuch mit dem dislozierten Spreader

Die 70 Wurzeln wurden im Anschluss in sieben Gruppen eingeteilt. Zuerst wurden die Wurzeln aufbereitet, wobei aufgrund der bei *BR6* auftretenden zu großer konischer Aufbereitung koronal auf diese Feile verzichtet wurde.
Nach der Aufbereitung mit dem *BioRaCe*-System von *BR1* bis *BR7* wurden mittels einer geeigneten Einmalspritze (B. Braun, Melsungen, Deutschland) und einer geraden Endo-Spülkanüle (*EndoNeedle Dr. Buquet*, VMK Vedefar, Dilbeek, Belgien) die Kanäle der jeweiligen Gruppe entsprechend mit 5 ml der jeweiligen Flüssigkeit für drei Minuten gespült. Nach der Spülung wurde der Kanal mit Papierspitzen ISO 55 *(Pluradent*, Offenbach, Deutschland) getrocknet, um eine weitere Wirkung der Spüllösungen zu verhindern. Anschließend wurde der zu untersuchende Sealer *BioRoot RCS* der auf Calciumsilikat-Basis beruht, mit dem mitgelieferten Kunststoffspatel angerührt.

Im Zuge dessen wurde ein Löffel Pulver (entspricht 0,5 g Pulver) mit jeweils fünf Tropfen (entspricht 0,18 ml) Sealer-Flüssigkeit vermischt und 60 Sekunden miteinander vermengt, bis eine homogene Paste entstand. Der Sealer konnte mittels Lentulo (*VDW*, München, Deutschland) im Wurzelkanal platziert werden. Danach wurde der Spreader mit Sealer beschickt, in den Wurzelkanal eingebracht und bis auf eine AL von 8 mm in den Wurzelkanal eingeführt.
Um den korrekten Sitz der Spreader zu beurteilen, wurden zusätzlich Röntgenaufnahmen angefertigt.

Nach vierwöchiger Lagerung bei 37 °C im Wärmeschrank (*Heraeus*, Hanau, Deutschland) und 100 % Luftfeuchtigkeit erfolgte die Analyse des Haftverbunds mithilfe des Pull-out-Verfahrens.
Die Scherhaftkraftmessung zwischen Dentin, Sealer und Spreader wurde mit der *Zwick*-Universalprüfmaschine (*Zwick/Materials Testing*, Ulm, Deutschland) durchgeführt, wobei die Zähne nacheinander in eine selbstzentrierende und spannungsarme Zugvorrichtung eingespannt wurden.
Um unerwünschte extraaxiale auf die Probe wirkende Kräfte zu vermeiden, wurde jedes Einspannen auf die richtige räumliche Lage kontrolliert und die Haltebranchen für Spreader und Zahn wurden so ausgewählt, dass sie unter Zug entlang der Stiftachse geschlossen werden konnten. Die Software eines an die Universaltestmaschine angeschlossenen Computers protokollierte das

auftretende Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Newton pro µm (N/µm) und die Stelle des adhäsiven Versagens mit einer maximalen Kraft (F_{max}) in Newton.
Nach 28 Tagen wurden die Haftwerte des getesteten Sealers an der Dentinkanalwand durch einen Scherversuch ermittelt. Dabei bewirkten die axialen Zugkräfte an der Längsachse eine Dezementierung des Stiftes, wobei die Pull-out-Kraft beim Versagen des Haftverbunds gemessen und aufgezeichnet wurde. Um die Scherhaftkräfte in MPa zu erhalten, wurden die gemessenen Versagungswerte (N) durch die Haftfläche (mm^2) zwischen Sealer und Kanalwand dividiert:

Pull-out-Kraft [MPa] = Kraftmaximum F_{max} [N] / Haftfläche [mm^2]

Die Haftfläche entsprach der aufbereiteten Kanaloberfläche, die bei allen Wurzeln bei 17,1 mm^2 lag. Die entzementierten Spreader wurden danach fotografiert, um die Art der Fraktur beurteilen zu können.
An der Universalprüfmaschine wurden für die Messreihe die folgenden Einstellungen gewählt:

Tab. 1: Einstellungen der *Zwick*-Universalprüfmaschine

Einstellungsparameter	
Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min
Rücklaufgeschwindigkeit	300 mm/min
Messlänge Standardweg	50 mm
obere Kraftgrenze	2000 N
Kraftschwelle für die Bruchuntersuchung	0,1 % von F_{norm}
Kraftabschaltschwelle	manuell nach der vollständigen Entfernung aus dem Wurzelkanal

Die statistische Auswertung wurde mit der Software *SPSS Statistics*, Version 22 (*IBM Corporation*, Armonk, NY, USA) durchgeführt.
Bei dem Dezementieren der Spreader ergaben sich verschiedene Frakturmodi, wobei zwischen vier Frakturmodi unterschieden wurde:

Tab. 2: Beschreibung der vier möglichen Frakturmodi

Frakturmodus	**visuelles Erscheinungsbild**
adhäsiv zum Spreader	glänzend, blanke Spreader-Oberfläche
adhäsiv zum Dentin	massive Sealer-Schicht auf der Spreader-Oberfläche
kohäsiv	dünne, homogene und leicht weißliche Spreader-Oberfläche
gemischt	Kombination von mind. zwei verschiedenen Frakturmodi

Darüber hinaus gibt es zwei weitere Frakturmodi: zum einen die Fraktur des Spreaders und zum anderen die Fraktur des Zahnes. In der vorliegenden Studie kam es jedoch zu keiner Fraktur des Spreaders oder Zahnes. Die statistische Auswertung wurde unter Verwendung der ANOVA und Post-hoc-Tests nach Games-Howell durchgeführt.

7 Ergebnisse

Nach vierwöchiger Lagerung wurde der Haftverbund zwischen dem *BioRoot-RCS*-Sealer und dem Kanalwanddentin anhand der Scherkräfte mit der Universaltestmaschine (*Zwick)* untersucht. Das nachfolgende Diagramm (siehe Abb. 6) zeigt die Haftwerte von *BioRoot RCS* in den verschiedenen experimentellen Gruppen mit den verschiedenen Spülflüssigkeiten:

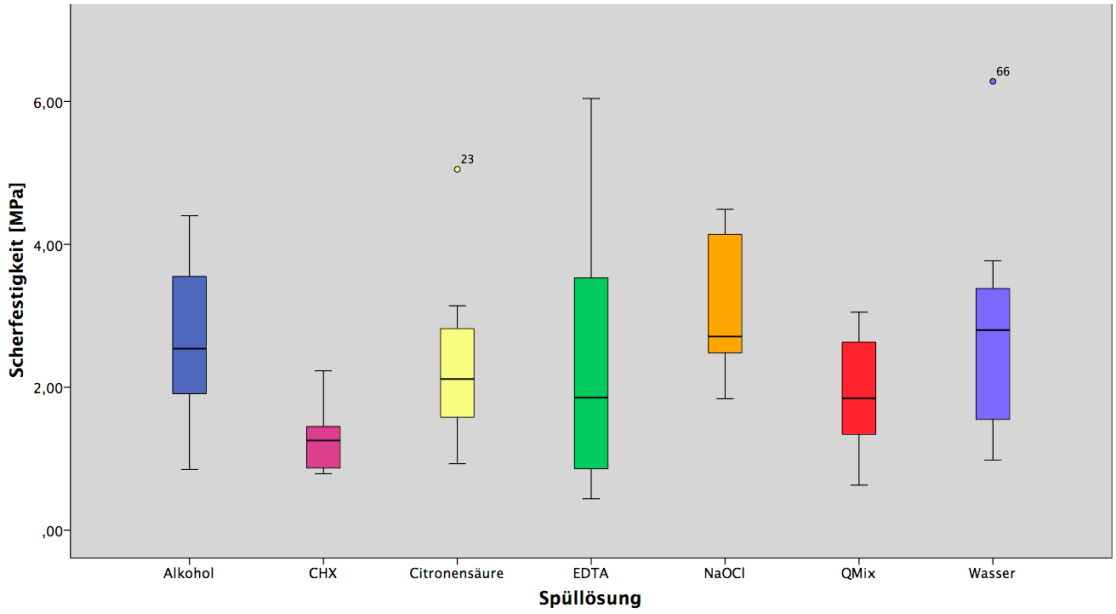

Abb. 6: Boxplot-Diagramm des Haftverbunds

Zuerst wurde die Normalverteilung mittels Shapiro-Wilk-Test, der für kleine Gruppengrößen verwendet wird, berechnet. Da als Testergebnis kein Wert kleiner als 0,05 war, lag in allen sieben Gruppen eine Normalverteilung vor.
Das Vorliegen der Normalverteilung der Daten in allen Gruppen erlaubte die Verwendung parametrischer Tests (ANOVA = analysis of variance; Analyse auf Varianzen) und weiterer Post-hoc-Tests. Allerdings lag keine Varianzhomogenität vor. Daher wurde für die paarweisen Vergleiche der für solche Fälle geeignete Post-hoc-Test nach Games-Howell verwendet.

In Tab. 3 werden die Ergebnisse des Pull-out-Versuchs durch verschiedene Parameter dargestellt. Bei Betrachtung des Parameters *Median*, zeigt sich, dass nach der Spülung mit NaOCl die höchsten Haftverbunde gemessen wurden (Median: 2,71 MPa), die sich jedoch nicht signifikant von der Kontrollgruppe mit

Wasser (Median: 2,8 MPa) unterscheiden. Die geringsten Haftwerte ergeben sich bei der Spülflüssigkeit CHX (Median: 1,26). Bei der vorgenannten Betrachtungsweise geht hervor, dass *Qmix 2in1*, ein Tensid aus Chlorhexidin und EDTA ebenfalls geringe Haftwerte aufweist. (Median: 1,85 MPa). Der Haftverbund nach der Spülung mit CHX war signifikant schlechter als bei allen anderen Spülungen. Zudem war der Haftwert nach der Spülung mit *QMix 2in1* signifikant schlechter als nach der Spülung mit NaOCl, da *QMix 2in1* ebenfalls CHX enthält.

Tab. 3: Ergebnisse der Haftverbundanalyse nach dem Pull-out-Testverfahren

Spülprotokoll	Mittelwert (MPa)	Standardabweichung (MPa)	Median (MPa)	Minimum (MPa)	Maximum MPa)	Interquartilbereich (MPa)
Alkohol	2,58	1,18	2,54	0,85	4,4	1,99
CHX	1,30	0,48	1,26	0,79	2,23	0,72
Citronensäure	2,29	1,18	2,12	0,93	5,05	1,42
EDTA	2,56	2,00	1,86	0,44	6,04	3,16
NaOCl	3,07	0,99	2,71	1,84	4,49	1,82
QMix	1,90	0,79	1,85	0,63	3,05	1,39
Aqua dest.	2,81	1,52	2,8	0,98	6,28	2,01

Weil sich bei der berechneten ANOVA keine Varianzhomogenität ergab, wurde anstelle der parametrischen ANOVA und der späteren Post-hoc-Tests mit der Welch-ANOVA gearbeitet und mögliche Unterschiede des Haftverbunds zwischen den sieben Gruppen durch einen paarweisen Vergleich überprüft. Die Welch-ANOVA zeigte signifikante Unterschiede beim Haftverbund zwischen den sieben Gruppen (p = 0,02). Dieser Test gibt jedoch keinen Aufschluss darüber, welche Gruppen sich signifikant unterscheiden. Aufgrund dessen wurden zusätzlich Post-hoc-Tests durchgeführt.

Tab. 4: Ergebnisse der Auswertung nach paarweiser statistischer Analyse mit Post-hoc-Tests nach Games-Howell

Vergleich (A vs. B)	Spülung A	Spülung B	*p*-Wert (* signifikant)
1 vs. 2	Alkohol	CHX	0,019*
1 vs. 3	Alkohol	Citronensäure	0,450
1 vs. 4	Alkohol	EDTA	0,597
1 vs. 5	Alkohol	NaOCl	0,406
1 vs. 6	Alkohol	*QMix*	0,226
1 vs. 7	Alkohol	Aqua dest.	0,734
2 vs. 3	CHX	Citronensäure	0,019*
2 vs. 4	CHX	EDTA	0,345
2 vs. 5	CHX	NaOCl	0,001*
2 vs. 6	CHX	*QMix*	0,059
2 vs. 7	CHX	Aqua dest.	0,005*
3 vs. 4	Citronensäure	EDTA	0,940
3 vs. 5	Citronensäure	NaOCl	0,096
3 vs. 6	Citronensäure	*QMix*	0,545
3 vs. 7	Citronensäure	Aqua dest.	0,326
4 vs. 5	EDTA	NaOCl	0,226
4 vs. 6	EDTA	*QMix*	0,821
4 vs. 7	EDTA	Aqua dest.	0,545
5 vs. 6	NaOCl	*QMix*	0,023*
5 vs. 7	NaOCl	Aqua dest.	0,520
6 vs. 7	*QMix*	Aqua dest.	0,121

Bei dem Vergleich der einzelnen Spülflüssigkeiten miteinander zeigte sich, dass der Haftverbund nach einer Spülung mit Chlorhexidin deutlich sinkt bzw. signifikant schlechter wird. Die restlichen Gruppen 1, 3, 4, 6 und 7 unterschieden sich im gemessenen Haftverbund jedoch nicht signifikant voneinander.

Auswertung der Frakturmodi

Durch eine Betrachtung der Spreader in zwei Ebenen wurde der Frakturmodus bestimmt. Bei den 70 Proben traten alle eventuell möglichen Frakturmodi auf. Die Verteilung der Frakturmodi war in allen Gruppen nahezu gleich. Am häufigsten trat der kohäsive Frakturmodus auf. Gemischte Frakturen und seltene adhäsive Frakturen am Dentin traten ebenfalls auf. In geringer Anzahl ergaben sich rein adhäsive Frakturmodi. Bei diesen Spreadern waren allerdings teilweise kleine Stellen zu erkennen, die eine blanke, glänzende Metalloberfläche aufwiesen.
Die Fotoanalyse der zementierten Spreader führte zu den folgenden Frakturmodi:

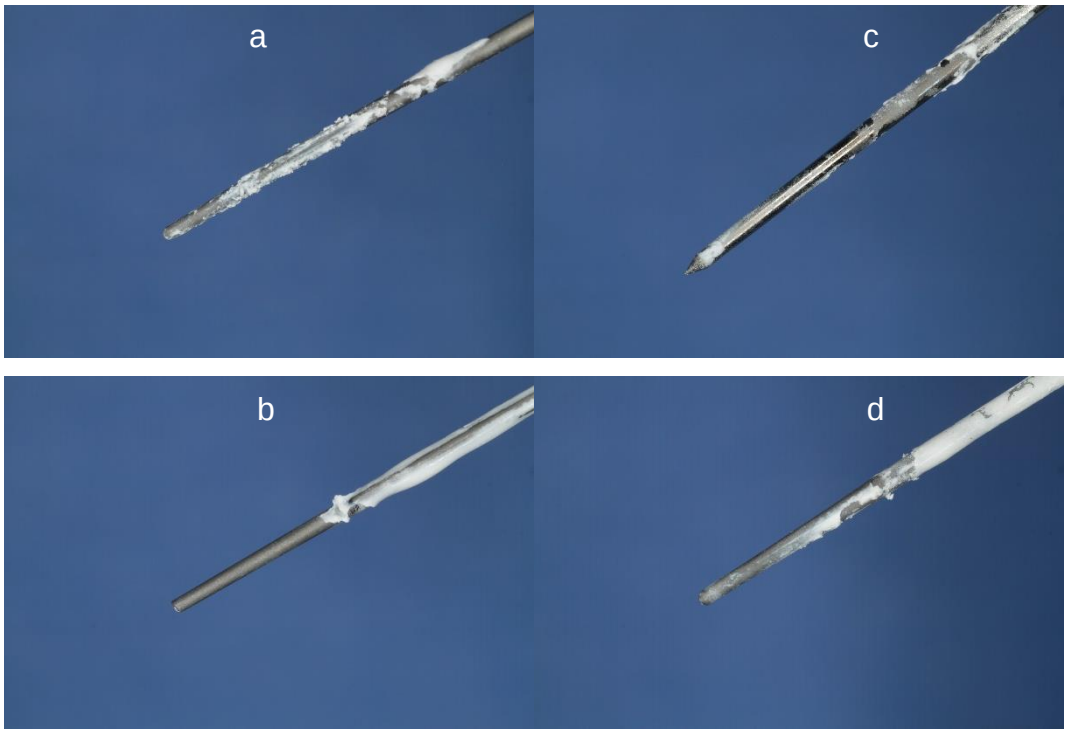

Abb. 7: Beispielbilder für die Frakturmodi
(a = adhäsive Fraktur am Dentin; b = adhäsive Fraktur am Spreader; c = kohäsive Fraktur; d = gemischte Frakturmodi)

Eine Analyse einer möglichen Abhängigkeit zwischen Haftverbund und Frakturmodus wurde mittels Chi-Quadrat-Test berechnet. Dabei zeigte sich weder bei der gemeinsamen Berechnung einer möglichen Abhängigkeit zwischen Frakturmodus und Haftverbund noch bei der gruppenweisen Berechnung eine Signifikanz. Die Berechnung aller Proben gemeinsam ergab: keinen signifikanten

Zusammenhang (Chi-Quadrat-Test: p=0,445). Auch bei gruppenweiser Berechnung der Abhängigkeit von Haftverbund und Frakturmodus traten keine signifikanten Unterschiede auf (Chi-Quadrat-Test: $p > 0,05$ für alle Gruppen). Dies bedeutet, es lag keine Abhängigkeit der beiden Merkmale vor.

8 Diskussion

8.1 Diskussion der Methoden

Humane Zähne

In der vorliegenden Studie wurden die extrahierten Zähne in Natriumazid-Lösung aufbewahrt, damit die Zähne – insbesondere deren Dentin – nicht austrocknen und darüber hinaus sicher desinfiziert werden. Durch diese Lösung wird ein Vermehren von Mikroorganismen sicher verhindert [188]. Studien konnten zeigen, dass Zähne, die in Lagerungsmedien wie Chloramin-T-Lösung oder Natriumazid-Lösung gelagert werden, keine signifikanten Unterschiede bei den Haftwerten aufwiesen [162]. Daher ist davon auszugehen, dass längere Aufbewahrungszeiten zu keinen Veränderungen der Haftwerte am Dentin führen. Mobareak et al. konnten nachweisen, dass Zähne, die zwei Jahre in Chloramin-T-Lösung gelagert wurden, keine signifikanten Unterschiede bei den Haftwerten zeigten [186]. Die zuvor angefertigten Röntgenbilder gaben Aufschluss über die Wurzelkonfiguration der Zähne, wobei gekrümmte Kanäle durch eine optische Röntgenkontrolle ausgeschlossen wurden. Es wurden bewusst humane Zähne und keine bovinen oder porcinen Zähne verwendet, um die klinische Situation bestmöglich zu simulieren. Außerdem konnte bislang nicht bestätigt werden, dass mit dem Dentin von bovinen Zähnen die gleichen Scherfestigkeitsergebnisse erzielt, werden können wie bei humanem Dentin. Jeder Gruppe wurden randomisiert ausgewählte Zähne zugeteilt. Um die gleichen Voraussetzungen zu schaffen, wurden alle Zähne einer Gruppe am selben Tag aufbereitet, eingelagert, mit der jeweiligen Flüssigkeit gespült und mit dem Sealer behandelt.

Instrumente, Aufbereitung und Lagerung

Der einzige Unterschied zwischen den Gruppen ergab sich durch den Zeitpunkt der Aufbereitung. Da das Alter der Zähne nicht bestimmt werden konnte, ist es möglich, dass die Ergebnisse durch altersbedingte Veränderungen des Dentins, wie beispielsweise durch Tertiärbildung, Sklerosierung oder Verkalkung, beeinflusst wurden [29]. Durch eine zufällige Zuordnung der Zähne in die jeweiligen

Gruppen wurde versucht, den Einfluss des Alters auf die Ergebnisse zu reduzieren. Um eine einheitliche Kanalform und Zentrierung zu ermöglichen, wurden alle Probenzähne maschinell (*BioRaCe*-System) auf exakt die gleiche Größe gebracht [185]. Die Feilen des *BioRaCe*-Systems wurden schrittweise für die gewünschte AL eingesetzt, und bei jedem Instrumentenwechsel wurde der Kanal mit Aqua dest. gespült, um Dentinspäne zu entfernen und dadurch ein Verblocken zu verhindern. Zur Vermeidung einer koronalen Inkongruenz wurde auf die *BioRaCe*-Feile (*BR6*) verzichtet. Deren Verwendung hätte koronal zu einer großen konischen Aufbereitung geführt, da .04/50 bei 8 mm zu einem Durchmesser von 0,78 mm führen würde, wobei bei einer ISO 60 nur 0,76 mm zulässig sind.
Außerdem wurde nach der Aufbereitung der Zähne auch die Spreader-Passung kontrolliert, um unregelmäßige Kanalquerschnitte zu vermeiden und vor der Einbeziehung in die Studie aussortieren zu können. Die Klemmpassung des Spreaders wurde taktil erfasst und röntgenologisch kontrolliert, damit die Haftfläche zwischen Spreader und Kanalfasern an allen zu untersuchenden Zähnen identisch und vergleichbar war. Im Zuge dessen wurde darauf geachtet, dass der Spreader beim Einbringen nicht verkeilt, da dies zu einer Beeinflussung der Ergebnisse hätte führen können. Durch ein Verkeilen kann es zu höheren Kräften im Pull-out-Versuch kommen, da sich die Friktion durch das Verkeilen erhöhen würde. Die sich dadurch ergebenden Werte stünden in dem Fall nicht mehr in einer wechselseitigen Beziehung mit den Haftwerten des Sealers.
Die vorbereiteten Zähne wurden bei 37 °C und 100 % Luftfeuchtigkeit über vier Wochen aufbewahrt, wie es auch in vorherigen Studien durchgeführt wurde [186]. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass sie unter Mundhöhlenbedingungen gelagert wurden und der Sealer genug Zeit hatte, optimal auszuhärten. Bei einem Pull-out-Versuch ist es relevant, dass die Kräfte auf den Zahn und den Spreader axial in Richtung des Zuges wirken. Eine solche Ausrichtung kann gewährleistet werden, indem die Fläche des Zahnes, die getrimmt wird, senkrecht zur Spreader-Achse ausgerichtet ist. Der Spreader ist daher genau zu begutachten, um ein mögliches Verkeilen zu verhindern. Vereinzelt auftretende Schwankungen bei den Haftwerten innerhalb einer Gruppe könnten auf ein Verkeilen des Spreaders zurückgeführt werden, weil es auch nach einer genauen Begutachtung zum Verkeilen kommen kann.

Für den Versuch konnten keine Guttaperchastifte verwendet werden, da sie bei Zugbelastungen reißen oder sich zumindest deformieren könnten, ohne aussagekräftige Werte zu liefern. Die bei der Analyse des Haftverbunds mittels Pullout wären die entstehenden Kräfte zu hoch. Daher wurden anstelle von Guttaperchastiften Stahl-Spreader eingesetzt, die vor dem Einsetzen entgratet, entfettet und anschließend sandgestrahlt wurden. Dadurch wurden optimale Oberflächenbedingungen für den Verbund der Sealer geschaffen. Die Verwendung von Spreadern war bei diesen Auszugsversuchen zur Bestimmung der Scherhaftkraft aus zwei Gründen relevant: Zum einen verformt sich der Stahl-Spreader bei dem Zugversuch nicht und bietet daher einen guten Angriffspunkt für die Zugkräfte. Zum anderen presst er den Sealer im Kanal zu einer dünnen und gleichmäßigen Schicht aus. Da die Stahl-Spreader nicht verformbar sind, kann es dadurch zu keiner Verfälschung der Ergebnisse kommen. Jeder Spreader wurde mit dem gleichen Sealer und so gut wie möglich mit der gleichen Menge Sealer beschichtet, um die Werte nicht negativ zu beeinflussen, da in Studien gezeigt werden konnte, dass dicke und dünne Sealer-Stärken einen negativen Einfluss auf die Werte haben können [82]. Die Wahl konischer Spreader wurde getroffen, um eine Parallelpassung zu vermeiden. Nach dem Einbringen des Spreaders wurde darauf geachtet, dass überschüssiges Material in der unmittelbaren Nähe des Kanaleingangs entfernt wurde, damit die Haftfläche nicht vergrößert und Unebenheiten an der Schnittfläche ausgeschlossen werden konnten. Außerdem wurden Röntgenkontrollen durchgeführt, um einen exakten Sitz der Spreader im Kanal und ein gleichmäßiges Anliegen der Spreader am Dentin zu gewährleisten. Daher wurden ausschließlich gerade Wurzelkanäle ausgewählt, damit der gerade Spreader eine optimale Passung aufwies.

Endodontische Spülflüssigkeiten

Um den Haftverbund zu untersuchen, wurden sieben verschiedene Spülflüssigkeiten verwendet, die bei endodontischen Behandlungen zum Spülen von Wurzelkanälen eingesetzt werden [82]. Es wurden Einzelspüllösungen ausgewählt, damit jede Eigenschaft einer Spülung gesondert berücksichtigt werden konnte. Hierzu wurden die für die Wurzelkanalspülung in der Endodontie empfohlenen Spüllösungen in die Untersuchung einbezogen. Der Einfluss der Schmierschicht auf den Haftverbund wurde mit der NaOCl-Spülung getestet und mit der

dekalzifizierenden Wirkung der Spülungen Citronensäure und EDTA verglichen. Dabei wurde der mögliche Einfluss der einzelnen Spülungen auf den Haftverbund zwischen Dentin und *Bio-Root RCS* untersucht. NaOCl, Chlorhexidin und EDTA sind die aktuell am häufigsten verwendeten Substanzen [82]. In der Praxis wird in der Regel eine Kombination aus mehreren Spülungen eingesetzt [82]. In der vorliegenden Arbeit wurde der Effekt des alleinigen Einsatzes der sieben untersuchten Spüllösungen auf den Haftverbund untersucht. Die Auswahl der verschiedenen Spülflüssigkeiten beeinflusst den Haftverbund zwischen Dentin und Sealer [179]. Das Vorhandensein der Schmierschicht an der Kanalwand führt dazu, dass der Sealer nicht in die Dentintubuli eindringen kann [179].

Der Einfluss der Schmierschicht wurde mit der Spülflüssigkeit NaOCl untersucht. Die praxisrelevante Konzentration liegt bei 0,5 bis 5 %, wobei 3 % empfohlen werden [151]. Außerdem wurden die Auswirkungen von Chelatoren auf die Entfernung der Schmierschicht überprüft. Diesbezüglich sollte der Haftverbund sowohl mit als auch ohne Entfernung der Schmierschicht analysiert werden. Die beiden in der vorliegenden Studie verwendeten Chelatoren sind für die Entfernung der Schmierschicht geeignet. Kouvas et al. konnten feststellen, dass nach der Spülung mit einer EDTA-Lösung die Schmierschicht entfernt werden und der Sealer in die Tubuli bis zu einer Tiefe von 35 bis 80 µm eindringen konnte [105]. Auch Citronensäure wird zur Entfernung der Schmierschicht verwendet, wobei jedoch bei höheren Konzentrationen neben der Schmierschicht auch Teile des peritubulären Dentins angegriffen werden [82]. Im Unterschied zu NaOCl weisen EDTA und Chlorhexidin nur einen geringen gewebeauflösenden Effekt auf [153]. Dieser Effekt von Chlorhexidin stellt einen Nachteil gegenüber NaOCl dar [153]. Der kationische Charakter von CHX ermöglicht eine Bindung an die negativ geladene Oberfläche des Dentins, an der es seine Wirkung entfalten kann [142]. Die bakteriostatische Wirkung, bei der sich CHX an Bakterien bindet und deren osmotisches Gleichgewicht stört, bildet einen großen Vorteil gegenüber anderen Spüllösungen [139]. Die gute desinfizierende Wirkung sowie die Bindung an Dentin zur Entfaltung dieser Wirkung wurden in der vorliegenden Studie untersucht.

Darüber hinaus sollte die Frage geklärt werden, ob die Haftkraft von *Bio-Root RCS* gegenüber dem Dentin dadurch verstärkt werden kann. Eine Kombination der Spülflüssigkeiten EDTA und Chlorhexidin wurde anhand der Lösung *QMix 2in1* untersucht. Bei der Entfernung der Schmierschicht ist *QMix 2in1* einer

17%igen EDTA-Lösung *in vitro* überlegen [181]. Die antibakterielle Wirkung von *QMix 2in1* ist stärker als die einer 2%igen NaOCl-Lösung und einer 2%igen CHX-Lösung [181]. Diese Lösung kombiniert die bakteriostatische Wirkung von CHX mit der Entfernung der Schmierschicht durch EDTA. In der vorliegenden Studie wurde außerdem untersucht, ob diese Kombination der Lösungen einen Effekt auf den Haftverbund hat. Die Spülflüssigkeit Alkohol entzieht Flüssigkeit aus den Dentintubuli und trocknet den Kanal bis in die Tiefe der Tubuli aus [128].

Trocknung des Wurzelkanalsystems

Da *in vivo* von apikal her Feuchtigkeit entstehen kann, sollten die Zähne nach dem gleichen Prinzip getrocknet werden. Die Trocknungssequenz ist von Bedeutung, damit die Zähne den gleichen Trocknungsgrad im Kanal aufweisen. Bei allen Versuchszähnen wurden gleichmäßig jeweils drei Papierspitzen für jeweils drei Sekunden gleich tief in die Kanäle eingeführt. Roggendorf et al. konnten zeigen, dass Feuchtigkeit bei *AH Plus* einen negativen Einfluss auf die Wurzelkanalfüllung hat [139]. In anderen Studien wurde ebenfalls bestätigt, dass sich eine Trocknung des Kanals positiv auf die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung auswirkt [105]. Aufgrund dessen wurden in der vorliegenden Studie ausschließlich Zähne mit einem getrockneten und nicht kontaminierten Kanal verwendet.
In der Praxis wird der Kanal vor der Abfüllung vollständig getrocknet. Bei feuchtigkeitsempfindlichen Sealern ist eine Trocknung durch eine Spülung mit Alkohol erforderlich, die sich positiv auf die Ergebnisse auswirkt. Durch die Verwendung von Papierspitzen und eine zusätzliche Spülung mit Alkohol konnten bei Sealern (Sealer *Ketac Endo*) im Farbstoffpenetrationstest erhöhte Sealer-Dichtigkeiten beobachtet werden [139].

Testverfahren

Der Haftverbund wurde mit dem sogenannten Pull-out-Verfahren gemessen. Es gibt verschiedene Verfahren, um den Haftverbund zwischen einem Sealer und dem Dentin zu ermitteln. Für die Auswahl des optimalen Verfahrens müssen die Voraussetzungen der einzelnen Methoden beachtet werden.

Mikrozug-Testverfahren

Das Microtensile-Verfahren ermittelt den Haftverbund zwischen zwei Materialien durch die Zugkraft [124]. Die zu testenden Materialien werden in Stäbchen gesägt und an ihren Polen an der Zugmaschine befestigt. Durch Zugkräfte kommt es zu einem Versagen des Haftverbunds, wobei die dafür benötigte Kraft gemessen wird [124]. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass es bei der Herstellung der Proben zu frühzeitigen Ausfällen durch das Lösen des Haftverbunds der Proben beim Sägen kommen kann [64;139]. Außerdem wird bei dem Mikrozug-Testverfahren nur ein Teil des Kanalwanddentins auf den Haftverbund zur Analyse herangezogen.

Push-out-Verfahren

Bei der Push-out-Technik werden die wurzelkanalgefüllten Zähne in 1 mm oder 2 mm dicke horizontale Scheiben geschnitten [172;181]. Bei den Scheiben, die einen vollständigen Wurzelquerschnitt darstellen, wird beim Einwirken eines Stempeldrucks auf die Füllung die Kraft gemessen, bei der es zu einem Versagen des Haftverbunds kommt [172;181]. Dabei werden in der Regel dünne Proben verwendet, wodurch strukturelle Unterschiede im Zahn differenziert werden können [169]. Deshalb ist es sinnvoll, den Haftverbund des Füllmaterials mit dem Dentin über die gesamte Länge zu messen.

Pull-out-Verfahren

Mit dem Pull-out-Test kann im Unterschied zum Push-out-Verfahren der Haftverbund des Sealers mit dem Dentin über die gesamte Wurzelkanallänge beurteilt werden, da nicht einzelne Scheiben untersucht werden, sondern der Haftverbund durch Nutzung der gesamten Kanaloberfläche untersucht wird. [186]. Dadurch erscheint das Pull-out-Verfahren für Materialien mit geringerer Festigkeit prädestiniert. Bei diesem Verfahren werden die Ergebnisse durch regionale Veränderungen in der Dentinstruktur kaum beeinflusst [186]. Daher wurde dieses Verfahren für die vorliegende Studie ausgewählt. Bei diesem Verfahren wird Zug auf einen an einem Kanal befestigten Spreader ausgeübt und die für das Versagen

des Haftverbunds notwendige Kraft gemessen. Die dabei auf den Haftverbund wirkenden Kräfte sind Scherkräfte. Die Spreader wurden mit einer Silanisierung und Silikatisierung vorbehandelt, um den Haftverbund zu erhöhen [156]. Dadurch konnte der Haftverbund zwischen Dentin und Sealer gemessen werden. Der Zahn wird dazu gegen ein Widerlager in die Maschine eingespannt. Anschließend wird mit konstanter Geschwindigkeit von 2 mm pro Minute ein Zug auf den zementierten Spreader ausgeübt. Ein Dehnungssensor misst die Dehnung im Zugarm, die bis zum Versagen des Haftverbunds erforderlich ist. Danach wird die Zugkraft auf die Spreader-Fläche umgerechnet [156].

8.2 Diskussion der Ergebnisse

Vergleich der verschiedenen Spülflüssigkeiten

In der vorliegenden Studie wurden sieben verschiedene Spülflüssigkeiten verwendet und auf ihren Einfluss auf den Sealer und den Haftverbund zum Dentin untersucht. Jede einzelne Spülung hat unterschiedliche Eigenschaften, die das Dentin und den Wurzelkanal beeinflussen. In der Kontrollgruppe mit Wasser zeigte sich lediglich ein geringer Effekt auf das Dentin, weil der Kanal vor der Applikation des Sealers getrocknet und erst danach die Wurzelkanalfüllung durchgeführt wurde. Die Feuchtigkeit durch das Wasser konnte im Zuge dessen geringgehalten werden. In einigen Studien konnte allerdings nachgewiesen werden, dass Zemente auf Dicalciumsilikat- oder Tricalciumsilikat-Basis auch bei feuchtem Milieu gut abbinden können [98;118]. Diese Eigenschaft kann von Bedeutung sein, wenn ein Wurzelkanal nicht vollständig getrocknet werden kann, wie etwa bei einer Perforation des Kanals.
Nagas et al. haben verschiedene Sealer untersucht und gelangten zu der Erkenntnis, dass Feuchtigkeit im Kanal zu einer Verschlechterung der Haftkraft führt [160]. Bei dieser Studie wurde der Kanal jedoch vollständig mit Flüssigkeit geflutet, weshalb ein Vergleich mit den Werten von *BioRoot RCS* nicht zwingend aussagekräftig ist [160].
Bevor die verschiedenen Spülflüssigkeiten miteinander verglichen werden, ist zu analysieren, was passiert, wenn Calciumsilikat-Zemente und Dentin miteinander in Kontakt kommen. Nach dem Applizieren des Sealers kommt es beim

Abbindevorgang des Calciumsilikat-Zements zu einer Freisetzung von Calciumhydroxid. Dieser Überschuss von Calciumhydroxid sorgt dafür, dass sich der pH-Wert verändert und stark alkalisch wird (pH-Wert 13) [3]. Dies führt aufgrund des direkten Kontakts zum Dentin zu einer sogenannten alkalischen Ätzung des Dentins, wobei sich die Eigenschaften des Dentins verändern. Bei der Ätzung des Dentins kommt es zu einer Denaturierung dieser Kollagenmatrix, was wiederum dazu führt, dass die Dentinoberfläche permeabler wird [3]. Diese höhere Permeabilität sorgt dafür, dass der Calciumsilikat-Zement durch Diffusion in das Dentin eindringen kann und dieses vollständig infiltriert. Dabei entsteht eine Mineralinfiltrationszone in Form eines 10 bis 20 µm breiten Bandes zwischen Dentin und Zement, das zum Verbund zwischen Zement und Dentin führt [3].

Einfluss von Chlorhexidin

Durch die Verwendung von Chlorhexidin kam es zu einer Verschlechterung des Haftverbunds zwischen Dentin und *BioRoot RCS*. Da *BioRoot RCS* erst seit einigen Jahren auf dem Markt verfügbar ist, gibt es bislang keine Studien, in denen der Einfluss der Spülflüssigkeit Chlorhexidin auf das Dentin dokumentiert wurde. Es gibt allerdings Studien, in denen der Einfluss von Chlorhexidin auf Zemente auf Calciumsilikat-Basis analysiert wurde. So konnte in Untersuchungen von *MTA*, welches ebenfalls auf Calciumsilikat basiert, gezeigt werden, dass eine Spülung mit Chlorhexidin zu einer Veränderung der Struktur von *MTA* führt [84]. Nach der Spülung mit Chlorhexidin resultiert keine hexagonale Kristallisation, sondern eine Plattenstruktur mit kleinerer Kristallgröße [84]. Diese Beobachtungen unter dem Elektronenmikroskop könnten eine Erklärung für die geringeren Haftwerte nach einer Spülung mit Chlorhexidin sein [84;172]. Die verringerten Haftkräfte in Verbindung mit einer Chlorhexidin-Spülung wurden auch in verschiedenen Studien erwähnt [84;172]. In diesen wurde zudem auf eine zusätzliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften von *MTA* verwiesen, wie zum Beispiel der Biegefestigkeit, der Oberflächenhärte und der Mikrohärte [172]. Chlorhexidin sollte deshalb nicht in Verbindung mit *MTA* verwendet werden, da es durch die verringerte Oberflächenhärte zu einer Auflösung von *MTA* kommen kann [118]. Die Nutzung von Chlorhexidin führt bei *MTA* zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften und einer gestörten Kristallisation des Dentins. Diese Veränderungen könnten erklären, warum lediglich geringe Haftkräfte

zwischen Dentin und *BioRoot RCS* gemessen wurden, da sowohl *MTA* als auch *BioRoot RCS* überwiegend Calciumsilikat enthalten und hinsichtlich ihrer Eigenschaften ähnlich sind. Aufgrund der geringen Haftwerte ist Chlorhexidin als Abschlussspülung in Verbindung mit *BioRoot RCS* nicht zu empfehlen.

Einfluss von Chelatoren

In der vorliegenden Studie wurden EDTA und Citronensäure als Chelatoren untersucht. Zusätzlich wurde die Spülflüssigkeit *QMix 2in1* untersucht, welche ebenfalls EDTA als Bestandteil enthält. Die Entfernung der Schmierschicht führte bei manchen Sealern zu einer Erhöhung der Haftkraft. Eine weitere Forschungsfrage in der vorliegenden Arbeit bestand darin, ob dieser positive Effekt auch auf *BioRoot RCS* zutrifft. Allerdings ergaben sich bei den Chelatoren Haftwerte, die nicht signifikant höher waren als bei Spülflüssigkeiten, welche die Schmierschicht nicht entfernen. Der Haftverbund hatte sich bei der Verwendung der Chelatoren sogar verschlechtert. Sealer auf Zinkoxid- oder Zinkoxid-Eugenol-Basis zeigen einen erhöhten Haftverbund zwischen Sealer und Dentin, wenn die Schmierschicht entfernt wurde [7;155;174]. Im Unterschied zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie konnte in anderen Studien eine Verbesserung der Haftkraft durch Entfernung der Schmierschicht nachgewiesen werden.
Das Entfernen der Schmierschicht kann folglich dazu führen, dass der Sealer besser in die Dentintubuli eindringen kann [105]. Elektronenmikroskopische Untersuchungen konnten zeigen, dass der Sealer zu mikromechanischen Retentionen führt, indem sich sogenannte Sealer-Zotten (Tags) bilden. Bei einer vorhandenen Schmierschicht können diese Retentionen durch den Sealer nicht ausgebildet werden [105].
Untersuchungen von *Biodentine* und anderen Zementen auf Calciumsilikat-Basis zeigten, wie in der vorliegenden Studie, eine Verschlechterung der Haftkraft [55]. Yildirim et al. untersuchten das Auftreten einer Microleakage bei *MTA* in Verbindung mit der Entfernung der Schmierschicht [185]. Sie vermuteten, dass die Abnahme der Undichtigkeit bei Kanälen mit einer Schmierschicht auf die hydrophilen Eigenschaften und die Partikelgröße von *MTA* zurückgeführt werden kann [55;185]. Der Smear Layer fungiert diesbezüglich anschenend als ein Verbindungselement zwischen *MTA* und dem Dentin [55;185].

Studien konnten zeigen, dass die Mineralinfiltrationszone, welche die Calciumsilikate mit dem Dentin als ein 10 bis 20 µm breites Band bilden, auch ohne eine Entfernung der Schmierschicht entsteht und sich im intertubulären und kollagenreichen Dentin befindet [3].

Es wird zwar davon ausgegangen, dass die Schmierschicht für die Ausbildung der Mineralinfiltrationszone relevant und aktiv an der Bildung dieser Zone beteiligt ist, jedoch konnte dies bisher noch nicht abschließend bestätigt werden [55,185]. Denkbar ist auch, dass die Schmierschicht durch die Alkalität der bioaktiven Sealer desintegriert werden kann und folglich kein Problem für die Ausbildung der mineralischen Infiltrationszone darstellt. Da auch *BioRoot RCS* aus Calciumsilikaten besteht und die Bildung der Verbundzone als Mineralinfiltrationszone ein Teil des Abbindevorgangs ist, könnte dies eine Erklärung dafür sein, dass die Entfernung der Schmierschicht zu keinem positiven Effekt hinsichtlich des Haftverbunds geführt hat. Verantwortlich für die Reduktion der Haftverbunds könnte auch die oberflächliche Entfernung von Calciumionen durch die beiden Chelatoren sein. Die tendenziell geringen Werte bei den Chelatoren EDTA, *QMix 2in1* und Citronensäure können daher eventuell mit den Veränderungen des Dentins durch diese Spülflüssigkeiten erklärt werden. Die dekalzifizierende Wirkung von 40%iger Citronensäure-Lösung ist höher als die von 15%iger EDTA-Lösung – und deshalb auch höher als die von *QMix 2in1* [118]. Citronensäure kann ab einer bestimmten Konzentration (30 %) auch das peritubuläre Dentin beeinflussen und dadurch das Dentin erweichen [82]. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die mechanischen Eigenschaften des Dentins durch Citronensäure und EDTA negativ beeinflusst werden können [160]. Die Erweichung des Dentins und die erhöhte dekalzifizierende Wirkung von Citronensäure im Vergleich mit EDTA könnten für die geringeren Haftwerte verantwortlich sein. Auch eine Protonierung des Wurzelkanalwanddentins kann als Ursache in Frage kommen, da diese die alkalische Formulierung des Sealers beeinträchtigen könnte.

Die Zusammensetzung von *QMix 2in1* könnte auch eine Erklärung für die geringen Haftwerte liefern. *QMix 2in1* enthält Chlorhexidin und EDTA, wobei es möglich ist, dass Chlorhexidin und EDTA zusammenwirken und sie dadurch zu kumulativ einer verstärkten Verringerung des Haftverbunds beitragen.

Einfluss von Natriumhypochlorit

NaOCl-Lösung ist die in der Endodontie am häufigsten verwendete Spüllösung und verfügt über bedeutende Eigenschaften für das Dentin im Wurzelkanal. Durch die Dissoziation von NaOCl in wässriger Lösung in HOCl, OCl^- und Na^+ kann der Wirkmechanismus von NaOCl erklärt werden. NaOCl wirkt proteolytisch, indem es Peptidketten fragmentiert und Protein-Endgruppen chloriert. Die lytische Wirkung auf Mikroorganismen, Gewebe und die organische Dentinmatrix basiert auf den entstehenden Chloraminen, die weiter abgebaut werden [56].
NaOCl sorgt demnach dafür, dass organisches Material durch N-Chloramine aufgelöst wird, es ist aber nicht in der Lage, die Schmierschicht zu entfernen. Die höchsten Haftwerte in der Statistik können gegebenenfalls damit erklärt werden, dass es bei der Verwendung von NaOCl zu keiner Dekalzifizierung des Dentins kommt. Der Sealer könnte sich dadurch mit den Calcium-Ionen des Dentins verbinden, was zu einem stärkeren Verbund führen würde. Der pH-Wert von NaOCl von ungefähr 10,7 bis 11,2 scheint die Aushärtung von *BioRoot RCS* nicht zu stören und dürfte somit ursächlich für den höchsten Haftverbund in dieser Studie sein. Es kann in der Folge angenommen werden, dass die initial durch die NaOCl-Spülung nicht entfernte Schmierschicht wohl sekundär infolge der alkalischen Aushärtereaktion von BioRoot RCS desintegriert werden konnte und so der hohe Haftverbund resultierte.

Einfluss von Alkohol

Bei Alkohol, welcher als Endspülung vor der Wurzelkanalfüllung verwendet wird, ergab sich ein Haftwert von 2,58 MPa – was nach NaOCl und der Kontrollgruppe der höchste Haftwert war. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Menge an Calcium-Ionen im Kanal einen Einfluss auf den Haftverbund hat, weil – wie auch bei NaOCl – bei der Verwendung von Alkohol keine Calcium-Ionen herausgelöst wurden. Demgegenüber wird der Kanal durch die Spülung mit Alkohol lediglich ausgetrocknet [139]. Zudem wird dadurch die Oberflächenspannung der Wurzelkanalwand verringert, was wiederum für eine Penetration des Sealers in die Dentintubuli sprechen könnte.

9 Prüfung der Arbeitshypothesen

Arbeitshypothese 1:
Bei den untersuchten Spüllösungen zeigen sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der Effekte auf den Haftverbund von *BioRoot RCS*.

Diese Hypothese konnte **bestätigt** werden.

Es konnten signifikante Unterschiede beim Haftverbund zwischen *BioRoot RCS* und Dentin bei der Verwendung unterschiedlicher Spülflüssigkeiten nachgewiesen werden.

Arbeitshypothese 2:
Chelatoren verbessern den Haftverbund signifikant gegenüber den Spüllösungen, die die Schmierschicht nicht entfernen.

Diese Hypothese konnte **nicht bestätigt** werden.

Durch die Entfernung der Schmierschicht wurde der Haftverbund zwischen *BioRoot RCS* und Wurzelkanaldentin nicht signifikant verbessert, sondern im Gegenteil sogar tendenziell verschlechtert. Der pH-Wert einiger Spüllösungen konnte die Schmierschicht zwar nicht entfernen, war allerdings auch nicht schädlich für die alkalische Aushärtereaktion und führte anscheinend dazu, dass der *BioRoot-RCS*-Sealer in die Schmierschicht eindringen kann, was wiederum zu einem hohen Haftverbund führen würde.

Arbeitshypothese 3:
Die Wurzelkanalspülung mit dem Kombinationspräparat *QMix 2in1*
führt zu einem signifikant besseren Haftverbund als die Verwendung der einzelnen Spüllösungen.

Diese Hypothese konnte **nicht bestätigt** werden.

Die Unterschiede waren nicht signifikant. Die Haftwerte bei Verwendung von anderen Spülflüssigkeiten waren erheblich höher. Die einzelnen Bestandteile von *QMix 2in1* sind EDTA und Chlorhexidin. Chlorhexidin führte zu einer Verschlechterung des Haftverbunds zwischen Dentin und *BioRoot RCS* und kann daher ebenfalls nicht als Abschlussspülung empfohlen werden. Die Kombination aus EDTA, Tensid und Chlorhexidin führte zu keiner Verbesserung des Haftverbunds.

10 Schlussfolgerungen

Die Reinigung, Desinfektion und Aufbereitung des Wurzelkanalsystems mit Spülflüssigkeiten gehören zu den wesentlichen Faktoren bei einer endodontischen Behandlung [29].
Die Verwendung von Chlorhexidin führte zu einer Verschlechterung des Haftverbunds zwischen Dentin und *BioRoot RCS* und ist deshalb nicht als Abschlussspülung geeignet. Die Spülung mit Chlorhexidin führt zu einer negativen Veränderung der Struktur von *MTA* [84]. Nach der Spülung mit Chlorhexidin bildet sich keine hexagonale Kristallisation, sondern eine Plattenstruktur mit kleinerer Kristallgröße [84]. Dies führt in der Folge zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften von *MTA* infolge der Spülung mit 2%iger Chlorhexidin-Lösung und somit zur Reduktion der Haftwerte, weshalb von einer Verwendung von Chlorhexidin in Verbindung mit *BioRoot RCS* abgeraten wird [118].

Die Erweichung des Dentins sowie die erhöhte dekalzifizierende Eigenschaft von Chelatoren führen zu einer geringeren Haftkraft von BioRoot RCS zum Dentin.
Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit kann die Verwendung von Chelatoren wie EDTA und Citronensäure nicht explizit empfohlen werden. Bei beiden Chelatoren zeigte sich gegenüber der Kontrollgruppe eine Verschlechterung der Haftwerte. Auch bei einer Kombination von Spülflüssigkeiten mit geringen Haftwerten (CHX und Chelator) wird von einer synergetischen Wirkung ausgegangen, die zu einer verstärkten Verringerung des Haftverbunds führt [143]. Aufgrund der starken dekalzifizierenden Wirkung und der damit verbundenen Erweichung des Dentins in Kombination mit der Strukturveränderung des *MTA*s durch das Chlorhexidin können diese beiden Spülflüssigkeiten nicht für ein allgemeines Spülprotokoll empfohlen werden [143].

Die Entfernung der Schmierschicht führt bei manchen Sealern zu einer Erhöhung der Haftkraft, was auf *BioRoot RCS* nicht zutrifft. Der Smear Layer fungiert als ein Verbindungselement zwischen *MTA* und dem Dentin [55; 185]. Ob das Belassen der Schmierschicht jedoch eine Bedingung für einen hohen Haftverbund ist, kann anhand dieser Studie nicht geklärt werden. Allerdings scheint der Verzicht auf saure und dekalzifizierende Spüllösungen wie Chelatoren für den

Haftverbund von BioRoot RCS positiv zu sein. Da der pH-Wert von NaOCl alkalisch ist, scheint dies der Grund für den hohen Haftverbund nach NaOCl-Spülung sein.

Bei der Verwendung von NaOCl, die nicht zu einer Dekalzifizierung des Dentins führt, verbinden sich die Calcium-Ionen mit dem Sealer, was für eine hohe Haftwirkung sorgt. Die Entstehung einer Biomineralisation setzt die Desintegration der Schmierschicht voraus, um einen direkten Kontakt zum Kanalwanddentin zu erreichen, was nur durch die alkalische Degradation der Schmierschicht erklärt werden kann. Diese muss demzufolge durch den noch nicht erhärteten Sealer infolge des Kontaktes zur Schmierschicht erfolgen.

Die höchste Haftfestigkeit erreichte *BioRoot RCS* nach der Spülung der Wurzelkanäle mit NaOCl-Lösung und bei der Kontrollgruppe mit Wasser. Zudem zeigten Spülprotokolle mit einer Abschlussspülung mit NaOCl-Lösung einen hohen Haftverbund bei der Verwendung von *BioRoot RCS* [143].

Wie bei vielen anderen Sealern auch sollte der Kanal sorgfältig getrocknet werden, da Feuchtigkeit den Haftverbund zwischen *BioRoot RCS* und Dentin verschlechtert [143]. Es ist davon auszugehen, dass NaOCl über die besten Eigenschaften verfügt, um einen Wurzelkanal zu reinigen, zu desinfizieren und zusammen mit *BioRoot RCS* eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung zu erzielen. Zukünftige Studien sind erforderlich, um mikromorphologischen Effekte der Spüllösungen auf die Schmierschicht und die Wurzelkanaloberfläche weiter zu analysieren.

11 Literaturverzeichnis

1. Ari H, Erdemir A: Effects of endodontic irrigation solutions on mineral content of root canal dentin using ICP-AES technique. J Endod 31, 187–189 (2005)

2. Arias-Moliz MT, Camilleri J: The effect of the final irrigant on the antimicrobial activity of root canal sealers. J Dent 52, 30–36 (2016)

3. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF: Dentin-cement interfacial interaction: calcium silicates and polyalkenoates. J Dent Res 91, 454–459 (2012)

4. Baker NA, Eleazer PD, Averbach RE, Seltzer S: Scanning electron microscopic study of the efficacy of various irrigating solutions. J Endod 1, 127–135 (1975)

5. Balguerie E, van der Sluis L, Vallaeys K, Gurgel-Georgelin M, Diemer F: Sealer penetration and adaptation in the dentinal tubules: a scanning electron microscopic study. J Endod 37, 1576–1579 (2011)

6. Baratto-Filho F, de Carvalho Jr JR, Fariniuk LF, Sousa-Neto MD, Pecora JD, da Cruz-Filho AM: Morphometric analysis of the effectiveness of different concentrations of sodium hypochlorite associated with rotary instrumentation for root canal cleaning. Braz Dent J 15, 36–40 (2004)

7. Barbizam JV, Trope M, Tanomaru-Filho M, Teixeira EC, Teixeira FB: Bond strength of different endodontic sealers to dentin: push-out test. J Appl Oral Sci 19, 644–647 (2014)

8. Barthel C, Georgi M, Schäfer E, Petschelt A, Flachsenberg S, Neuber T, Kockapan C, Weiger R, Hülsmann M: Die Wurzelkanalspülung. Wissenschaftliche Stellungnahme der DGZMK. Dtsch Zahnärztl Z 61, 510–517 (2006)

9. Basrani B, Manek S, Sodhi RN, Fillery E, Manzur A: Interaction between sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate. J Endod 33, 966–969 (2007)

10. Basrani B, Santos JM, Tjäderhane L, Grad H, Gorduysus O, Huang J, Lawrence HP, Friedman S: Substantive antimicrobial activity in chlorhexidine-treated human root dentine. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 94, 240–245 (2002)

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

12. Baumgartner JC, Mader CL: A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimes. J Endod 13, 147–157 (1987)

13. Beatty RG: The effect of standard or serial preparation on single cone obturation. Int Endod J 20, 276–281 (1987)

14. Belobrov I, Parashos P: Treatment of tooth discoloration after the use of white mineral trioxide aggregate. J Endod 37, 1017–1020 (2011)

15. Bin CV, Valera MC, Camargo SE, Rabelo SB, Silva GO, Balducci I, Camargo CH: Cytotoxicity and genotoxicity of root canal sealers based on mineral trioxide aggregate. J Endod 38, 495–500 (2012)

16. Bloomfield SF, Arthur M: Interaction of bacillus subtilis spores with sodium hypochlorite, sodium dichloroisocyanurate and chloramine-T. J Appl Bacteriol 72, 166–172 (1992)

17. Bortoluzzi EA, Broon NJ, Bramante CM, Consolaro A, Garcia RB, de Moraes IG, Bernadineli N: Mineral trioxide aggregate with or without calcium chloride in pulpotomy. J Endod 34, 172–175 (2008)

18. Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH: Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin. Dent Mater 19, 199–205 (2003)

19. Brackett MG, Martin R, Sword J, Oxford C, Rueggeberg FA, Tay FR, Pashley DH: Comparison of seal after obturation techniques using a polydimethylsiloxane-based root canal sealer. J Endod 32, 1188–1190 (2006)

20. Brandt M, Stiefel A, Schaller HG: Wirkung von Spüllösungen für die endodontische Behandlung. Zahnärztl Welt/Reform 110, 74–77 (2001)

21. Brännström M, Nyborg H: Cavity treatment with a microbicidal fluoride solution. Growth of bacteria and effect on the pulp. J Prosthet Dent 30, 303–310 (1973)

22. Briseño BM, Willershausen B: Root canal sealer cytotoxicity on human gingival fibroblasts: 2. Silicone- and resin-based sealers. J Endod 17, 537–540 (1991)

23. Briseño MB, García Aranda RL, Willershausen-Zönnchen B: Bedeutung der Spülung in der Endodontie. ZMK 28, 728–736 (2012)

24. Brodin P, Røed A, Aars H, Ørstavik D: Neurotoxic effects of root filling materials on rat phrenic nerve in vitro. J Dent Res 61, 1020–1023 (1982)

25. Byström A, Sundqvist G: The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. Int Endod J 18, 35–40 (1985)

26. Byström A, Sundqvist G: Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy. Scand J Dent Res 89, 3218 (1981)

27. Barthel C, Georgi M, Schäfer E, Petschelt A, Flachsenberg S, Neuber T, Kockapan C, Weiger R, Hülsmann M: Stellungnahme der AG Endodontologie und Traumatologie der DGZ-Version 1.0. DZZ (10), (2006)

28. Camps J, Jeanneau C, El Ayachi I, Laurent P, About I: Bioactivity of a calcium silicate-based endodontic cement (BioRoot RCS): interactions with human periodontal ligament cells in vitro. J Endod 41, 1469–1473 (2015)

29. Carrigan PJ, Morse DR, Furst ML, Sinai IH: A scanning electron microscopic evaluation of human dentinal tubules according to age and location. J Endod 10, 359–363 (1984)

30. Carrotte P: Endodontics: part 1. The modern concept of root canal treatment. Br Dent J 197, 181–183 (2004)

31. Cergneux M, Ciucchi B, Dietschi M, Holz J: The influence of the smear layer on the sealing ability of canal obturation. Int Endod J 20, 228 (1987)

32. Chandrasekhar V, Amulya V, Rani VS, Prakash TJ, Ranjani AS, Gayathri C: Evaluation of biocompatibility of a new root canal irrigant Q mix™ 2 in 1 – an in vivo study. J Conserv Dent 16, 36–40 (2013)

33. Chhabra RS, Huff JE, Haseman JK, Elwell MR, Peters AC: Carcinogenicity of p-chloroaniline in rats and mice. Food Chem Toxicol 29, 119–124 (1991)

34. Chhabra RS, Thompson M, Elwell MR, Gerken DK: Toxicity of p-chloroaniline in rats and mice. Food Chem Toxicol 28, 717–722 (1990)

35. Cunningham WT, Balekjian AY: Effect of temperature on collagen-dissolving ability of sodium hypochlorite endodontic irrigant. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 49, 175–177 (1980)

36. Cunningham WT, Joseph SW: Effect of temperature on the bactericidal action of sodium hypochlorite endodontic irrigant. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 50, 569–571 (1980)

37. Czonstkowsky M, Wilson EG, Holstein FA: The smear layer in endodontics. Dent Clin North Am 34, 13–25 (1990)

38. Dammaschke T: Natriumhypochlorit – eine Übersicht. Endodontie 8(1), 9–19 (1999)

39. Dammaschke T: Biodentine – eine Übersicht. ZMK 27, 546–550 (2011)

40. 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 98, 193–198 (2007)

41. Davies RM, Schiott CR, Löe H: Streptococci isolated from plaque in subjects rinsing with chlorhexidine. Arch Oral Biol 18, 297–299 (1973)

42. De Almeida WA, Leonardo MR, Tanomaru Filho M, Silva LA: Evaluation of apical sealing of three endodontic sealers. Int Endod J 33, 25–27 (2000)

43. De-Deus G, Paciornik S, Mauricio MH, Prioli R: Real-time atomic force microscopy of root dentine during demineralization when subjected to chelating agents. Int Endod J 39, 683–692 (2008)

44. Déjou J, Raskin A, Colombani J, About I: Physical, chemical and mechanical behavior of a new material for direct posterior fillings. Eur Cell Mater 10, 22 (2005)

45. 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 33, 46-52 (2000)

46. Dimitrova-Nakov S, Uzunoglu E, Ardila-Osorio H, Baudry A, Richard G, Kellermann O, Goldberg M: In vitro bioactivity of Bioroot™ RCS, via A4 mouse pulpal stem cells. Dent Mater 31, 1290–1297 (2015)

47. Drake DR, Wiemann AH, Rivera EM, Walton RE: Bacterial retention in canal walls in vitro: effect of smear layer. J Endod 20, 7882 (1994)

48. Duarte MA, Demarchi AC, Yamashita JC, Kuga MC, de Campos Fraga S: pH and calcium ion release of 2 root-end filling materials. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 95, 345–347 (2003)

49. Dynes JJ, Lawrence JR, Korber KR, Swerhone GD, Leppard GG, Hitchcock AP: Quantitative mapping of chlorhexidine in natural river biofilms. Sci Total Environ 369, 369–386 (2006)

50. 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 37, 1558–1561 (2011)

51. Economides N, Liolios E, Kolokuris I, Beltes P: Long-term evaluation of the influence of smear layer removal on the sealing ability of different sealers. J Endod 25,123–125 (1999)

52. El Ayachi, Camps J, Jeanneau C, Laurent P, About I: Bioactivity of a calcium silicate-based endodontic cement (BioRoot™ RCS): Interactions with human periodontal ligament cells in vitro. J Endod 41, 1469-1473 (2015)

53. Eldeniz A, Guneser M, Akman M, Kolcu I: Fracture resistance of roots obturated with a novel calcium silicate-based endodontic sealer (BioRoot RCS). J Adhes Sci Technol 30:22, 2420-2428 (2016)

54. Eliot C, Hatton JF, Stewart GP, Hildebolt CF, Jane Gillespie M, Gutmann JL: The effect of the irrigant QMix on removal of canal wall smear layer: an ex vivo study. Odontology 19, 232-240 (2013)

55. El-Ma'aita AM, Qualtrough AJ, Watts DC: The effect of smear layer on the push-out bond strength of root canal calcium silicate cements. Dent Mater 29, 797–803 (2013)

56. Estrela C, Estrela CR, Barbin EL, Spanó JC, Marchesan MA, Pécora JD: Mechanism of action of sodium hypochlorite. Braz Dent J 13, 113–117 (2002)

57. Felman D, Parashos P: Coronal tooth discoloration and white mineral trioxide aggregate. J Endod 39, 484–487 (2013)

58. Ferrari M, Mannocci F, Vichi A, Cagidiaco MC, Mjör IA: Bonding to root canal: structural characteristics of the substrate. Am J Dent 13, 255–260 (2000)

59. Fisher MA, Berzins DW, Bahcall JK: An in vitro comparison of bond strength of various obturation materials to root canal dentin using a push-out test design. J Endod 33, 856–858 (2007)

60. Foster KH, Kulild JC, Weller RN: Effect of smear layer removal on the diffusion of calcium hydroxide through radicular dentin. J Endod 19, 136–140 (1993)

61. Fraunhofer JA, Branstetter J: The physical properties of four endodontic sealer cements. J Endod 8, 126 (1982)

62. Funteas UR, Wallace JA, Fochtman EW: A comparative analysis of mineral trioxide aggregate and portland cement. Aust Endod J 29, 43 (2003)

63. Galvan DA, Ciarlone AE, Pashley DH, Kulild JC, Primack PD, Simpson MD: Effect of smear layer removal on the diffusion permeability of human roots. J Endod 20, 83–86 (1994)

64. Gaston BA, West LA, Liewehr FR, Fernandes C, Pashley DH: Evaluation of regional bond strength of resin cement to endodontic surfaces. J Endod 27, 321–324 (2001)

65. Gettleman BH, Messer HH, ElDeeb ME: Adhesion of sealer cements to dentin with and without the smear layer. J Endod 17,15–20 (1991)

66. Gomes BP, Lilley JD, Drucker DB: Clinical significance of dental root canal microflora. J Dent 24, 47–55 (1996)

67. Gomes BP, Souza SF, Ferraz CC, Teixeira FB, Zaia AA, Valdrighi L, Souza Filho FJ: Effectiveness of 2 % chlorhexidine gel and calcium hydroxide against enterococcus faecalis in bovine root dentine in vitro. Int Endod J 36, 267–275 (2003)

68. Gomes BP, Vianna ME, Zaia AA, Almeida JF, Souza-Filho FJ, Ferraz CC: Chlorhexidine in endodontics. Braz Dent J 24, 89–102 (2013)

69. González-López S, Camejo-Aguilar D, Sanchez P, Bolanos-Carmona V: Effect of CHX on the decalcifying effect of 10 % citric acid, 20 % citric acid, or 17 % EDTA. J Endod 32, 781–784 (2006)

70. 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 112, 353–361 (2004)

71. Graham L, Cooper PR, Cassidy N, Nör JE, Sloan AJ, Smith AJ: The effect of calcium hydroxide on solubilisation of bioactive dentine matrix components. Biomaterial 27, 2865–2873 (2006)

72. Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M: Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. Int Endod J 36, 411–417 (2003)

73. Grossman L: Endodontic Practice. 11th ed. Philadelphia Lea & Febiger p. 255ff, (1988)

74. Grossmann LI: Physical properties of root canal cements. J Endod 2, 166–175 (1976)

75. Guneser MB, Akbulut MB, Eldeniz AU: Effect of various endodontic irrigants on the push-out bond strength of biodentine and conventional root perforation repair materials. J Endod 39, 380–384 (2013)

76. Gwinnett AJ: Smear layer: morphological considerations. Oper Dent 3, 2–12 (1984)

77. Haapasalo HK, Siren EK, Waltimo TK, Ørstavik D, Haapasalo M: Inactivation of local root canal medicaments by dentine: an in vitro study. J Endod 33, 126–131 (2000)

78. Haapasalo MP, Endal U, Zandi H, Coil JM: Eradication of endodontic infection by instrumentation and irrigation solutions. Endod Topics 10, 77–102 (2005)

79. Hand RE, Smith ML, Harrison JW: Analysis of the effect of dilution on the necrotic tissue dissolution property of sodium hypochlorite. J Endod 4, 60–64 (1978)

80. Haznedaroglu F: Efficacy of various concentrations of citric acid at different pH values for smear layer removal. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 96, 340–344 (2003)

81. Heling I, Chandler NP: Antimicrobial effect of irrigant combinations within dentinal tubules. Int Endod J 31, 8–14 (1998)

82. Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. 5. Aufl., Köln: Deutscher Ärzte-Verlag (2009)

83. Hennequin M, Pajot J, Avignant D: Effects of different pH values of citric acid solution on the calcium and phosphorus content of human dentin. J Endod 20, 551–554 (1994)

84. Hong ST, Bae KS, Baek SH, Kum KY, Shon WJ, Lee W: Effects of root canal irrigants on the push-out strength and hydration behavior of accelerated mineral trioxide aggregate in its early setting phase. J Endod 36, 1995–1999 (2010)

85. Huang TH, Kao CT: pH measurement of root canal sealers. J Endod 24, 236–238 (1998)

86. Huang TH, Lii CK, Chou MY, Kao CT: Lactate dehydrogenase leakage of hepatocytes with AH26 and AH Plus sealer treatments. J Endod 26, 509–511 (2000)

87. Hugo WB, Longworth AR: The effect of chlorhexidine on the electrophoretic mobility, cytoplasmic constituent’s dehydrogenase activity and cell walls of escherichia coli and staphylococcus aureus. J Pharm Phamacol 18, 569–578 (1966)

88. Hülsmann M: Die Desinfektion des endodontischen Systems. Endodontie 15,147–168 (2006)

89. Hülsmann M, Hahn W: Complications during root canal irrigation --literature review and case reports. Int Endod J 33, 186–193 (2000)

90. Hülsmann M, Heckendorff M, Lennon A: Chelating agents in root canal treatment: mode of action and indications for their use. Int Endod J 36, 810–830 (2003)

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

92. Hülsmann M: Die Anwendung elektrophysikalisch chemischer Methoden in der Endodontie. ZWR 113, 85–96 (2004)

93. Jeansonne MJ, White RR: A comparison of 2.0 % chlorhexidine gluconate and 5.25 % sodium hypochlorite as antimicrobial endodontic irrigants. J Endod 20, 276–278 (1994)

94. Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung Statistische Basisdaten: http://www.kzbv.de/statistische-basisdaten.768.de.html [abgerufen: 10/2017] (2017)

95. Khalil I, Naaman A, Camilleri J: Properties of tricalcium silicate sealers. J Endod 42, 1529–1535 (2016)

96. Koch KA, Brave GD, Nasseh AA: Bioceramic technology: closing the endo-restorative circle, part 2. Dent Today 29, 98, 100, 102–105 (2010)

97. Koçkapan C: Elektromikroskopische Untersuchungen über die Struktur der Schmierschicht. Dtsch Zahnärztl Z 42, 1028 (1987)

98. Kogan P, He J, Glickman GN, Watanabe I: The effects of various additives on setting properties of MTA. J Endod 32, 569–572 (2006)

99. Kokkas AB, Boutsioukis ACh, Vassiliadis LP, Stavrianos CK: The influence of the smear layer on dentinal tubule penetration depth by three different root canal sealers: an in vitro study. J Endod 30, 100–102 (2004)

100. 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 22, 395 (1996)

101. 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 14, 182–185 (1998)

102. Kouvas V, Liolios E, Vassiliadis L, Parissis-Messimeris S, Boutsioukis A: Influence of smear layer on depth of penetration of three endodontic sealers: an SEM study. Endod Dent Traumatol 14, 191–195 (1988)

103. Krishnamurthy S, Sudhakaran S: Evaluation and prevention of the precipitate formed on interaction between sodium hypochlorite and chlorhexidine. J Endod 36, 1154–1157 (2010)

104. Lalh MS, Titley K, Torneck CD, Friedman S: The shear bond strength of glass ionomer cement sealers to bovine dentine conditioned with common endodontic irrigants. Int Endod J 32, 430–435 (1999)

105. Laurent P, Camps J, de Méo M, Déjou J, About I: Induction of specific cell responses to a Ca(3)SiO(5)-based posterior restorative material. Dent Mater 24, 1486–1494 (2008)

106. Lin YH, Mickel AK, Chogle S: Effectiveness of selected materials against enterococcus faecalis. Part 3: the antibacterial effect of calcium hydroxide and chlorhexidine on enterococcus faecalis. J Endod 29, 565–566 (2003)

107. Love RM: Adherence of Streptococcus gordonii to smeared and nonsmeared dentine. Int Endod J 29, 108–112 (1996)

108. Machado-Silveiro LF, González-López S, González-Rodriguez MP: Decalcification of root canal dentine by citric acid, EDTA and sodium citrate. Int Endod J 37, 365–369 (2004)

109. Mader CL, Baumgartner JC, Peters DD: Scanning electron microscopic investigation of the smeared layer on root canal walls. J Endod 10, 477–483 (1984)

110. Marshall GW, Balooch M, Kinnley JH, Marshall SJ: Atomic force microscopy of conditioning agents on dentin. J Biomed Mater Res 29, 1381–1387 (1995)

111. Maryam K, Marzieh K: Pull-out bond strength of a self-adhesive resin cement to NaOCl-treated root dentin: effect of antioxidizing agents. Restor Dent Endod 39, 95–103 (2014)

112. McComb D, Smith DC: A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. J Endod 1, 238–242 (1975)

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

114. Miranda S, Veton H, Ömer G, Ilkan T, Kjell L, Jeroen H, Selen K, Merita B: Effects of preparation techniques on root canal shaping assessed by micro-computed tomography. Med Sci Monit Basic Res 19, 163–168 (2013)

115. Mokhtari F, Anvar E, Mirshahpanah M, Hemati H, Danesh Kazemi A: The probable effect of irrigation solution and time on bond strength to coronal dentin: an in vitro evaluation. Iran Endod J 12, 439–442 (2017)

116. Naenni N, Thomas K, Zehnder M: Soft tissue dissolution capacity of currently used and potential endodontic irrigants. J Endod 30, 785–787 (2004)

117. 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 38, 240–244 (2012)

118. Nandini S, Natanasabapathy V, Shivanna S: Effect of various chemicals as solvents on the dissolution of set white mineral trioxide aggregate: an in vitro study. J Endod 36, 135–138 (2010)

119. Neelakantan P, Varughese AA, Sharma S, Subbarao CV, Zehnder M, De-Deus G: Continuous chelation irrigation improves the adhesion of epoxy resin-based root canal sealer to root dentine. Int Endod J 45, 1097–1102 (2012)

120. Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K: Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature -- part 2. Influence of clinical factors. Int Endod J 41, 6–31 (2007)

121. Niu W, Yoshioka T, Kobayashi C, Suda H: A scanning electron microscopic study of dentinal erosion by final irrigation with EDTA and NaOCl solutions. Int Endod J 35, 934–939 (2002)

122. Ørstavik D, Kerekes K, Eriksen HM: Clinical performance of three endodontic sealers. Endod Dent Traumatol 3, 178 (1987)

123. Ørstavik D, Kerekes K, Molven O: Effects of extensive apical reaming and calcium hydroxide dressing on bacterial infection during treatment of apical periodontitis: a pilot study. Int Endod J 24, 1–7 (1991)

124. Pashley DH, Carvalho RM, Sano H, Nakajima M, Yoshiyama M, Shono Y, Fernandes CA, Tay F: The microtensile bond test: a review. J Adhes Dent 1, 299–309 (1999)

125. Patterson SS: In vivo and in vitro studies of the effect of the disodium salt of ethylenediamine tetra-acetate on human dentine and its endodontic implications. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 18, 83 (1963)

126. Perez F, Calas P, de Falguerolles A, Maurette A: Migration of a streptococcus sanguis strain through the root dentinal tubules. J Endod 19, 297–301 (1993)

127. Peters OA, Barbakow F: Effect of irrigation on debris and smear layer on canal walls prepared by two rotary techniques: a scanning electron microscopic study. J Endod 26, 6–10 (2000)

128. Petschelt A: Drying of root canals. Dtsch Zahnärztl Z 45, 222–226 (1990)

129. Pissiotis E, Spångberg LSW: Cytotoxicity of a new glass-ionomer root canal sealer. Int Endod J 27, 106 (1994)

130. Pommel L, Camps J: In vitro apical leakage of system B compared with other filling techniques. J Endod 27, 449–451 (2001)

131. Portenier I, Haapasalo H, Rye A, Waltimo TK, Ørstavik D, Haapasalo M: Inactivation of root canal medicaments by dentine, hydroxylapatite and bovine serum albumin. Int Endod J 34, 184–188 (2001)

132. Prüllage RK, Urban K, Schäfer E, Dammaschke T: Material properties of a tricalcium silicate-containing, a mineral trioxide aggregate-containing, and an epoxy resin-based root canal sealer. J Endod 42, 1784–1788 (2016)

133. Ray H, Seltzer S: A new glass ionomer root canal sealer. J Endod 17, 598–603 (1991)

134. Reichl FX, Rothmund L, Shehata M, Högg C: DNA double-strand breaks caused by new and contemporary endodontic sealers. Int Endod J 17, 1141–1151 (2015)

135. Ringen AM, Patterson SS, Newton CW, Miller CH, Mulhern JM: In vivo evaluation of chlorhexidine gluconate solution and sodium hypochlorite solution as root canal irrigants. J Endod 8, 200–204 (1982)

136. Rödig T: Aktuelle Konzepte der Wurzelkanaldesinfektion: Spülung, medikamentöse Einlage und adjuvante Maßnahmen. wissen kompakt 7, 27–39 (2013)

137. Rodríguez-Lozano FJ, García-Bernal D, Oñate-Sánchez RE, Ortolani-Seltenerich PS, Forner L, Moraleda JM: Evaluation of cytocompatibility of calcium silicate-based endodontic sealers and their effects on the biological responses of mesenchymal dental stem cells. Int Endod J 50, 67–76 (2017)

138. Roggendorf M: Wurzelkanalfüllmaterialien up to date. Bayer Zahnärztebl 9, 32–34 (2004)

139. Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, Frankenberger R: Influence of moisture on the apical seal of root canal fillings with five different types of sealer. J Endod 33, 31–33 (2007)

140. Rølla G, Löe H, Rindom Schiøtt C: The affinity of chlorhexidine for hydroxylapatite and salivary mucins. J Periodontal Res 5, 90–95 (1970)

141. Rollinson S, Barnett F, Stevens RH: Efficacy of bacterial removal from instrumented root canals in vitro related to instrumentation technique and size. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 94, 366–371 (1994)

142. Rosenthal S, Spångberg L, Safavi K: Chlorhexidine substantivity in root canal dentin. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 98, 488–492 (2004)

143. Rützel A: Einfluss verschiedener endodontischer Spülflüssigkeiten auf den Haftverbund zwischen einem Wurzelkanalsealer auf Tricalciumsilikatbasis *(BioRoot RCS)* und dem Wurzeldentin. Med Diss (Marburg) (2016)

144. Safavi KE, Spångberg LSW: Chlorhexidin in der Endodontie: Chemie, antimikrobielle Wirkung und mögliche Indikationen. Endodontie 15, 171–176 (2006)

145. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo M, Ørstavik D: Bacterial penetration along different root canal filling materials in the presence or absence of smear layer. Int Endod J 41, 32–40 (2008)

146. Saunders WP1, Saunders EM: Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review. Endod Dent Traumatol 10, 105–108 (1994)

147. Scelza MF, Antoniazzi JH, Scelza P: Efficacy of final irrigation a scanning electron microscopic evaluation. J Endod 26, 355–358 (2000)

148. Scelza MF, Teixeira AM, Scelza P: Effect of three different time periods of irrigation with EDTA-T, EDTA, and citric acid on smear layer removal. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 98, 499–503 (2004)

149. Schäfer E, Hickel R: Wurzelkanalfüllpasten und Füllstifte. Stellungnahme der DGZMK und DGZ. Dtsch Zahnärztl Z 55, 15–25 (2000)

150. Schäfer E: Wurzelkanalfüllmaterialien – Ein Überblick. Teil 1: Wurzelkanalfüllpasten. Endodontie 10, 337–348 (2001)

151. Schäfer E: Bewertung aktueller Wurzelkanalfüllmaterialien. Zahnärztl Mitt 1, 24 (2003)

152. Schwartz RS, Mauger M, Clement DJ, Walker 3rd WA: Mineral trioxide aggregate: a new material for endodontics. J Am Dent Assoc 130, 967–975 (1999)

153. Septodont: BioRoot RCS – Scientific file.1–12 (2014)

154. Shipper G, Teixeira FB, Arnold RR, Trope M: Periapical inflammation after coronal microbial inoculation of dog roots filled with guttapercha or resilon. J Endod 31, 91–96 (2005)

155. Shokouhinejad N, Sharifian MR, Jafari M, Sabeti MA: Push-out bond strength of resilon/epiphany self-etch and gutta-percha/AH26 after different irrigation protocols. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 110, 88–92 (2010)

156. Simon S, Smith AJ, Berdal A, Lumley PJ, Cooper PR: The MAP kinase pathway is involved in odontoblast stimulation via p38 phosphorylation. J Endod 36, 256–259 (2010)

157. Siqueira Jr JF, RocasI N: Clinical implications and microbiology of bacterial persistence after treatment procedures. J Endod 34, 1291–1301 (2008)

158. Skinner RL, Himel VT. The sealing ability of injection-molded thermoplasticized gutta-percha with and without the use of sealers. J Endod;13(7), 315-7 (1987)

159. Smith J, Wayman B: An evaluation of the antimicrobial effectiveness of citric acid as a root canal irrigant. J Endod 12, 54–58 (1986)

160. Smith JB, Loushine RJ, Weller RN, Rueggeberg FA, Whitford GM, Pashley DH, Tay FR: Metrologic evaluation of the surface of white MTA after the use of two endodontic irrigants. J Endod 33, 463–467 (2007)

161. Spångberg LS, Barbosa SV, Lavigne GD: AH 26 releases formaldehyde. J Endod 19, 596–598 (1993)

162. Spencer HR, Ike V, Brennan PA: Review: the use of sodium hypochlorite in endodontics-potential complications and their management. Br Dent J 202, 555–559 (2007)

163. Spratt DA, Pratten J, Wilson M, Gulabivala K: An in vitro evaluation of the antimicrobial efficacy of irrigants on biofilms of root canal isolates. Int Endod J 34, 300–307 (2001)

164. Stevens RW, Strother JM, McClanahan SB: Leakage and sealer penetration in smear-free dentin after a final rinse with 95 % ethanol. J Endod 32, 785–788 (2006)

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

166. Taylor JK, Jeansonne BG, Lemon RR: Coronal leakage: effect or smear layer, obturation techniques and sealer. J Endod 23, 508–512 (1997)

167. Timpawat S, Harnirattisai C, Senawongs P: Adhesion of a glass-ionomer root canal sealer to the root canal wall. J Endod 27, 168–171 (2001)

168. Timpawat S, Sripanaratanakul S: Apical sealing ability of glass ionomer sealer with and without smear layer. J Endod 24, 343–345 (1998)

169. Tomson PL, Grover LM, Lumley PJ, Sloan AJ, Smith AJ, Cooper PR: Dissolution of bioactive dentine matrix components by mineral trioxide aggregate. J Dent 35, 636–642 (2007)

170. Torabinejad M, Handysides R, Khademi AA, Bakland LK: Clinical implications of the smear layer in endodontics: a review. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 94, 658–666 (2002)

171. Torabinejad M, Khademi AA, Babagoli J, Cho Y, Johnson WB, Bozhilov K, Kim J, Shabahang S: A new solution for the removal of the smear layer. J Endod 29, 170–175 (2003)

172. Torabinejad, M, Chivian N: Clinical applications of mineral trioxide aggregate. J Endod 25, 197 (1999)

173. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR: Physical properties of a new root end filling material. J Endod 21, 349 (1995)

174. Trope M, Bergenholtz G: Microbiological basis for endodontic treatment: can a maximal outcome be achieved in one visit. Endod Topics 1, 40–53 (2002)

175. Violich DR, Chandler NP: The smear layer in endodontics – a review. Int Endod J 43, 2–15 (2010)

176. Waltimo T: Hefepilze bei der endodontischen Infektion. Häufigkeit, Virulenz und Behandlungsstrategien. Endodontie 15, 123–134 (2006)

177. Wandelt S: Eine kritische Betrachtung zur Aufbereitung von Wurzelkanälen mit Komplexbildern. Dtsch Zahnärztl Z 16, 81–86 (1961)

178. Wang Z, Shen Y, Haapasalo M: Effectiveness of endodontic disinfecting solutions against young and old enterococcus faecalis biofilms in dentin canals. J Endod 38, 1376–1379 (2012)

179. Wayman BE, Kopp WM, Pinero GJ, Lazzari EP: Citric and lactic acids as root canal irrigants in vitro. J Endod 5, 258–265 (1979)

180. Weinreb MH, Meier E: The relative efficiency of EDTA, sulfuric acid and mechanical instrumentation in the enlargement of root canals. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 19, 247 (1965)

181. Wilcox LR, Wiemann AH: Effect of a final alcohol rinse on sealer coverage of obturated root canals. J Endod 21, 256–258 (1995)

182. 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 41, 111–124 (2015)

183. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Sun Lin P: A scanning electron microscopic investigation of several irrigating solutions: part 3. J Endod 9, 137–142 (1983)

184. Yamaguchi M, Yoshida K, Suzuki R, Nakamura H: Root canal irrigation with citric acid solution. J Endod 22, 27–29 (1996)

185. Yildirim T, Oruçoğlu H, Cobankara FK: Long-term evaluation of the influence of smear layer on the apical sealing ability of MTA. J Endod 34, 1537–1540 (2008)

186. Zamany A, Safavi KE, Spångberg LSW: The effect of chlorhexidine as an endodontic disinfection. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 95, 578–581 (2003)

187. Zehnder M: Root canal irrigants. J Endod 32, 147–168, 389–398 (2006)

188. Zehnder M, Kosicki D, Luder H, Sener B, Waltimo T: Tissue-dissolving capacity and antibacterial effect of buffered and unbuffered hypochlorite solution. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 94, 756–762 (2002)

189. Zehnder M, Lehnert B, Schönenberger K, Waltimo T: Spüllösungen und medikamentöse Einlagen in der Endodontie. Schweiz Monatsschr Zahnmed 113, 756–763 (2003)

190. Zehnder M, Schmidlin P, Sener B, Waltimo T: Chelation in root canal therapy reconsidered. J Endod 31, 817–820 (2005)

191. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M: Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against enterococcus faecalis. J Endod 35, 1051 (2009)

192. Zhao W, Wang J, Zhai W, Wang Z, Chang J: The self-setting properties and in vitro bioactivity of tricalcium silicate. Biomaterials 26, 6113–6121 (2005)

193. Zhu Q, Haglund R, Safavi KE, Spångberg LS: Adhesion of human osteoblasts on root end filling materials. J Endod 26, 404 (2000)

194. Zmener O, Dominguez FV: Tissue response to a glass ionomer used as an endodontic cement: a preliminary study in dogs. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 56, 198 (1983)

195. Çalt S, Serper A: Time dependent effects of EDTA on dentin structures. J Endod 28, 17–19 (2002)

12 Anhang B

12.1 Ergebnisse der fraktografischen Analyse

Gruppe	Spüllösung	Probe	Frakturmodus
1	Alkohol	1	Kohäsiv
		2	Gemischt
		3	Gemischt
		4	Kohäsiv
		5	Kohäsiv
		6	Kohäsiv
		7	Kohäsiv
		8	Kohäsiv
		9	Gemischt
		10	Kohäsiv
2	CHX	1	Kohäsiv
		2	Kohäsiv
		3	Kohäsiv
		4	kohäsiv
		5	kohäsiv
		6	kohäsiv
		7	kohäsiv
		8	kohäsiv
		9	kohäsiv
		10	kohäsiv
3	Citronen-säure	1	adhäsiv am Dentin
		2	kohäsiv
		3	adhäsiv am Dentin
		4	adhäsiv am Dentin
		5	kohäsiv
		6	kohäsiv
		7	kohäsiv
		8	adhäsiv am Dentin
		9	kohäsiv
		10	kohäsiv

Gruppe	Spüllösung	Probe	Frakturmodus
4	EDTA	1	kohäsiv
		2	adhäsiv am Dentin
		3	kohäsiv
		4	gemischt
		5	kohäsiv
		6	kohäsiv
		7	gemischt
		8	kohäsiv
		9	adhäsiv am Dentin
		10	kohäsiv
5	NaOCl	1	kohäsiv
		2	kohäsiv
		3	kohäsiv
		4	gemischt
		5	gemischt
		6	kohäsiv
		7	kohäsiv
		8	gemischt
		9	gemischt
		10	kohäsiv
6	*Q-Mix*	1	adhäsiv am Dentin
		2	kohäsiv
		3	Adhäsiv am Dentin
		4	adhäsiv am Dentin
		5	kohäsiv
		6	kohäsiv
		7	kohäsiv
		8	kohäsiv
		9	kohäsiv
		10	kohäsiv
7	Aqua dest.	1	kohäsiv
		2	kohäsiv
		3	kohäsiv
		4	kohäsiv
		5	kohäsiv
		6	kohäsiv
		7	gemischt
		8	kohäsiv
		9	gemischt
		10	gemischt

12.2 Materialliste

Material	Hersteller
BioRoot RCS LOT B11929	Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Frankreich
BioRaCe-Feilen Basic Set BR0-5:LOT 27170, LOT 21978, LOT 21978,LOT 21978, LOT 21978, Refill Pack 6xBR7: LOT 27122	FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz
EndoPilot-Endomotor	Schlumbohm, Brokstedt, Deutschland
Doppelscheibenmodelltrimmer	Dentaurum, Ispringen, Deutschland
Stahlspreaderrohlinge ISO 25	Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland
MultiPoint-Sandstrahler	Schütz-Dental, Rosbach, Deutschland
Korox Korundpulver 50	BEGO, Bremen, Deutschland
MicroEtcher CD	Danville Materials, San Ramon, CA, USA
CoJet Sand 30 µm	3M ESPE, St. Paul, MN, USA
Einmalspritze 2 ml	B.Braun, Melsungen, Deutschland
Messlehre	KaVo Dental GmbH, Biberach an der Riß, Germany
Silaplast FUTUR	DETAX, Ettlingen, Deutschland
Cat p universal FUTUR	DETAX, Ettlingen, Deutschland
Endospülkanüle *Endo Needle Dr. Buquet*	VMK Vedefar, Dilbeek, Belgien
Papierspitzen ISO 55	Pluradent, Offenbach, Deutschland
Natriumazid-Lösung	Hergestellt im UKGM Marburg aus 0,9%iger NaCl-Lsg. und 0,001%iger Natriumazid-Lsg.
Zwick-Universalprüfmaschine	Zwick Materials Testing, Ulm, Deutschland
Wärmeschrank, Memmert B80	Schwabach, Deutschland
Skalpell *Feather* No. 10, No. 11	PFM Medical, Köln, Deutschland
Lentulo	VDW, München, Deutschland
*EndoActivator*Größe L	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz
Spiegelreflexkamera *EOS 500D*	Canon, Tokio, Japan
NaOCl (3%) Ch.-B.: 13164	Hypochlorit-SPEIKO 5,25%; Speiko,Münster,Deutsch-land(3%ig durch Verdünnung mit Aqua dest.)
EDTA (15%) LOT: A0322426	Ethylendiamintetraessigsäure Dinatriumsalz Dihydrat, Acros, New Jersey, USA
Citronensäure (40%) Ch.-B.: 084208515	Hergestellt aus Citronensäure- Monohydrat, Carl Roth GmbH, Karlsruhe, D
CHX (2%) Ch.-B.: R-20140423-01	Chlorhexidindigluconat-Lösung, Apotheke des UKGM Marburg
Ampuwa Spüllösung *Plastipur* (Aqua dest.) Ch.-B.: 13HGP181	Fresenius, Bad Homburg, Deutschland
*Q-Mix*LOT: 140109	*Q-Mix*® (Inhaltsstoffe EDTA + CHX)

13 Verzeichnis der akademischen Lehrer

Meine akademischen Lehrer an der Philipps-Universität in Marburg waren folgende Professoren und Dozenten:

Adamkiewicz, Arbeiter, Braun, Cetin, Feuser, Frankenberger, Gente, Gloerfeld, Höffken, Jablonski-Momeni, Koolmann, Korbmacher-Steiner, Lill, Lotzmann, Mengel, Mittag, Neff, Nonnenmacher, Pieper, Ramaswamy, Roggendorf, Seitz, Steiniger, Teymoortash, Weber, Weihe

14 TabellarischerLebenslauf

15 Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel

Der Einfluss verschiedener endodontischer Einzelspülflüssigkeiten auf den Haftverbund zwischen einem Wurzelkanalsealer auf Tricalciumsilikat-basis (*BioRoot RCS*) und dem Wurzeldentin

In der Klinik für Zahn-,Mund-und Kieferheilkunde Marburg unter der Leitung von Prof. Dr.Frankenberger mit Unterstützung durch Priv.-Doz. Dr.Roggendorf ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe. Ich habe bisher weder an einem in- oder ausländischen medizinischen Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.
Ich versichere, dass ich sämtliche wörtlichen oder sinngemäßen Übernahmen und Zitate kenntlich gemacht habe.
Mit dem Einsatz von Software zur Erkennung von Plagiaten bin ich einverstanden.

_____

Ort, Datum, Unterschrift Doktorand

Die Hinweise zur Erkennung von Plagiaten habe ich zur Kenntnis genommen

_____

Ort, Datum, Unterschrift Referent

16 Danksagung