

Aus dem medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des

Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

Geschäftsführender Direktor: Univ.-Prof. Dr. Roland Frankenberger

Poliklinik für Zahnerhaltung

Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Roland Frankenberger

**Haftverbund des Wurzelkanalsealers *Well-Root ST*
zum Wurzelkanalentin in Abhängigkeit
verschiedener endodontischer Spüllösungen**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades

der Zahnmedizin am Fachbereich Medizin der

Philipps-Universität Marburg

Vorgelegt von

Pia Vaupel

aus Marburg

Marburg 2025

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am: 09.01.2025

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs

Dekan: Herr Prof. Dr. M. Hertl

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

Korreferent: Herr Priv.-Doz. J. Ebert

Meiner Familie in Dankbarkeit gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Literaturübersicht.....	3
2.1	Indikationen und Kontraindikationen endodontischer Behandlungen	3
2.2	Ziele einer endodontischen Behandlung	4
2.3	Instrumente zur Wurzelkanalaufbereitung.....	4
2.3.1	Manuelle Wurzelkanalaufbereitung	5
2.3.2	Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung	5
2.3.2.1	<i>F360-System und EndoPilot</i>	6
2.4	Endodontische Spüllösungen	7
2.4.1	Alkohol.....	7
2.4.2	Chlorhexidindigluconat	8
2.4.3	Natriumhypochlorit.....	9
2.4.4	Wasserstoffperoxid	9
2.4.5	Ethylendiamintetraazetat.....	9
2.4.6	Zitronensäure	10
2.5	Die Schmierschicht	10
2.6	Wurzelkanalfüllung	11
2.7	Wurzelkanalfüllmaterialien	12
2.7.1	Biokeramische Sealer	14
2.7.1.1	<i>Well-Root ST</i>	15
2.7.2	Sealer auf Kalziumhydroxid-Basis.....	16
2.7.3	Sealer auf Epoxidharz-Basis.....	16
2.7.4	Sealer auf Glasionomere-Basis.....	17
2.7.5	Sealer auf Basis adhäsiver Materialien	17
2.7.6	Sealer auf Polydimethylsiloxan-Basis	18
2.7.7	Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis.....	18
2.7.8	Kernmaterialien.....	18

3	Problemstellung	20
4	Material und Methoden.....	21
4.1	Übersicht Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	21
4.2	Auswahl, Vorbereitung und Bearbeitung der Probenzähne	22
4.3	Vorbereitung der Spreader	23
4.4	Wurzelkanalspülung und Spreaderinsertion.....	23
4.5	Messreihe.....	24
4.6	Analyse der Frakturmodi.....	25
4.7	Statistische Analyse.....	26
5	Ergebnisse	27
5.1	Statistische Auswertung.....	27
5.2	Frakturanalyse.....	29
6	Diskussion und Schlussfolgerung	31
6.1	Diskussion Material und Methoden.....	31
6.1.1	Probenauswahl und Lagerung.....	31
6.1.2	Probenherstellung.....	33
6.1.3	Spülflüssigkeiten.....	34
6.1.4	Einfluss medikamentöser Einlagen	36
6.1.5	Testverfahren zur Ermittlung der Haftwerte	36
6.2	Diskussion der Ergebnisse	38
6.2.1	Prüfung der Arbeitshypothesen	38
6.2.2	Haftwerte von <i>Well Root ST</i>	38
6.3	Schlussfolgerung und klinische Relevanz	40
7	Zusammenfassung.....	41
7.1	Ziel der Studie.....	41
7.2	Material und Methoden.....	41
7.3	Ergebnisse	42
7.4	Schlussfolgerung	42

8	Abstract	43
8.1	Aim of the study	43
8.2	Materials and methods	43
8.3	Results	44
8.4	Conclusion	44
9	Literatur	45
10	Abkürzungsverzeichnis	56
11	Abbildungsverzeichnis	57
12	Tabellenverzeichnis	57
13	Materialliste	58
14	Spreaderauswertung – Frakturmodi	60
15	Anhang	63
15.1	Verzeichnis akademischer Lehrer	63
15.2	Danksagung	64

1 Einleitung

Die Wurzelkanalbehandlung als wichtiger Pfeiler der konservierenden Zahnerhaltung dient dem langfristigen Erhalt des Zahnes zu (kau-)funktionellen, phonetischen und ästhetischen Zwecken. Ziel ist es, die irreversibel entzündete, infizierte oder nekrotische Pulpa zu entfernen, das Wurzelkanalsystem zu reinigen, von Keimen zu befreien und mit einem geeigneten Material möglichst dicht zu verschließen. [51]

Die Reinigung des Wurzelkanals gliedert sich dabei in der Regel in die drei Abschnitte Aufbereitung des Wurzelkanals, Spülung des Wurzelkanalsystems und medikamentöse Einlage.

Die Aufbereitung des Wurzelkanals erfolgt in der Regel mit Feilen. Angewendet werden sowohl Handfeilen zur manuellen Aufbereitung, als auch maschinelle Systeme, sowie eine Kombination aus beidem. Hierbei soll vitales und nekrotisches Gewebe entfernt und die Bakterienlast reduziert werden. Zudem soll der Wurzelkanal einen möglichst gleichmäßigen Querschnitt erhalten, um später das Füllen des Wurzelkanals zu erleichtern.

Da mechanisch nur eine begrenzte Keimzahlreduktion gelingt, ist zudem eine zusätzliche chemische Reduktion mittels endodontischer Spüllösungen notwendig [55]. Auf dem Markt existiert eine Vielzahl verschiedener Präparate, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Es können, angepasst an die jeweils vorliegende Situation, unterschiedliche Spüllösungen sowie Kombinationen aus Spüllösungen, sogenannte Spülprotokolle, verwendet werden. Wichtige Eigenschaften der Spüllösung sind dabei die desinfizierende Wirkung und die Auflösung von Schmierschicht und Gewebe, bei gleichzeitig möglichst geringer toxischer Wirkung auf umgebendes Gewebe, wie den Knochen. [51]

Als dritter Abschnitt der Reinigung und Aufbereitung des Wurzelkanalsystems gilt die medikamentöse Einlage. Diese hat ebenfalls eine Verminderung der vorhandenen Mikroorganismen zum Ziel [55]. Zudem können vorliegende Beschwerden, wie Schmerz, beispielsweise durch die Verwendung corticoid- oder antibiotikahaltiger Medikamente reduziert werden. Bekanntes Beispiel hierfür ist das Präparat *Ledermix*, welches mit Triamcinolonacetonid und Demeclocylin glucocorticoid- und tetrazyklinhaltig ist.

Einleitung

Nach Abschluss der chemomechanischen Reinigung und Aufbereitung des Wurzelkanalsystems folgt die Wurzelkanalfüllung. Diese soll den dauerhaften und flüssigkeitsdichten Verschluss des Wurzelkanalsystems gegenüber Mikroorganismen gewährleisten. Dabei soll nicht nur apikal und koronal ein dichter Verschluss erfolgen, sondern auch vorhandenen Lateralkanäle sollen sicher verschlossen werden. [51] Die laterale Kondensation unter Verwendung eines Kernmaterials aus Guttapercha und verschiedener Füllpasten stellt dabei bis heute den Goldstandard dar [55, 80].

Da endodontische Spüllösungen die Schmierschicht und Gewebe auflösen, Mikroorganismen reduzieren und Dentin dekalzifizieren, stellt sich die Frage, ob auch der Haftverbund des Wurzelkanaldentins zu den Wurzelfüllmaterialien dauerhaft beeinträchtigt wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss gängiger Spüllösungen auf den Haftverbund zwischen dem biokeramischen Wurzelkanalsealer *Well-Root ST* und dem Wurzelkanaldentin zu untersuchen.

2 Literaturübersicht

2.1 Indikationen und Kontraindikationen endodontischer Behandlungen

Nicht jede pulpale Erkrankung erfordert zwangsweise eine endodontische Behandlung. Eine reversible Pulpitis, ausgelöst durch eine Caries profunda, kann häufig durch eine Füllung, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme eines kalziumhydroxidhaltigen Präparates therapiert werden. Das Calciumhydroxidpräparat wird dabei entweder auf das Dentin in pulpanahen Bereichen aufgetragen, oder bei punktförmigen Eröffnungen der Pulpa als direkte Überkappung dieser genutzt, bevor die Kavität des Zahns gefüllt wird.

Eine irreversible Pulpitis hingegen bedarf in der Regel zumindest einer Vitalamputation, also Entfernung der Kronenpulpa, häufig sogar einer Vitalexstirpation und Wurzelkanalbehandlung. Ebenfalls indiziert ist die Wurzelkanalbehandlung bei Nekrosen der Pulpa, wobei klinische und radiologische Zeichen eines periradikulären Geschehens vorkommen können, aber nicht obligat sind. [51, 55]

Auch prothetische oder parodontologische Maßnahmen erfordern teilweise eine Wurzelkanalbehandlung. In diesen Fällen wird die Devitalisierung bewusst vorgenommen, beispielsweise vor geplanter Hemisektion oder Überkronung bei fraglichem Zustand der Pulpa. [51, 55]

Bei der Indikationsstellung ist grundsätzlich zu beachten, ob der Zahn auf längere Sicht zu erhalten ist, die Erhaltung für das Gesamtkonzept sinnvoll ist und sich das Patienten-Interesse am Zahnerhalt in seiner Compliance widerspiegelt [121].

Neben einer Vielzahl an Indikationen existieren auch Kontraindikationen der endodontischen Behandlung. Diese sind die fehlende prothetische, ästhetische und kaufunktionelle Wertigkeit des Zahnes. Auch bei Zähnen, welche nur unter großem Aufwand oder gar nicht durch restaurative Maßnahmen wiederhergestellt werden können, ist die Indikation einer Wurzelkanalbehandlung fraglich. Ebenfalls als Kontraindikation können komplizierte Wurzelkonfigurationen, Wurzelfrakturen, Perforationen und unzureichende parodontale Stabilität gelten. Soll die Wurzelkanalbehandlung von Molaren zu Lasten der gesetzlichen Krankenkassen durchgeführt werden, gelten laut Kassenzahnärztlicher Bundesvereinigung weitere Einschränkungen. Die erforderlichen Bedingungen für eine Wurzelkanalbehandlungen sind vorhandener, intakter Zahnersatz, die

Vermeidung einer einseitig verkürzten Zahnreihe und die vollständige, lückenlose Zahnreihe.

Neben den zahnbezogenen Faktoren existieren auch patientenbezogene Faktoren, welche gegen eine Wurzelkanalbehandlung sprechen. Mangelnde Kooperationsbereitschaft, ein schlechter Allgemeinzustand und gegebenenfalls eine schlechte Mundhygiene können gegen eine Wurzelkanalbehandlung sprechen. [51, 55]

2.2 Ziele einer endodontischen Behandlung

Ziel der Wurzelkanalbehandlung ist der Erhalt eines geschädigten Zahnes, der Schutz angrenzender Strukturen und die Ausheilung gegebenenfalls vorhandener apikaler Parodontitiden [55].

Die endodontische Behandlung dient der Reduktion von Mikroorganismen und der Entfernung des Pulpagewebes [121]. Der dichte koronale Verschluss soll vor einer Reinfektion durch Mikroorganismen der Mundhöhle schützen, während der apikale Verschluss das Eindringen von Flüssigkeit in den Kanal und den Austritt reizender Stoffe in das periapikale Gewebe verhindern soll [80].

Durch die hermetische Abdichtung des Kanals wird den verbliebenen Mikroorganismen zudem der Nachschub an zum Stoffwechsel nutzbaren Produkten entzogen. Dadurch gehen noch vorhandenen Mikroorganismen zugrunde und das Risiko eines Wiederaufflammens der Infektion wird vermindert. [80]

2.3 Instrumente zur Wurzelkanalaufbereitung

Die Aufbereitung der Kanäle, also die mechanische Reinigung und Formgebung, erfolgt mithilfe von Hand- oder maschinellen Instrumenten. Üblicherweise werden diese aus Chrom-Nickel-Edelstahl- oder Nickel-Titan-Legierungen gefertigt. [51]

Nach Auffinden und Darstellen der Kanaleingänge werden diese in der Regel mit einer schmalen C-Feile sondiert und anschließend die Kanaleingänge zum Beispiel mittels Gates-Glidden Bohrern erweitert. Dadurch wird ein geradliniger Zugang der Instrumente zum Kanal gewährleistet, welcher Frakturen und ungleichmäßigem Abtrag mit der Folge der Verlegung des Kanallumens entgegenwirken soll. [121]

Der Längenbestimmung, welche röntgenologisch, endometrisch oder taktil erfolgen kann, schließt sich die Aufbereitung an [51, 121].

2.3.1 Manuelle Wurzelkanalaufbereitung

Erfolgt die Aufbereitung manuell, ist zwischen verschiedenen Feilendesigns zu wählen. Während Reamer und K-Feilen zumeist aus Edelstahlrohlingen durch Verdrillen hergestellt werden, werden Headström-Feilen aus dem Rohling herausgefräst. Das Design der Feilen hat Einfluss auf den Gebrauch der Instrumente. Reamer mit dreieckigem, verdrilltem Querschnitt werden rotierend eingesetzt, Headström-Feilen dagegen sind bei Translationsbewegungen wirkungsvoll, bei Rotationsbewegungen hingegen fraktur anfällig. [121] Die Konizität von Handinstrumenten beträgt in der Regel 2 %, das heißt, der Durchmesser nimmt von der Spitze an kontinuierlich um 0,02 mm pro Millimeter zu [51].

2.3.2 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung

Eine bedeutende Weiterentwicklung der Endodontie stellte die Einführung der maschinellen Aufbereitung dar, wodurch eine Vereinfachung und Zeitersparnis der Wurzelkanalbehandlung erreicht werden sollte. Während die Zeitersparnis der maschinellen Systeme in Studien deutlich belegt wurde [6, 24, 48, 73], scheint die Reinigungsfähigkeit der manuellen Systeme den maschinellen ebenbürtig [6, 48, 73].

Bei den zur maschinellen Aufbereitung eingesetzten Systemen bestehen die Feilen vorwiegend aus Nickel-Titan Legierungen. Diese weisen ein pseudoelastisches Verhalten auf, also die Möglichkeit, sich nach Verformung vollständig zurückzustellen und sind deshalb besonders zum Einsatz in permanent rotierenden oder reziproken Systemen geeignet. Ebenfalls von Vorteil ist der Einsatz dieser Instrumente in gekrümmten Kanälen oder bei komplexer Kanalkonfiguration, da das Risiko von Kanalverlagerungen reduziert wird. [51].

Ein systematischer Review aus dem Jahr 2019 befasste sich mit der Effizienz manueller und maschineller im Rahmen der Aufbereitung im Milchgebiss. Dieser stellte heraus, dass die Reinigungswirkung bei beiden Vorgehen als gleich einzustufen sei. Da durch die rotierende, maschinelle Aufbereitung allerdings eine bessere Formgebung erreicht werde, erziele man maschinell eine bessere Behandlungsqualität in kürzerer Zeit. [87]

Die Konizität maschineller Feilensysteme ist unterschiedlich. Während das *F360-System* durchgängig eine Konizität von 4 % aufweist, bietet beispielsweise das *Reciproc-System* Taper von 5-8 %.

2.3.2.1 *F360-System und EndoPilot*

Das *F360-System* gehört zu den vollrotierenden Einfeilen-Systemen. Die Instrumente weisen einen doppel-s-förmigen Querschnitt auf und sind in den Größen 25, 35, 45 und 55 mit einer kontinuierlichen Konizität von 4% erhältlich. In Kombination mit einem drehmomentbegrenzten Winkelstück, wie zum Beispiel dem des *EndoPilot-Systems*, ist laut Hersteller eine einfache, sichere und schnelle Aufbereitung möglich. Von Vorteil ist zudem, dass zwischen den verschiedenen Feilen kein Umschalten des Drehmoments erfolgen muss, da alle Feilen mit der gleichen Einstellung arbeiten.

Für die Aufbereitung des Kanaleingangsbereichs steht im *F360 System* der *Opener OP10L19* zur Verfügung. Die Gleitpaderstellung ist entweder manuell möglich, oder mit dem ebenfalls zugehörigen *PathGlider*, die in den Größen 15 und 20 mit 3 % Konus verfügbar sind.

Mit dem *F360-System* ist die Aufbereitung gekrümmter und s-förmiger Kanäle unter Wahrung der Kanalanatomie gut möglich [15, 17]. Verglichen mit dem *Reciproc-System* entsteht bei der Aufbereitung mit *F360* deutlich weniger Debris, welcher nach apikal überpresst wird [16]. Da das apikale Überpressen von Debris ins periradikuläre Gewebe mit einer höheren Wahrscheinlichkeit für postoperative Schmerzen und dem Wiederaufflammen einer Infektion einher geht, sollte dies vermieden werden [104, 106].

Der *EndoPilot* gehört zu den drehzahl- und drehmomentüberwachten Endo-Motoren. Integriert ist ein Apex-Locator mit Auto-Stopp-Funktion, welcher den Arbeitsablauf der Wurzelkanalbehandlung vereinfachen soll, indem die endometrische Längenbestimmung durch die Verwendung eines weiteren Gerätes entfällt. Durch die Auto-Stopp-Funktion des Gerätes soll zudem eine Überinstrumentierung verhindert werden. Die Genauigkeit dieser Funktionen des Endo-Motors *EndoPilot* wurde in einer Studie mit der Längenbestimmung und Auto-Stopp-Funktion des *VDW.Gold RECIPROC Motor* und der manuellen Arbeitslängenbestimmung durch *Raypex 6* verglichen. Dabei wurde zwischen den verschiedenen Systemen kein signifikanter Unterschied festgestellt [21]. In einer anderen Studie, welche *Raypex 6* und *EndoPilot* verglich, war durch die automatische Längenbestimmung während rotierender Instrumentierung mit dem *EndoPiloten* das Risiko einer Überinstrumentierung erhöht [20].

2.4 Endodontische Spüllösungen

Heute ist eine Vielzahl an endodontischen Spüllösungen auf dem Markt verfügbar, welche abhängig von den gestellten Anforderungen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Dabei gelten laut einer gemeinsamen Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde e.V. (DGZMK) und der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ) folgende Anforderungen an eine endodontische Spüllösung: [31]

- Desinfektionswirkung
- Biologische Verträglichkeit
- Gewebe auflösende Wirkung
- Einfache Applizierbarkeit.

Zudem werden in der gemeinsamen Stellungnahme folgende Ziele der Wurzelkanalspülung genannt: [31]

- Reduktion der Keime und bakteriellen Toxine im Wurzelkanalsystem
- Auflösung und Entfernung von Resten des Pulpagewebes
- Unterstützung der mechanischen Aufbereitung und Abtransport von Dentinspänen.

Einfluss auf die Wirksamkeit der endodontischen Spüllösung haben Temperatur und Konzentration der Spülflüssigkeit, Menge und Dauer der Applikation und die vorangegangene Aufbereitung. Da die Spülflüssigkeit nur wenige Millimeter über das Kanülen-Ende hinaus wirksam ist, empfiehlt sich eine Aufbereitung, die es ermöglicht, bis auf ungefähr 4 mm vor der apikalen Konstriktion mit Kanülen von 0,3-0,4 mm Durchmesser vorzudringen. [31]

Zu den häufig genutzten endodontischen Spüllösungen zählen Chlorhexidindiglukonat, Ethylendiamintetraacetat, Wasserstoffperoxid, Natriumhypochlorit und Zitronensäure [117]. Zur Trocknung des Wurzelkanals wird zudem Alkohol verwendet [55, 121].

2.4.1 Alkohol

Der Einsatz von Alkohol in der Endodontie dient vor allem der effizienten Trocknung der Wurzelkanäle [51, 55, 121]. Durch die niedrige Oberflächenspannung wird ermöglicht, dass der Alkohol auch in Seitenkanäle und enge Abschnitte des Wurzelkanalsystems diffundieren kann [55]. Daher wird Alkohol vorrangig als Abschlusspülung vor der

Wurzelfüllung genutzt [121]. Studien ergaben, dass bei Verwendung von 95%igem Ethanol als Abschlussspülung die Penetration des Sealers in die Wurzelkanäle erhöht und die Leakage-Rate verringert werden kann [110]. Auch beim Einsatz im Milchgebiss wurden für die mit Ethanol getrockneten Wurzelkanäle bessere Abdichtungswerte erreicht [115]. Eine brasilianische Studie fand zudem heraus, dass zur Entfernung einer medikamentösen Einlage aus Calciumhydroxid, die Anwendung von 70% Ethanol der von 2,5%igem Natriumhypochlorit und 17%igem EDTA überlegen ist [32]. Durch die ungenügende antimikrobielle Wirkung alkoholhaltiger Spüllösungen wird ihre Verwendung allerdings nur in Kombination mit weiteren Spüllösungen wie Natriumhypochlorit empfohlen [31]. So wird unter anderem *Enterococcus faecalis*, welcher vor allem bei Reinfektionen des Wurzelkanalsystems eine Rolle spielt, durch die Verwendung von Alkohol allein nicht ausreichend eliminiert [93].

2.4.2 Chlorhexidindigluconat

Chlorhexidindigluconat als endodontische Spüllösung wird in Konzentrationen von 0,2-2 % empfohlen [55, 121]. Die zweifach positive Ladung des CHX ermöglicht eine Wechselwirkung mit negativ geladenen Flächen, so zum Beispiel den Zellwänden von Bakterien [45, 55]. Dadurch kommt es zu einer Veränderung des osmotischen Gleichgewichts der Bakterienzellen. Während die Wirkung bei niedrigen Konzentrationen bakteriostatisch ist, entsteht bei höheren Konzentrationen unter anderem durch Koagulation des Zytoplasmas ein bakterizider Effekt [45]. Durch die Bindung an negativ geladene Flächen, welche sich nur langsam löst, erhält CHX eine Depotwirkung, welche auch als Substantivität bezeichnet wird [45, 55]. Aufgrund der guten Wirkung gegen *E. faecalis* und Pilze wird es vor allem bei endodontischen Revisionen verwendet [55, 121]. Durch die fehlende gewebsauflösende Wirkung ist CHX allerdings nie als alleinige Spüllösung anzuwenden [49]. Empfohlen wird unter anderem die Kombination mit NaOCl und EDTA, wobei NaOCl und CHX nie in direkter Folge verwendet werden dürfen, da es sonst zu einer Ausfällung von karzinogen wirkendem Parachloranilin kommt [45, 55]. CHX wirkt zwar, ebenso wie NaOCl, zytotoxisch auf humane Zellen, führt aber bei versehentlichem periapikalem Überpressen zu weniger Komplikationen und Schmerzen [49], weshalb es sich besonders gut bei offenen Apices, Wurzelperforationen und Wurzelresorptionen als Spüllösung eignet [45].

2.4.3 Natriumhypochlorit

Natriumhypochlorit ist die gängigste endodontische Spüllösung [55, 76, 77]. Es löst sowohl vitales, als auch avitales Gewebe auf und ist gegenüber einer Vielzahl der im Wurzelkanal befindlichen Bakterien wirksam [55, 121]. Die empfohlene Konzentration in der endodontischen Anwendung liegt zwischen 1,0 und 5,25% [127] bei einem pH Wert von über 11 [121]. Für eine ausreichende Desinfektionswirkung von NaOCl ist das regelmäßige Erneuern und in Bewegung halten der Spülflüssigkeit wichtig [49, 55].

Vor allem bei hohen Konzentrationen und langer Einwirkzeit ist die gewebsauflösende und desinfizierende Wirkung der Spüllösung besonders effizient. Als Nebeneffekt wurde dabei jedoch eine Beeinflussung der Mikrostrukturen des Dentins nachgewiesen. Ein Review untersuchte 30 Artikel zu dem Thema und verglich die aktuelle Studienlage. Obwohl die Mehrzahl der Studien über eine Herabsetzung der mechanischen Eigenschaften des Dentins berichteten, stellten vier Studien keinen signifikanten Effekt fest. Weitere Studien dazu seien deshalb erforderlich. [101]

Der Einfluss von NaOCl auf die Haftwerte von Adhäsivsystemen wurde in einer Reihe von Studien untersucht. Ein Review, welches Studien von 1980 bis 2016 verglich, kam zu dem Schluss, dass die Anwendung von NaOCl die Haftwerte in Abhängigkeit vom Adhäsivsystem sowohl verbessern, als auch verschlechtern oder unbeeinflusst lassen kann [77].

2.4.4 Wasserstoffperoxid

Wasserstoffperoxid wird in 3-5%iger Konzentration zum Bleichen von Zähnen oder zur Wurzelkanalspülung eingesetzt. Es hat eine geringere antibakterielle Wirkung als NaOCl und wird zur Spülung des Wurzelkanals heute nicht mehr empfohlen. [55] Grund hierfür ist das Risiko von postoperativen Beschwerden infolge des entstehenden Sauerstoffs und der Gefahr einer Emphysembildung [60]. Zudem wird die antibakterielle Wirkung von H₂O₂ als nicht ausreichend, die Kombination mit Ethylendiamintetraacetat sogar als möglicherweise schädlich eingestuft [85].

2.4.5 Ethylendiamintetraacetat

Ethylendiamintetraacetat gehört wie Zitronensäure zur Gruppe der Chelatoren. Es handelt sich dabei um Komplexbildner, welche durch die Bindung an Kalziumionen des Dentins dieses erweichen, kalzifizierte Bereiche auflösen und die präparationsbedingte

Schmierschicht zersetzen. [55, 121] Die verwendete Konzentration von EDTA als Spüllösung reichen in der Regel von 15 bis 17 %, wobei Studien zufolge selbst eine Konzentration von 1 % zur Auflösung der Schmierschicht ausreichend wäre [49]. Neben der Anwendung als Abschlusspülung werden EDTA-haltige Gele als Gleitmittel während der Aufbereitung verwendet, um Instrumentenfrakturen vorzubeugen, sowie obliterierte Kanäle besser gängig zu machen [55]. EDTA weist nur eine geringe antibakterielle und zudem keine gewebsauflösende Wirkung auf [49, 121].

2.4.6 Zitronensäure

Zitronensäure gehört wie EDTA zu den Chelatoren und wird ebenfalls zur Entfernung anorganischer Dentinbestandteile und der Schmierschicht verwendet [99, 121]. Studien zufolge ist die auflösende Wirkung auf die Schmierschicht bei 10-prozentiger Zitronensäure ähnlich der von 17-prozentiger EDTA Lösung [53, 69].

2.5 Die Schmierschicht

Als Folge der mechanischen Bearbeitung der Wurzelkanalwände entsteht eine 1-3 µm starke Schicht aus anorganischen und organischen Bestandteilen, nekrotischem Gewebe, Bakterien sowie Odontoblastenfortsätzen [88, 120]. Die Anwesenheit einer organischen Schicht auf der Oberfläche angeschnittener Zähne wurde bereits länger vermutet, aber erst 1970 konnten Eick et al. diese mit Hilfe eines Elektronenmikroskops darstellen [36]. Diese Schicht wurde 1975 von McComb und Smith im Zusammenhang mit aufbereiteten Wurzelkanälen erstmals als *Smear layer* erwähnt [72]. Mader et al. fanden 1984 heraus, dass sich die Schmierschicht nicht nur auf der Oberfläche des Dentins befindet, sondern bis zu 40 µm in die Tiefe der Dentintubuli eindringt [70].

Die Frage, ob die Schmierschicht vor der Wurzelkanalfüllung entfernt werden sollte, wird kontrovers diskutiert. Während manche Studien zu dem Schluss kamen, dass das Vorhandensein einer Schmierschicht die Kolonisierung der Bakterien hemmt und die Dentintubuli vor Eindringen von Mikroorganismen schützt [34, 67, 89], empfahlen andere die Entfernung der Schmierschicht vor der Wurzelkanalfüllung [90]. Begründet wurde dies damit, dass durch die Anwesenheit einer Schmierschicht die desinfizierende Wirkung der Spüllösungen verzögere [83] und die Penetrationstiefe und damit Haftung der Wurzelkanalfüllung am Dentin vermindert würde [42, 43, 122].

Da sich die Schmierschicht sowohl aus organischen, als auch anorganischen Bestandteilen zusammensetzt, wird zur Entfernung eine Kombination von Spülflüssigkeiten benötigt. Als besonders effektiv hat sich die Kombination aus 17-prozentiger EDTA-Lösung zur Entfernung der anorganischen Bestandteile und 5,25-prozentiger NaOCl-Lösung zur Entfernung der organischen Bestandteile erwiesen. [126] Als alternativer Chelatbildner zur Entfernung der anorganischen Bestandteile dient Zitronensäure in einer Konzentration von 10 %. [69] Weiterhin geeignet zur Entfernung der Schmierschicht sind Maleinsäure, MTAD und *Tetraclean*. Bei MTAD und *Tetraclean* handelt es sich um zusammengesetzte Spüllösungen bestehend aus einem Antibiotikum, Säure und einem Detergens. [78]

2.6 Wurzelkanalfüllung

An die Aufbereitung und Desinfektion des Wurzelkanalsystems schließt sich nach erfolgreicher Trocknung die Wurzelkanalfüllung an. Ziel der Wurzelkanalfüllung ist es, den Kanal dauerhaft dicht zu verschließen, die Substratzufuhr für verbliebene Mikroorganismen zu unterbinden und ein Eindringen von weiteren Mikroorganismen und Flüssigkeit zu verhindern [12, 51, 74, 97, 121].

Ob dabei die Füllung direkt im Anschluss an die Aufbereitung stattfinden sollte, oder die Behandlung zweizeitig, mit zwischenzeitlicher medikamentöser Einlage durchgeführt werden sollte, ist umstritten und abhängig von der zuvor gestellten Diagnose. Befürwortet wird häufig, beim Vorliegen einer nekrotischen Pulpa ein zweizeitiges Vorgehen zu wählen. Bei irreversibler Pulpitis hingegen wird meist ein einzeitiges Vorgehen präferiert, um das Eindringen von Mikroorganismen, zum Beispiel über eine undichte koronale Deckfüllung, zu vermeiden. [14] Laut eines Cochrane Systematic Reviews aus 2016, welcher 25 Studien mit insgesamt 3780 Patienten verglich, lasse sich allerdings weder für das einzeitige, noch für das zweizeitige Behandlungsschema eine evidenzbasierte Empfehlung aussprechen [71].

Trotz der heute über 100 bekannten Fülltechniken haben sich im klinischen Alltag nur wenige von ihnen bewährt und durchgesetzt. Bezogen auf die Anwendung von Gutta-percha unterscheidet man zwischen Kalt- und Warmfülltechniken.

Zu den Kaltfülltechniken gehören die Single-Cone-Technik, die Non-Compaction-Technik und die laterale Kondensation.

Die *Thermafil-Technik*, die vertikale warme Kondensation und das thermoplastische Injektionsverfahren sind Vertreter der Warmfülltechnik.

Eine Studie zum Vergleich der Bakteriendichtigkeit verschiedener Obturationstechniken kam zu dem Schluss, dass neben der als Goldstandard [74] bekannten lateralen Kondensation die *Thermafil-Technik* eine geeignete Methode darstellt, Wurzelkanäle bakterien dicht zu verschließen [105].

2.7 Wurzelkanalfüllmaterialien

Die Dentalindustrie bietet heute eine Fülle verschiedener Materialien und Techniken zur Füllung des Wurzelkanalsystems an. Am weitesten verbreitet und erfolgreichsten verwendet ist die Kombination aus einem plastischen Kernmaterial wie Guttapercha und einer erhärtenden Füllpaste, welche Sealer genannt wird [80].

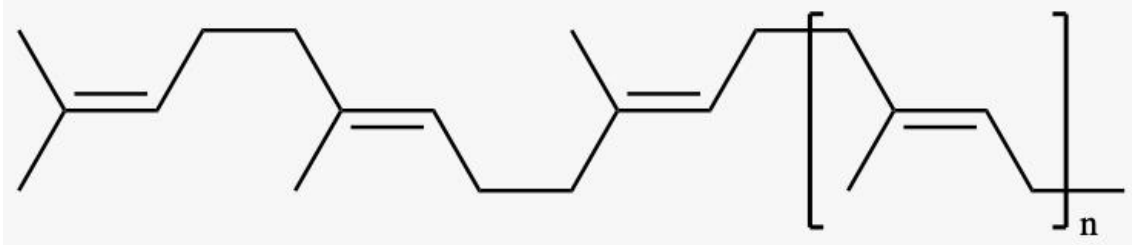


Abbildung 1 *cis*-1,4-Polyisopren - Summenformel Guttapercha

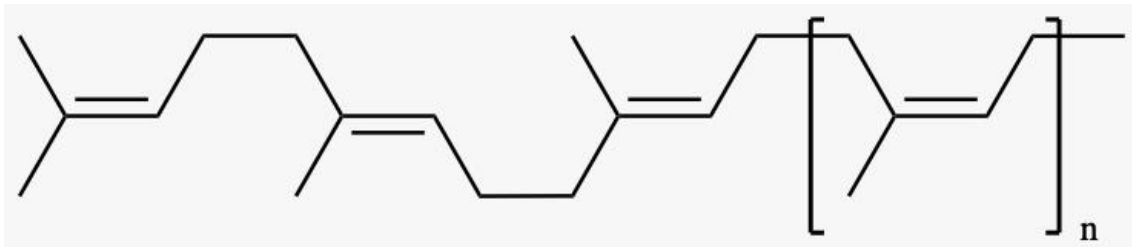


Abbildung 2 *trans*-1,4-Polyisopren - Summenformel Guttapercha

Die Eigenschaften, welche das Wurzelfüllmaterial, sowohl Sealer als auch Kernmaterial aufweisen sollen, wurden unter anderem von Nicholson und Czarnecka 2016 beschrieben: [80]

- Biokompatibilität im Wurzelkanal und periapikal
- Dimensionsstabil
- Bakteriostatisch
- Radioopak
- Sofern notwendig einfach zu entfernen
- Nicht durch Gewebsflüssigkeiten löslich
- Keine färbende Wirkung auf Zähne und Gingiva
- Einfache Handhabung unter klinischen Bedingungen
- Gute Anpassung an die Kanalkonfiguration und Sicherstellung sowohl des apikalen, als auch lateralen Verschlusses.

Tabelle 1 - Wurzelfüllmaterialien in der Übersicht [51, 121]

KERNMATERIALIEN	Goldstifte Guttaperchastifte Kunststoffstifte Silberstifte Titanstifte
SEALER	Biokeramische Sealer Sealer auf Basis adhäsiver Materialien Sealer auf Epoxidharz-Basis Sealer auf Glasionomerezement-Basis Sealer auf Kalziumhydroxid-Basis Sealer auf Polydimethylsiloxan-Basis Sealer auf Polyketon-Basis Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis

2.7.1 Biokeramische Sealer

Biokeramische Sealer sind Wurzelfüllpasten auf Basis von Kalziumsilikaten wie Tri- oder Dikalziumsilikaten oder Zirkonoxid [58]. Das aus hochreinem, modifiziertem Portlandzement bestehende Mineraltrioxidaggregat (MTA) war das erste Material dieser Gruppe, welches in der Endodontie zur Anwendung kam [124]. Bereits 1993 wurde MTA durch eine Arbeitsgruppe um Torabinejad in einer Studie zur Füllung der Wurzelspitze mit Super EBA und Amalgam verglichen. Dabei zeigte sich im Farbstoffpenetrationstest eine gegenüber den anderen Materialien verringerte Durchlässigkeit. [118]

Aufgrund der schwierigen Handhabung von MTA und der vor allem im Frontzahnbereich ungünstigen färbenden Wirkung durch das enthaltene Bismutoxid, wurde es lange Zeit vor allem zur Perforationsdeckung, direkten Überkappung und für retrograde Wurzelfüllungen nach Wurzelspitzenresektion verwendet. Das seit 2002 erhältliche, Bismutfreie, weiße MTA ermöglicht heute den Einsatz auch für anterograde Wurzelfüllungen im Frontzahnggebiet, vor allem im Rahmen von Apexifikation und Revaskularisation nach einem Frontzahntrauma. [124]

Der Sealer *iRoot SP* wurde 2007 als erster gebrauchsfertig angemischter, biokeramischer Sealer vorgestellt. 2008 folgten *EndoSequence* und *TotalFill*. Diese beiden Sealer sind seit 2013 auf dem deutschen Markt erhältlich. [124]

Biokeramische Sealer weisen eine Reihe positiver Eigenschaften auf, welche Gegenstand vieler Studien sind. Unter anderem die hohe Biokompatibilität wurde vielfach bewiesen [18, 91, 130]. Biokompatibel bedeutet, dass die Materialien in Kontakt mit Gewebe keine ungewollten Reaktionen wie Allergien, Irritationen oder Entzündungen auslösen. Sie wirken weder toxisch, noch haben sie ein kanzerogenes Potential. [1] Die Biokompatibilität wird dabei dem Inhaltsstoff Kalziumphosphat zugeschrieben. Dieser ist als natürlicher Bestandteil von Zahn und Knochen in der Lage, offene apikale Foramina zu verschließen und die Knochenregeneration zu fördern. [1, 56]

Häufig werden die biokeramischen Sealer zudem als bioaktive Sealer bezeichnet. Bioaktiv bedeutet in diesem Kontext, dass es zu einer Reaktion zwischen Sealer und umgebenden Gewebe kommt [52, 102]. Nachgewiesen wurde in diesem Zusammenhang, dass die Oberfläche der Sealer sich positiv auf Mineralisation und Differenzierung

humaner Pulpazellen und osteoblastenähnlicher Zellen auswirken kann [129, 131]. Zudem kommt es zur Ausfällung von Hydroxylapatitstrukturen auf der Dentinoberfläche [96].

Eine weitere positive Eigenschaft bioaktiver Sealer ist der gute antibakterielle Effekt durch den vergleichsweise hohen pH Wert, welcher auch nach dem Abbinden im alkalischen Bereich bleibt [92, 124, 132]. Die antibakterielle Wirkung von Sealern wie *iRoot SP*, *BioRoot RCS* und *EndoSequence BC Sealer* hält auch nach Tagen bis Wochen noch an. Es besteht unter anderem eine sehr gute Wirkung gegen Bakterien wie *E. faecalis* [3, 13, 128], welche häufig im Rahmen von Reinfektionen des Wurzelkanals vorkommenden [111, 112].

2.7.1.1 *Well-Root ST*

Well-Root ST ist ein neuer biokeramischer Sealer der Firma Vericom (Südkorea). Der vorgemischte, gebrauchsfertige Sealer enthält Kalziumsilikat, Calcium-Natrium-Phosphosylicate, Zirkonoxid, Titanoxid und Kalziumhydroxid-Füllstoffe [65]. Der hydrophile Sealer benötigt zum Aushärten Feuchtigkeit und braucht dazu laut Herstellerangaben bis zu 2,5 Stunden. Als Vorteil dieses Sealers wird seine hohe Biokompatibilität, eine starke antibakterielle Wirkung und eine geringe Expansion von 0,05 % beworben.

Zu dem bioaktiven Sealer liegen bislang nur wenige Studien vor. Nachgewiesen wurde eine gute angiogenetische Wirkung, weshalb *Well-Root ST* als Alternative zu bereits gängigen biokeramischen Sealern wie *ProRoot MTA* und *Biodentine* empfohlen wird [82].

Eine *In-vitro*-Studie aus dem Jahr 2019 verglich die Eigenschaften drei verschiedener biokeramischer Sealer, darunter auch *Well-Root ST* mit jenen Epoxidharz-basierter Sealer wie *AH Plus*. In Vergleich zum Epoxidharz-basierten Sealer *AH Plus* wurde bei den biokeramischen Sealern eine höhere Biokompatibilität und geringere Zytotoxizität festgestellt. Für die Versuche wurden humane parodontale Stammzellen (hPDLSCs) genutzt. Die Zell-Überlebensfähigkeit dieser Stammzellen schnitt im Zusammenhang mit *AH Plus* signifikant schlechter ab, als im Zusammenhang mit den biokeramischen Sealern. Auch die Ausschüttung proinflammatorischer Zytokine, hier IL-6 und IL-8, welche entzündliche Prozesse initiieren und fördern war bei den mit *AH Plus* behandelten hPDLSCs signifikant höher. [65]

Aufgrund der wahrnehmbaren Zahnverfärbung ähnlich der durch *Dia-Proseal* oder *MTA Fill Apex* wird die vollständige Entfernung von *Well-Root ST* aus dem Pulpencaevum empfohlen [79].



Abbildung 3 - Wurzelkanalsealer *Well-Root ST*

2.7.2 Sealer auf Kalziumhydroxid-Basis

Den Sealern bestehend aus Kalziumhydroxid und Salicylat wird eine gute Biokompatibilität zugeschrieben [51, 58, 62]. Durch die Verwendung eines kalziumhydroxidhaltigen Präparates soll die Hartschubstanzbildung gefördert werden [50, 58]. Die hohe Löslichkeit kalziumhydroxidhaltiger Produkte kann langfristig die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllungen beeinträchtigen [51, 58]. Bekannter Vertreter dieser Gruppe ist der Sealer *Apexit*. Die Studienlage zu diesem Sealer ist inhomogen. Während einige Studien eine Löslichkeit ähnlich oder geringer der von *AH Plus* und anderen gängigen Sealern feststellten [37, 54, 75, 95], schnitt *Apexit* bei anderen Studien schlechter ab [27, 116].

2.7.3 Sealer auf Epoxidharz-Basis

Die Sealer dieser Kategorie gehören zu den am häufigsten verwendeten und am besten untersuchten Sealern. Aufgrund der Dimensionsstabilität, geringen Löslichkeit und guten Abdichtungswirkung gelten sie als Goldstandard [58, 123]. Bekannter Vertreter dieser Gruppe ist das Präparat *AH Plus*, welches in viele Studien als Referenzmaterial verwendet wird [25, 94].

Der Vorgänger von *AH Plus*, *AH 26* setzt bei der Abbindung durch Polykondensation zytotoxisch wirkendes Formaldehyd frei. Aufgrund der zytotoxischen Wirkung wird dieser Sealer heute nicht mehr verwendet. [7] Durch die geänderte Abbindereaktion in eine Polyaddition setzt der Nachfolger *AH Plus* mit 3,9ppm dagegen nur noch sehr geringe Mengen Formaldehyd frei [22, 38].

2.7.4 Sealer auf Glasionomerezement-Basis

Zu dieser Gruppe der Füllpasten zählen unter anderem die Produkte *Ketac-Endo* und *Active GP Sealer*.

Diese Sealer härten über eine Säure-Base Reaktion aus und gehen eine chemische Verbindung zum Wurzelentin ein [58].

Die Studienlage zum Abdichtungsverhalten Glasionomerezement-basierter Sealer ist heterogen. Teilweise wird ein schlechteres Abdichtungsverhalten in Vergleich zu anderen Wurzelfüllpasten beschrieben [84]. Andere Studien bescheinigen ein mit den marktüblichen Sealern vergleichbares Verhalten [98].

2.7.5 Sealer auf Basis adhäsiver Materialien

Ziel der kunststoffbasierten Füllmaterialien ist der adhäsive Verbund zwischen Zahnhartsubstanz und Füllungsmaterial durch die Entstehung eines sogenannten *Monoblocs* [114]. Das mehrzeitige Vorgehen mit Entfernung der Schmierschicht und Aufbringen eines Dentinadhäsivs, aber auch einzeitig durch Verwendung eines selbstadhäsiven Materials gestaltet sich aufgrund der Konfiguration des Wurzelkanalsystems oftmals kompliziert. Neben der komplizierten Applikation des adhäsiven Materials ist auch das Schrumpfungsverhalten der kunststoffbasierten Sealer von Nachteil. [51, 58, 114]

Zu den aktuell auf dem Markt erhältlichen selbstadhäsiven Sealern gehören die Präparate *MetaSEAL* und *Real Seal SE*. Einer Studie zufolge, welche die Haftwerte von *Real Seal SE* und *AH Plus* in Abhängigkeit verschiedener endodontischer Spüllösungen verglich, sind diese bei *Real Seal SE* signifikant geringer als bei *AH Plus*. Zudem ist der Einfluss der Spülflüssigkeiten auf die erreichten Haftwerte bei *Real Seal SE* deutlich größer. [109] Auch bezüglich des Abdichtungsvermögens schnitten die adhäsiven Sealer in Studien signifikant schlechter ab, als Epoxidharz-basierte Sealer wie *AH Plus* [38].

2.7.6 Sealer auf Polydimethylsiloxan-Basis

Die auf additionsvernetzten Silikonen basierten Füllpasten zeichnen sich durch eine gute Dichtigkeit bei geringer Löslichkeit aus [58].

Bekannter Vertreter dieser Gruppe ist *RoekoSeal Automix*. Das als Paste-Paste System gelieferte Material enthält keine sensibilisierenden oder mutagenen Inhaltsstoffe und ist gut revidierbar. In einer fünfwöchigen Studie, welche insgesamt acht gängige Sealer verglich, schnitt *RoekoSeal* bezogen auf die Zytotoxizität am besten ab. Als einziges getestetes Präparat hatte es über die komplette Testzeit keinen zytotoxischen Effekt. [103] Die Versiegelungsfähigkeit von *RoekoSeal* ist zudem höher als die des Guttapercha-basierten Sealers *GuttaFlow* und vergleichbar mit der von *AH 26* [86].

2.7.7 Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis

Zinkoxid-Eugenol basierte Produkte werden in der Zahnmedizin als provisorische Befestigungszemente, für Unterfüllungen beim Legen von Metall- oder Zementfüllungen und als Sealer in der Endodontie angewandt [51]. Bekannte Vertreter dieser Produktgruppe sind *Endomethasone N* und *HERMETIC*, welche als Pulver-Flüssigkeits-System geliefert werden. Die Füllpasten auf Zinkoxid-Eugenol-Basis sind bereits seit vielen Jahren in der klinischen Anwendung [51].

Da der im Sealer enthaltene Bestandteil Eugenol sowohl allergen und im Mandibularkanal neurotoxisch wirken kann, als auch den Erfolg adhäsiver Deckfüllungen einschränkt, wird dieses Material zur definitiven Füllung heute seltener verwendet [58]. *Endomethasone N* wirkt zudem zytotoxisch, allerdings in geringerem Ausmaß als der Epoxidharz-basierte Sealer *AH 26* [7, 103].

2.7.8 Kernmaterialien

Als Kernmaterialien für die Wurzelkanalfüllung werden neben dem weit verbreiteten Guttapercha auch Silber-, Titan-, Gold- und Kunststoffstifte angeboten. Nachteil dieser festen Kernmaterialien ist neben der Korrosion der Silberstifte die schlechte Entfernbarkeit im Falle einer Revision und die fehlende Komprimierbarkeit. Die Komprimierbarkeit wird allerdings benötigt, da hierdurch die Abbindeschumpfung des Sealers kompensiert werden soll. [51]

In der Endodontie haben sich die halbfesten Guttapercha-Stifte als Kernmaterialien durchgesetzt. Neben ihrer guten Biokompatibilität lassen sich diese gut kondensieren,

sind thermoplastisch verformbar und besser entfernbar [51]. Während für die Kaltfülltechniken Guttapercha in der beta-Phase verwendet wird, wird für thermoplastische Obturationstechniken die alpha-Phase genutzt. Durch Erhitzen und Erkalten lassen sich beide Phasen ineinander überführen, wobei bei starker Erwärmung auf die damit einhergehende Schrumpfung nach Abkühlung Rücksicht genommen werden sollte. [51, 66] Da durch Guttapercha alleine keine suffiziente Abdichtung des Wurzelkanals erreicht werden kann, wird die Verwendung in Kombination mit einem Sealer empfohlen [125].

3 Problemstellung

Da die verschiedenen Spüllösungen unterschiedlich auf das Wurzelkanalentin wirken, erscheint es logisch, dass auch die Haftwerte in Abhängigkeit der Spüllösungen variieren. Dieser Aspekt wurde bereits für verschiedene Sealer, wie Epoxidharz-basierte und Calciumsalicylat-basierte Sealer, sowie Sealer auf Basis adhäsiver Materialien untersucht und bestätigt [29, 33, 108].

Mit der vorliegenden Studie sollte untersucht werden, welchen Einfluss verschiedene endodontische Spüllösungen auf die Haftwerte des Wurzelkanalsealers *Well-Root ST* zum Wurzelkanalentin haben.

Folgende Arbeitshypothesen sollten dabei überprüft werden:

1. Arbeitshypothese:

Unterschiedliche Spülungen führen zu unterschiedlichen Haftwerten.

2. Arbeitshypothese:

Die Anwendung von Chelatoren zur Entfernung der Schmierschicht führt zu schlechteren Haftwerten.

4 Material und Methoden

4.1 Übersicht Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Auswahl der Probenzähne	60 extrahierte, humane Zähne Visuelle und röntgenologische Kontrolle auf Kariesfreiheit, Wurzelwachstum, Wurzelanatomie, erfolgte endodontische Behandlung
Vorbereitung der Probenzähne	Säuberung der Zähne und Dekapitierung auf 9mm Länge Maschinelle Aufbereitung mit F360 und BioRaCe
Spreadervorbereitung	Einpassen auf Arbeitslänge Abstrahlen mit Korund und Entfetten mit Ethanol 70%
Probenherstellung	Spülung mit der zugeordneten Spülflüssigkeit (Gruppe 1-6) Kanalrocknung mit Papierspitzen Einbringen von Well-Root ST® und Spreaderinsertion
Probenlagerung	Bei 37° in einem luftdicht verschlossenen Gefäß für 4 Wochen
Pullout Versuch	Zwick Universalprüfmaschine 1120
Statistische Auswertung	SPSS 21 mittels ANOVA- und Gabriel-Test
Spreaderanalyse	Auswertung der Frakturmodi

4.2 Auswahl, Vorbereitung und Bearbeitung der Probenzähne

Für die Versuchsdurchführung wurden 60 humane, kariesfreie Zähne mit geraden, schmalen Kanälen ausgewählt. Die Zähne wurden nach der Extraktion zur Desinfektion und Erhalt der Feuchtigkeit in 0,001 % Natriumacidlösung aufbewahrt.

Die erste, visuelle Auswahl erfolgte anhand der Kriterien Wurzellänge, abgeschlossenes Wurzelwachstum, Kariesfreiheit im Wurzelbereich, gerader Wurzelverlauf und fehlende Zeichen einer vorangegangenen endodontischen Behandlung.

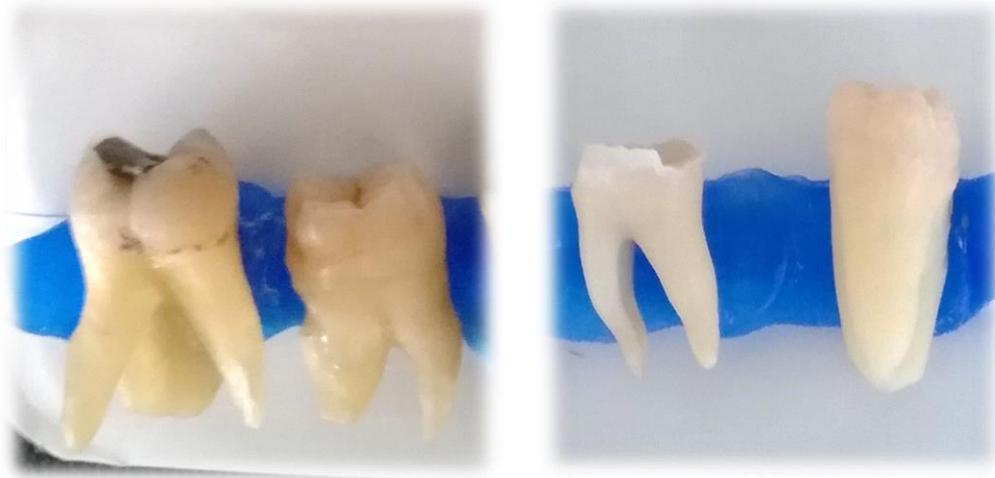


Abbildung 4 - Vorbereitung der gesäuberten Zähne zum Röntgen - Befestigung mit Wachs auf der Speicherscheibe

Nach Säuberung der Zähne mittels Scaler (Hu-Friedy), Skalpell (B.Braun) und Bürstchen wurden diese geröntgt um Verlauf und Größe der Wurzelkanäle zu bestimmen. Bei Erfüllen der Kriterien wurden die Zähne anschließend auf eine Länge von circa 9 mm dekaptiert. Dazu wurde unter Wasserkühlung mittels eines grobkörnigen Diamanten und rotem Winkelstück die Zahnkrone abgetrennt. Anschließend wurde die Schnittfläche plan geschliffen, um einen korrekten Ansatzpunkt zum Widerlages in der *Zwick-Universalprüfmaschine* zu erreichen.

Die Wurzelkanalaufbereitung erfolgte maschinell mit dem *F360-System* und dem *Endo-Piloten*. Zur Überprüfung der Gängigkeit wurde eine *C-Pilot-Feile* ISO 15 (VDW) verwendet. Die Aufbereitung auf 8 mm Arbeitslänge (AL) erfolgte anschließend mit den *F360-Feilen* in aufsteigender Reihenfolge 25, 35 und 45, wobei aufgrund der 4-prozentigen

Konzität die 45er Feile nur bis 7,5 mm eingesetzt wurde. Abschließend wurde mit der *BioRaCe* Feile BR7 (ISO 60) auf AL aufbereitet. Während der Aufbereitung wurde zwischen den einzelnen Feilen mit einer *C-Pilot*-Feile ISO 15 rekapituliert und mit Aqua dest. gespült. Zur Kontrolle der Aufbereitung und korrekten AL wurden mit Hilfe der Spreader Messaufnahmen gemacht und diese mit der *DBSWIN Software* ausgemessen. Nach abschließender Kontrolle der AL wurden die Zähne bis zum nächsten Versuchsschritt in Eppendorf Reaktionsgefäßen mit in 0,001-prozentigen Natriumacidlösung getränkten Schaumstoffpellets luftdicht verschlossen gelagert.

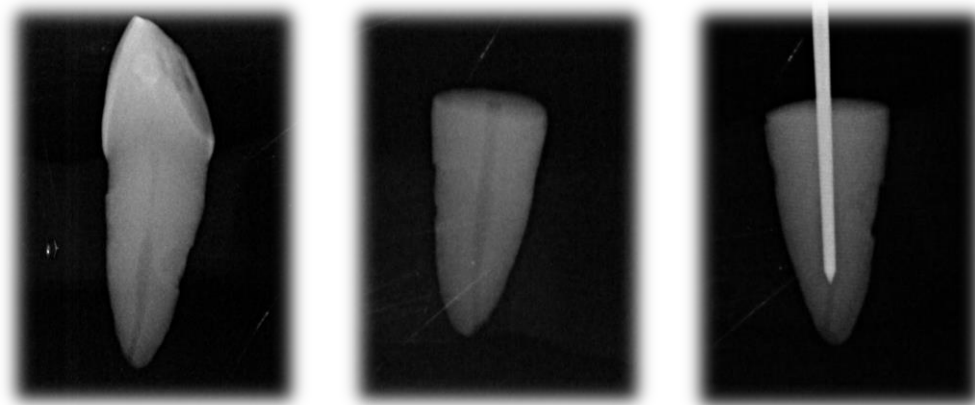


Abbildung 5 - Röntgenaufnahme vor Aufbereitung und Dekapitation, Kontrolle nach Aufbereitung mit und ohne Spreader

4.3 Vorbereitung der Spreader

Zur Wurzelfüllung wurden Stahlspreader ISO 60 (Firma Komet Dental) verwendet. Die Spreader wurden vor abschließendem Einbringen in den Wurzelkanal mittels Korundstrahlung von Rückständen befreit und mit 70% Ethanol entfettet.

4.4 Wurzelkanalspülung und Spreaderinsertion

Die Abschlusspülung erfolgte anhand der zuvor randomisiert eingeteilten Gruppen 1-6 mit den Spülflüssigkeiten Aqua dest., EDTA 17 %, Zitronensäure 40 %, Ethanol 95 %, NaOCl 5,25 % und CHX 2 %. Pro Zahn wurde über 1 min mit jeweils 3 ml der entsprechenden Spülflüssigkeit unter Verwendung einer Einmalspritze mit Endo-Kanüle (*Endoneedle Dr. J. Buquet*) unter kontinuierlicher Auf- und Ab-Bewegung im Kanal gespült.

Die Kanaltrocknung erfolgte mittels Papierspitzen der Größen ISO 60 und 40 (Pluradent), ohne die Kanäle dabei zu übertrocknen, da der zu untersuchende Sealer *Well-Root ST* zum Aushärten eine gewisse Restfeuchte benötigt.

Der Sealer *Well-Root ST* wurde mit Hilfe von Papierspitzen in den Kanal eingebracht. Anschließend wurde der Spreader mit Sealer beschickt und auf eine Länge von 8mm in den Kanal inseriert. Das Einbringen des Spreaders erfolgte auf einer Waage, um zu kontrollieren, dass bei allen Proben eine Kraft von ungefähr 2N angewendet wurde.

Die Proben wurden für 4 Wochen bei 37 °C in verschlossenen *Eppendorf*-Reaktionsgefäßen gelagert. Zum Schutz vor Austrocknung wurden die Zähne mit in künstlichem Speichel getränkten Gazestreifen umwickelt.

4.5 Messreihe

Zur Durchführung des Pullout-Versuchs wurde die *Zwick 1120*-Universalprüfmaschine mit folgenden Einstellungen verwendet:

Tabelle 2 - Einstellungen Universalprüfmaschine

Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min
Obere Kraftgrenze	50 N
Messlänge Standardweg	50 mm
Rücklaufgeschwindigkeit	300 mm/min
Kraftabschaltschwelle	keine
Kraftschwelle für Bruchuntersuchung	0,1% F_{nom}

Der aus dem Zahn herauschauende Teil des Spreaders wurde in das in der Universaltestmaschine eingebaute Bohrfutter eingespannt. Nach visueller Kontrolle der korrekten Position der Proben in der Prüfvorrichtung wurden die Spreader gegen einen waagerechten Widerstand herausgezogen. Dabei wurde die entlang der Zahn längsachse wirkende Zugkraft gemessen, welche zum Herausziehen des Spreaders benötigt wurde. Parallel dazu wurde für jede Probe ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgezeichnet.

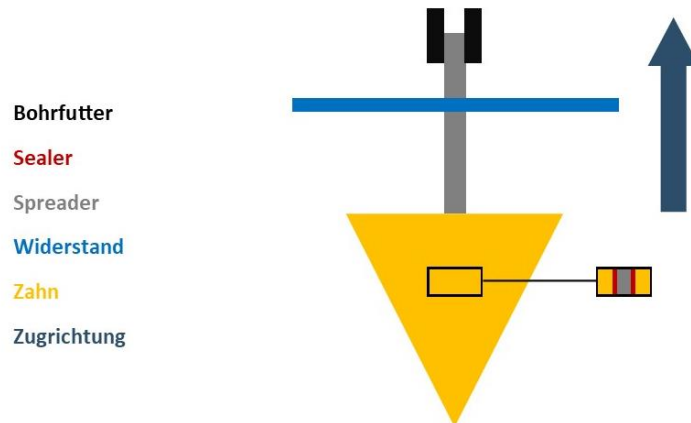


Abbildung 6 - Schema Prüfvorrichtung

4.6 Analyse der Frakturmodi

Zur Analyse der Frakturmodi wurden die Spreader anschließend von jeweils zwei Seiten fotografiert. Dazu wurden sie mit der sauberen Seite in einem Kunststoffblock fixiert und mit einer digitalen Spiegelreflexkamera (*Canon EOS 500D* mit *Canon MP-E 65 mm*) fotografiert. Im Rahmen der Auswertung der Frakturmodi wurden folgende Frakturmodi unterschieden:

- A:** Adhäsives Versagen am Zahn: unregelmäßige, dicke Sealerschicht am Spreader
- B:** Adhäsives Versagen am Spreader: glatter Spreader
- C:** Kohäsives Versagen im Sealer: am Spreader eine matte, dünne und überwiegend homogene Sealerschicht
- D:** Gemischter Bruch: Vorliegen von mindestens zwei Frakturmodi



Abbildung 7 - Übersicht Frakturmodi A, B, C

Die beiden Frakturmodi Zahn- beziehungsweise Spreaderfraktur wurden nicht berücksichtigt, da diese im Versuch nicht vorkamen. Der Modus Zahnfraktur würde einen Bruch innerhalb der Zahnhartsubstanz bedeuten. Bei einer Spreaderfraktur würde der Stahlspreeder in sich brechen.



Abbildung 8 - Beispielhafte Darstellung der Frakturmodi: adhäsiver Bruch zum Dentin, gemischter Bruch, kohäsiver Bruch

4.7 Statistische Analyse

Die statistische Analyse der Messergebnisse erfolgte computergestützt. Genutzt wurde das Programm *SPSS* (IBM). Bei der explorativen Analyse wurde der Shapiro-Wilk-Test zur Untersuchung auf Normalverteilung verwendet. Für die parametrische Analyse wurden die ANOVA, der Levene- und der Gabriel-Test verwendet. Für das Signifikanzniveau wurde der Wert $\alpha=0,05$ angenommen.

Die Korrelationsanalyse wurde mittels Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Hierbei wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson angewendet.

5 Ergebnisse

5.1 Statistische Auswertung

Die im Pull-Out-Verfahren ermittelten Haftwerte wurden computerunterstützt ausgewertet. Die statistische Auswertung der gewonnenen Daten wurde mit Hilfe des Programmes *SPSS* (IBM) durchgeführt. Mit den MPa-Werten erfolgte die explorative Analyse.

Da die Normalverteilung Grundvoraussetzung für die zuverlässige Anwendung parametrischer Tests ist, wurde diese als erstes untersucht. Für die Normalverteilungsanalyse wurde der Shapiro-Wilk Test genutzt. Dieser zeigte eine Normalverteilung in allen Gruppen, außer der Zitronensäure-Gruppe, wo der p-Wert mit 0,023 unterhalb von 0,05 lag und somit signifikant war. Anders als beispielsweise der D'Agostino-Test weist der Shapiro-Wilk Test auch bei geringem Stichprobenumfang $n > 50$ eine hohe Teststärke auf und ist deshalb für die hier vorliegende Probenanzahl gut geeignet.

Tabelle 3 - Explorative Daten und Normalverteilungsanalyse

Spüllösung	MW	SD	Media	Min	Max	IQ	p-Wert
Aqua dest.	5,85	1,66	5,74	2,43	8,20	2,01	0,715
CHX	6,00	1,19	5,59	4,27	8,35	1,62	0,666
EDTA	4,68	2,25	4,70	1,64	8,12	3,75	0,630
Ethanol	8,07	1,75	8,61	4,39	10,61	1,89	0,508
NaOCl	5,67	1,79	5,66	2,68	9,04	2,03	0,852
Zitronensäure	2,89	1,16	2,23	1,67	4,66	2,17	0,023*

MW = Mittelwert, SD= standard deviation (Standardabweichung), IQ= Interquartilbereich

Da die ANOVA (Analysis of Variance) in *SPSS* (IBM) in Hinblick auf nicht vorhandene Normalverteilung relativ robust ist und bis auf die Zitronensäure-Gruppe alle Gruppen normalverteilt waren, wurden parametrische Tests durchgeführt. Bei der parametrischen Analyse wurde die ANOVA zur Berechnung von mehr als 2 Paaren durchgeführt. Heraus kamen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen: ANOVA, $p < 0,001$.

Da mittels der Varianzanalyse nur festgestellt wurde, dass innerhalb in der Gruppe von Mittelwerten signifikante Unterschiede gab, nicht aber welche Mittelwerte sich signifikant voneinander unterscheiden, wurde nachfolgend ein Post-hoc-Test durchgeführt. Hierfür wurde der Gabriel-Test als Post-hoc-Test verwendet. Dieser konnte angewandt

Ergebnisse

werden, da der Levene-Test mit $p=0,417$ nicht signifikant war und somit Varianzhomogenität vorlag.

Der Gabriel Test ergab signifikante Unterschiede der Haftwerte zwischen Ethanol und EDTA ($p=0,001$) sowie Ethanol und NaOCl ($p=0,003$). Zudem lagen signifikante Unterschiede der Haftwerte zwischen Zitronensäure und allen anderen Gruppen mit Ausnahme von EDTA vor.

Tabelle 4 - Paarweise Analyse mittels parametrischem Post-hoc-Test nach Gabriel (* = signifikanter p-Wert)

	Aqua dest.	CHX	EDTA	Ethanol	NaOCl	Zitronensäure
Aqua dest.		$p=1,000$	$p=0,841$	$p=0,064$	$p=1,000$	$p=0,003^*$
CHX	$p=1,000$		$p=0,698$	$p=0,110$	$p=1,000$	$p=0,002^*$
EDTA	$p=0,841$	$p=0,698$		$p=0,001^*$	$p=0,974$	$p=0,254$
Ethanol	$p=0,064$	$p=0,110$	$p=0,001^*$		$p=0,003^*$	$p<0,001^*$
NaOCl	$p=1,000$	$p=1,000$	$p=0,947$	$p=0,003^*$		$p=0,007^*$
Zitronensäure	$p=0,003^*$	$p=0,002^*$	$p=0,254$	$p<0,001^*$	$p=0,007^*$	

Das folgende Boxplot-Diagramm zeigt den Haftverbund von *Well Root ST* in Abhängigkeit der verschiedenen Spüllösungen in der Übersicht.

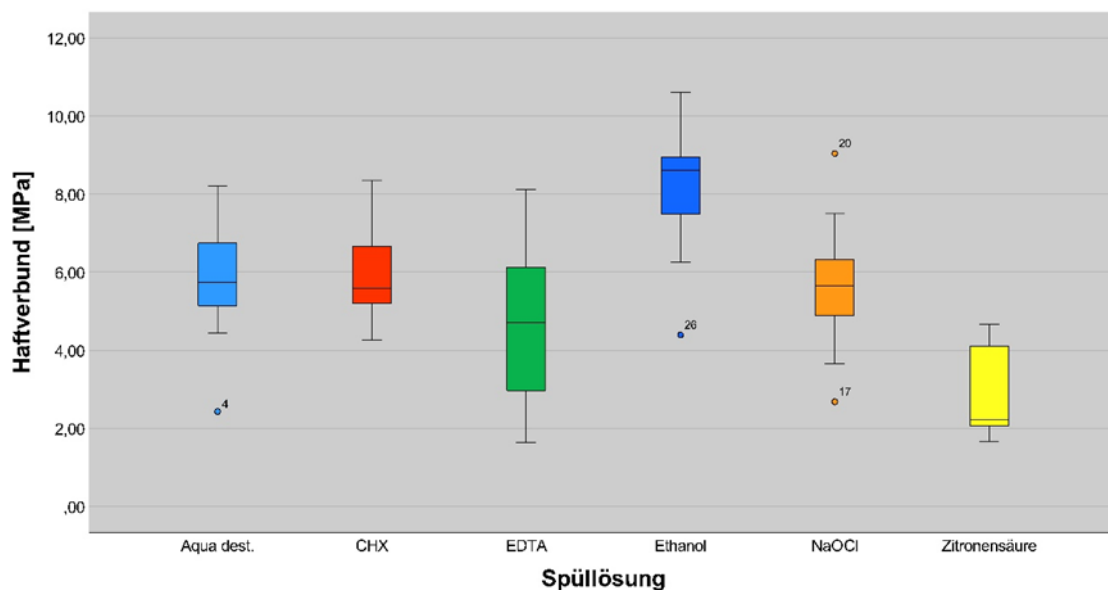


Abbildung 9 - Boxplot-Diagramm der Haftkraft von *Well Root ST* in Abhängigkeit von der Spüllösung

5.2 Frakturanalyse

Die Daten der Frakturanalyse wurden prozentual für jede Gruppe und Frakturmodus berechnet. Diese Ergebnisse werden in Tabelle 5 dargestellt. Abbildung 8 zeigt die Gesamtverteilung der Frakturmodi. Am häufigsten kamen gemischte Frakturmodi vor. Diese machten einen Anteil von 48 % aller Frakturmodi aus. Der zweithäufigste Frakturmodus war der kohäsive Bruch mit 33 % aller Frakturmodi. In Gruppe 6 wurde zu 100 % der Frakturmodus adhäsiv zum Dentin beobachtet. Der Frakturmodus adhäsiv zum Spreader kam nicht vor.

Tabelle 5 - Prozentuale Verteilung der Frakturmodi

Gruppe						
Frakturmodus	1	2	3	4	5	6
adhäsiv zum Dentin	10%	0%	0%	0%	0%	100%
adhäsiv zum Spreader	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Kohäsiv	10%	10%	50%	80%	50%	0%
Gemischt	80%	90%	50%	20%	50%	0%

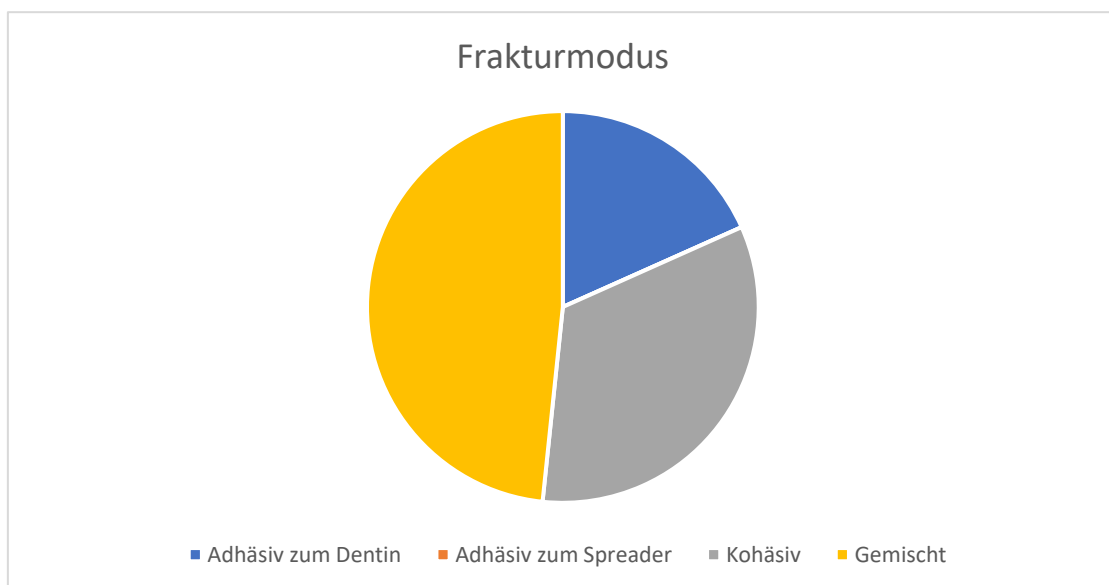


Abbildung 10 - Gesamtverteilung der Frakturmodi

Ergebnisse

Anschließend wurde der Chi-Quadrat- Test durchgeführt, welcher Auskunft über den Zusammenhang von zwei Variablen, hier dem Haftverbund und dem Frakturmodus liefert. Die Statistik ergab keine Korrelation des Frakturmodus mit dem Haftverbund da ein nicht-signifikanter p-Wert von 0,535 berechnet wurde. Demzufolge spielt der Frakturmodus für die Höhe des Haftverbunds keine signifikante Rolle.

6 Diskussion und Schlussfolgerung

6.1 Diskussion Material und Methoden

6.1.1 Probenauswahl und Lagerung

Für die Versuche wurden 60 extrahierte, kariesfreie humane Zähne ausgewählt. Die Vergleichbarkeit der Haftwerte von Adhäsivsystemen an humanen und tierischen Zähnen wurde in diversen Studien untersucht. Die Ergebnisse sind allerdings heterogen. So wurden teilweise signifikante Unterschiede bezüglich der Haftwerte festgestellt [40], in anderen Studien hingegen wurden Zähne tierischen Ursprungs, vor allem von Rindern, als geeignete Alternative zu humanen Zähnen benannt [8, 64]. Durch die Verwendung humaner Zähne wurde dieser uneinheitlichen Studienlage Rechnung getragen und die erzielten Ergebnisse lassen sich direkt auf die klinische Situation übertragen. Es konnten somit keine fehlerhaften Haftwerte generiert werden, die ihren Ursprung in der Verwendung tierischer Zähne anderer Zusammensetzung hatten.

Die Zähne wurden bis zum Versuchsbeginn in 0,001% Natriumacidlösung gelagert. Die Lagerung in Natriumacidlösung soll eine desinfizierende Wirkung haben und die Infektionsgefahr durch die Zähne herabsetzen. Studien zufolge haben Lagerungszeiten von bis zu sechs Monaten keinen signifikanten Einfluss auf die Haftwerte am Dentin [107].

Ein alternatives Lagerungsmedium mit ebenfalls desinfizierender Wirkung ist Formalin. Dieses besteht aus Formaldehyd, Methylalkohol und Natriumazetat. Wichtig ist, dass trotz der desinfizierenden Wirkung bei der Lagerung keine Austrocknung der Zähne begünstigt wird. Eine Studie verglich die Dentinfeuchtigkeit nach Lagerung für 2 Tage sowie 6 Monate in Natriumazetat beziehungsweise Formalin. Dabei wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der Feuchtigkeit nach Lagerung in den beiden Medien festgestellt. [61] Formalin wird, im Gegensatz zu Natriumazetat, auch als Fixiermittel genutzt. Durch die Fähigkeit von Formalin, Proteine zu denaturieren, ist allerdings nicht auszuschließen, dass sich dieses auch auf den Haftverbund auswirkt. Trotz seiner guten desinfizierenden Wirkung wird Formalin wegen der unterschiedlichen Ergebnisse zur Dentinhaftung deshalb nicht als Lagerungsmedium empfohlen [30].

Um eine Austrocknung der Zähne zu verhindern, wäre auch eine Lagerung in Kochsalzlösung, Wasser oder künstlichem Speichel möglich gewesen. Da diese aber keine

desinfizierende Wirkung haben, wurden sie als Lagerungsmedium abgelehnt, um die von den Zähnen ausgehende Infektionsgefahr zu verringern.

Da Zähne unterschiedlichen Alters verwendet wurden, können Veränderungen des Wurzelkambiums wie Tertiärkambiumbildung, Sklerosierung oder Verkalkungen das Ergebnis beeinflussen. Da die Verwendung altersidentischer Zähne in dieser Menge sehr schwer realisierbar war, wurde durch randomisierte Zuordnung der Zähne zu den Versuchsgruppen dieser Einflussfaktor reduziert.

Alle untersuchten Zähne wiesen einen geraden, gleichmäßigen Kanalverlauf auf. Dies war zum einen wichtig, um ein Verkeilen des Spreaders im Wurzelkanal zu verhindern, zum anderen, um eine möglichst gleichmäßige Sealerschichtstärke zu gewährleisten. Um dies zu kontrollieren, wurden die Zähne vor der Probenauswahl geröntgt. Faktoren wie ungleichmäßige Sealerschichtstärken oder ein Verkeilen des Spreaders in gekrümmten Kanälen, hätten beim Pull-Out Versuch zu einem Verfälschen der Haftwerte führen können. Durch die Auswahl geeigneter Zähne wurde versucht, diese Faktoren weitgehend auszuschließen. Dennoch hätte trotz dieser Maßnahmen zur Standardisierung eine exakt identische Sealerschichtstärke der verschiedenen Proben weder durch eine 3D-Analyse noch durch eine Röntgenaufnahme in zwei Ebenen wirklich vollständig gewährleistet werden können. Ein vorheriges Abmessen der Sealmenge wäre eine weitere Möglichkeit zur Standardisierung gewesen, allerdings aufgrund des Verpressens überschüssigen Sealers nach koronal und apikal entbehrlich. Wichtig war hier lediglich, dass nicht zu wenig Sealer verwendet wurde, um Fehlstellen in der Sealerschicht zu vermeiden. Die Standardisierung der Kraft beim Inserieren der Spreader sollte mit Hilfe einer Waage gewährleistet werden. Durch Einbringen der Spreader unter Kontrolle auf einer Waage wurde versucht, eine gleichmäßige Einbringkraft von ca. 2N zu gewährleisten. Allerdings wurde auch so nur eine annäherungsweise gleiche Kraft beim Einbringen der Spreader erreicht, höhere Einbringkräfte waren dennoch möglich. Durch einen veränderten Versuchsaufbau, welcher gegebenenfalls maschinell unterstützt eine reproduzierbare Kraft beim Inserieren der Spreader gewährleisten hätte, wäre eine bessere Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreichbar gewesen.

Nach Auswahl der Zähne wurden diese in luftdicht verschließbaren *Eppendorf*-Gefäßen gelagert, welche zum Erhalt der Feuchtigkeit in Aqua dest. getränktes

Schaumstoffpellet enthielten. Da dehydriertes Dentin häufiger zu Frakturen neigt [9], wurde dieser Einflussfaktor durch die feuchte Lagerung weitestgehend ausgeschlossen. Auch in der Mundhöhle befinden sich die Zähne in einer feuchten Umgebung. Anders als bei destilliertem Wasser enthält der Speichel allerdings eine Vielzahl an Mineralstoffen, Ionen und Proteinen. Durch eine Lagerung in Kunstspeichel, welche in diesem Versuch erst nach abgeschlossener Probenherstellung der Fall war, hätte die klinische Situation besser wiedergegeben werden können.

Die Probezahl von 60 Zähnen, 10 Zähne pro Versuchsgruppe, orientierte sich zum einen an der von Armstrong et al. 2017 empfohlenen Anzahl von mindestens 5, idealerweise 8-10 Proben pro Versuchsgruppe bei Versuchen zur Adhäsivtechnik [4], zum anderen an Studien zu endodontischen Sealern [2, 19]. Da bei der Probenauswahl das Kriterium Alter nicht berücksichtigt wurde, wäre mit einem noch größeren Stichprobenumfang die Wahrscheinlichkeit, Zähne aus mehreren Altersgruppen zu testen, höher gewesen. Durch die randomisierte Zuteilung der Gruppen wurde dieser Einflussfaktor zwar reduziert, aber nicht eliminiert. Zudem gilt, dass bei größerem Stichprobenumfang die statistische Signifikanz höher und somit die Wahrscheinlichkeit, dass die Ergebnisse zufällig entstanden sind geringer ist.

6.1.2 Probenherstellung

Die Aufbereitung der Zähne erfolgte maschinell bis ISO Größe 60 um einen einheitlich großen, kreisrunden Kanalquerschnitt herzustellen. Dieser diente der Herstellung einer gleichmäßigen Sealerschichtstärke um den ebenfalls kreisrunden Spreader. Da diese Aufbereitungsgeometrie bei weitlumigen, ungleichmäßig verlaufenden oder ovalen [113] Wurzelkanälen erschwert ist, wurden dementsprechende Zähne vorab aussortiert.

Vor Einbringen des Sealers wurde der Wurzelkanal mit Hilfe von Papierspitzen getrocknet. Da die Trocknung und somit auch die Restfeuchte des Wurzeldentins nicht komplett identisch war, der zu untersuchende Sealer sich aber abhängig von einer gewissen Restfeuchte im Kanal mit dem Wurzeldentin verbindet, können sich hierdurch Schwankungen der Haftwerte ergeben haben.

Das Einbringen des Sealers erfolgte durch mit Sealer beschickte Papierspitzen. Diese Methode weist Studien zufolge eine deutlich geringere Effektivität als beispielsweise das Einbringen des Sealers mittels Lentulo auf [57]. Um Schwankungen durch

unterschiedlich kraftvolles Inserieren des Spreaders zu vermeiden, wurde dieser unter Kontrolle der Proben auf einer Waage eingebracht.

Da Variationen in der Sealerschichtstärke verschiedene negative Auswirkungen haben können, sollten diese vermieden werden. Nachgewiesen wurde, dass höhere Sealer-schichtstärken die Versiegelungsfähigkeit des Sealers negativ beeinflussen [28], sowie die Haftwerte im Pull-Out-Versuch herabsetzen [26].

Anders als in der klinischen Realität wurde als Kernmaterial ein Stahlspreader und nicht Guttapercha-Points genutzt, da die Guttapercha-Points beim Pull-Out-Versuch gerissen wären. Obwohl in diesem Versuch die Haftwerte des Sealers zum Wurzelkanalentin untersucht werden sollten und man somit das Kernmaterial eher zweitrangig ist, kann man dessen Einfluss auf die Haftwerte nicht abstreiten. Dies wird an den unterschiedlichen Frakturmodi sichtbar. Sowohl beim adhäsiven Bruch zum Spreader, als auch zum Dentin stellt sich die Frage, ob durch gegebenenfalls andere Haftmechanismen am Guttapercha auch andere Haftwerte am Dentin und Frakturmodi entstanden wären.

Durch die Verwendung einheitlicher Stahlspreader wurde eine Vergleichbarkeit der Proben untereinander gewährleistet. Allerdings müssen weitere Studien erfolgen, die auch die Haftwerte bei Verwendung von Guttapercha als Füllmaterial untersuchen, um so die klinische Realität darzustellen. Für diese Studien stellt der Pull-Out Versuch allerdings kein geeignetes Versuchsverfahren dar. Somit müssen weitere Studien unter Verwendung anderer Versuchsaufbauten erfolgen.

6.1.3 Spülflüssigkeiten

Über die Relevanz der Wurzelkanalspülung für den Erfolg einer endodontischen Behandlung herrscht weitgehender Konsens. Über die Art der Spülweise sowie der Spüllösung wird in der Literatur hingegen viel diskutiert. Da abhängig von der klinischen Situation unterschiedliche Spüllösungen ihre Anwendung finden, wurden in dieser Studie die wichtigsten Spüllösungen, welche auch von der DGZMK aufgelistet werden, getestet und miteinander verglichen.

Während der Aufbereitung wurden alle Wurzelkanäle lediglich mit Aqua dest. gespült. Laut Goldman et. al. spielt aber auch die Spüllösung, welche während der Aufbereitung genutzt wird eine wichtige Rolle. So sei auch eine Abschlusspülung mit NaOCl nicht

mehr in der Lage, die vorhandenen Gewebsreste vollständig aufzulösen. [44] Folglich ist in dieser Studie zwar eine Vergleichbarkeit der Proben und Versuchsgruppen untereinander gewährleistet. Auf das klinische Vorgehen lassen sich die ermittelten Haftwerte allerdings nicht direkt übertragen, da die Aqua dest.-Spülung während der Aufbereitung gefolgt von der Abschlusspülung mit einer anderen Spülflüssigkeit nicht dem klinischen Vorgehen entsprechen.

Durch die Anwendung von jeweils nur einer Spüllösung pro Versuchsgruppe wurde sichergestellt, dass die Haftwerte nicht durch Wechselwirkungen der Spüllösungen untereinander beeinflusst wurden. Da allerdings keine Spüllösung alle erforderlichen Eigenschaften aufweist, wird eine Kombination mehrerer Spüllösungen empfohlen. Als besonders effektiv gilt die Kombination aus NaOCl und EDTA [49, 126]. Es ist deshalb nötig, weitere Tests durchzuführen, die auch die Haftwerte in Abhängigkeit verschiedener Spülprotokolle ermitteln, um den klinischen Alltag bestmöglich abzubilden.

Für die bessere Vergleichbarkeit der Proben untereinander, wurde darauf geachtet mit genau 3 ml über 1 Minute zu spülen. Das Volumen an Aqua dest., welches während der Aufbereitung genutzt wurde, war allerdings nicht für jeden Probe gleich. Eine Vereinheitlichung der Spülmenge während der Aufbereitung wäre allerdings auch schwer realisierbar gewesen, da nicht jeder Wurzelkanal in der gleichen Zeit aufzubereiten war. Insgesamt liegt die Spülmenge von 3 ml allerdings unter dem, was in der Regel empfohlen wird. Hülsmann empfahl beispielsweise bei der Aufbereitung pro Kanal 2-5 ml zu verwenden, sowie abschließend mit jeweils 10 ml NaOCl und EDTA zu spülen [55]. Die in dieser Studie ausgewählte Spülmenge ist geringer. Da manche Spüllösungen bei längerer Kontaktzeit zu einer Erosion des Wurzelkanal Dentins und Verminderung der Mikrohärtigkeit führen, ist eine Veränderung der Haftwerte bei längerer Wurzelkanalspülung nicht auszuschließen. Insbesondere für EDTA wurde nachgewiesen, dass längere Spülzeiten zu erosiven Veränderungen des Dentins führen. Die Studienlage zur genauen Spüldauer ab welcher es zu erosiven Veränderungen kommt ist allerdings heterogen und variiert zwischen 1 und 3 Minuten [39]. Es gilt deshalb zu überprüfen, ob sich die Haftwerte bei Anwendung größerer Spülvolumina oder längerer Anwendungsdauer verändern.

6.1.4 Einfluss medikamentöser Einlagen

Wenngleich bei Vorliegen einer irreversiblen Pulpitis das einzeitige Vorgehen aus Vitalexstirpation, Aufbereitung und Füllung des Wurzelkanalsystems empfohlen wird [14], findet dies in der klinischen Praxis selten Anwendung. Gerade für mehrwurzlige Zähne fehlt nach erfolgter Diagnostik häufig die Zeit, eine komplette Wurzelkanalbehandlung in derselben Sitzung durchzuführen. Folglich ist sowohl bei irreversibler Pulpitis, als auch bei Indikationen für welche ein zweizeitiges Vorgehen präferiert wird, das Einbringen einer medikamentösen Einlage notwendig. Ähnlich den endodontischen Spüllösungen gibt es auch für die medikamentöse Einlage des Wurzelkanals viele verschiedene Präparate. Diese werden abhängig von der jeweils vorliegenden Situation, allgemeinanamnestischen Risikofaktoren, wie Allergien oder Schwangerschaft und nicht zuletzt der Präferenz des jeweiligen Behandlers ausgewählt. Da eine komplette Entfernung der medikamentösen Einlage bei Aufbereitung und Spülung des Wurzelkanals zwar erwünscht, aber nicht immer sicher gewährleistet werden kann, ist nicht auszuschließen, dass der Sealer bei Wurzelfüllung in Kontakt zur medikamentösen Einlage kommt. Ob und in wie weit dies Einfluss auf die Haftwerte des Wurzelkanalsealers *Well-Root ST* hat, wurde bislang nicht untersucht. Weitere Studien, welche sich neben den angewendeten Spüllösungen auch mit den Auswirkungen der verwendeten medikamentösen Einlage auf den Haftverbund auseinandersetzen, sind deshalb erforderlich.

6.1.5 Testverfahren zur Ermittlung der Haftwerte

In der Literatur werden verschiedene Testverfahren zur Haftwertbestimmung beschrieben. Dazu zählen unter anderem das Pull-Out-, Push-Out- und Microtensile-Verfahren [5, 10, 35, 68]. Auch das Shear-Bond-Strength-Verfahren ist eine in der Literatur genannte Methode zur Haftwertermittlung.

Beim Pull-Out-Test wird die Zugkraft entlang der Längsachse des Zahnes gemessen. Dies entspricht einer axialen Belastung ähnlich der klinischen Situation, weshalb der Test von manchen Autoren bevorzugt wird [29, 81]. Da nach erfolgter Wurzelkanalfüllung keine weitere Manipulation der Probe nötig ist, wird die Schnittstelle zwischen Wurzelkanalentin und Sealer nicht verändert. Besonders Vibrationen, die während dem Schneiden der Proben bei anderen Testverfahren auf den Sealer wirken, können zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen [11] und wurden hier ausgeschlossen. Weiterhin spricht

für den Pull-Out-Test, dass innerhalb kurzer Zeit viele Proben untersucht werden können, da die Herstellung von Schnittpräparaten, wie sie beispielsweise für den Push-Out-Test benötigt werden, nicht nötig ist. Nachteil des Pull-Out-Testverfahrens ist allerdings, dass die Verwendung von Guttapercha als Wurzelfüllmaterial nicht möglich war, da das Material im Versuch gerissen wäre und so zu verfälschte Haftwerten geführt hätte.

Andererseits ist durch das Push-Out-Testverfahren die Gewinnung mehrerer Proben aus einem Zahn möglich, was die Anzahl der zu getesteten Proben deutlich erhöht hätte [11]. Zudem können so die Haftwerte in verschiedenen Abschnitten des Wurzelkanals separat getestet werden [11, 47]. Die durch Präparation gewonnenen Zahnscheiben werden beim Push-Out-Test auf eine gelochte Unterlage aufgelegt. Die Lochung der Unterlage ist dabei größer, als der Durchmesser der zu untersuchenden Sealer-Spreader-Kombination. Ein runder Metallstempel belastet die Wurzelfüllung parallel zur Klebefläche bis zur Lösung der Füllung aus dem Kanal. [23] Für die Anwendung dieses Testverfahrens im Rahmen der hier durchgeführten Studien spricht, dass so auch Wurzelfüllungen aus Sealer und Guttapercha hätten getestet werden können.

Die Anwendung des Microtensile-Testverfahrens benötigt ebenfalls deutlich mehr Zeit sowie eine gewisse Erfahrung bei der Erstellung der Präparate [11]. Zudem ist die Versagensrate durch die Präparation der Proben höher, als bei allen anderen Testverfahren [11, 46]. Aus diesen Gründen wurde sich gegen das Microtensile-Verfahren entschieden.

Beim Shear-Bond-Strength-Test werden unter Zuhilfenahme von Schablonen zylinderförmige Proben des zu untersuchenden Materials auf die Zahnoberfläche auf polymerisiert [41]. Diese werden dann parallel zur Adhäsivgrenze belastet, bis ein Versagen des Haftverbundes auftritt. Der Shear-Bond-Strength-Test wird häufig genutzt, um den Haftverbund von kieferorthopädischen Materialien wie Brackets zum Zahn zu untersuchen [100]. Zu Ermittlung des Haftverbundes von Wurzelkanalsealern zum Zahn eignet sich dieses Verfahren dagegen nicht und wurde deshalb nicht für diese Studie ausgewählt.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Prüfung der Arbeitshypothesen

Folgende Arbeitshypothesen sollten überprüft werden:

1. Arbeitshypothese:

Unterschiedliche Spülungen führen zu unterschiedlichen Haftwerten.

Die Hypothese wird bestätigt.

Anhand der statistischen Analyse lässt sich erkennen, dass die Auswahl der Spülflüssigkeit einen signifikanten Einfluss auf den Haftverbund hatte. Ethanol erreichte die höchsten Haftwerte (8,61MPa). Die Spülungen mit Aqua dest., CHX und NaOCl folgten mit Abstand, der jedoch nicht signifikant war. Immerhin waren deren Haftverbundwerte ca. 3 MPa niedriger als jene nach Spülung mit Alkohol. EDTA folgte danach, hatte aber nicht den massiv den Haftverbund reduzierenden Effekt wie Zitronensäure. Diese generierte die mit Abstand schlechtesten Haftwerte (2,23 MPa).

2. Arbeitshypothese:

Die Anwendung von Chelatoren zur Entfernung der Schmierschicht führt zu schlechteren Haftwerten.

Die Hypothese wird bestätigt.

Als Vertreter der Gruppe der Chelatoren wurden in dieser Studie EDTA und Zitronensäure verwendet. Zitronensäure wies in diesem Versuch die mit Abstand schlechtesten Haftwerte auf. Auch die Haftwerte nach EDTA Spülungen lagen mit einem Medianwert von 4,70 MPa unter den Haftwerten der anderen Spüllösungen (> 5 MPa). Die Haftwerte der EDTA Gruppe waren damit allerdings nicht signifikant schlechter, als die Haftwerte der anderen Gruppen.

6.2.2 Haftwerte von *Well Root ST*

Die Haftwerte von Wurzelkanalsealern in Abhängigkeit endodontischer Spüllösungen wurde bereits in vielen Studien untersucht [29, 33, 119]. Da biokeramische Sealer noch nicht so lange auf dem Markt verfügbar sind, liegen zu Ihnen weniger Studien vor, als beispielsweise zu Epoxidharz-basierten Sealern wie *AH Plus*.

Erstmal dokumentiert wurde die Anwendung biokeramischer Materialien als Wurzelkanalsealer 1984 von Krell und Wefel [1, 63]. Der erste, rein biokeramische Sealer kam 2007 mit *iROOT SP* auf den Markt [59]. Während für *iRoot SP* unter anderem der Einfluss von Chelatoren auf den Haftverbund untersucht wurde [119], liegen für *Well-Root ST* noch keine derartigen Studien vor (Stand 19.10.2023).

Die in dieser Studie ermittelten Haftwerte sind die höchsten bislang für einen biokeramischen Sealer mittels Pull-Out-Test ermittelten Haftwerte. Auch verglichen mit ähnlich durchgeführten Studien zu Sealern wie *Apexit* [33] oder *AH 26* [29] wurden sehr hohe Haftwerte erreicht. Bei *Apexit* lagen die Medianwerte zwischen 0,625 und 0,220 MPa, bei *AH 26* zwischen 6,08 und 0,55 MPa. In beiden Studien wurde Ethanol, welches in dieser Studie die Spüllösung mit den höchsten Haftwerten war, nicht verwendet.

In dieser Studie besonders hervorzuheben ist der Einfluss von Ethanol auf die Haftwerte. Obwohl *Well-Root ST* laut Hersteller für den Abbinde-Vorgang eine gewisse Restfeuchte im Kanal benötigt, schnitt die Spülung mit Ethanol am besten ab. In dieser Studie wurde auf eine Übertrocknung der Kanäle bewusst verzichtet, um den Herstellerangaben gerecht zu werden. Ethanol wird, wie in der Literaturübersicht bereits erwähnt, als endodontische Spüllösung vor allem wegen seiner trocknenden Eigenschaften gerne als Abschlusspülung verwendet. Die verbleibende Restfeuchtigkeit im Wurzelkanal ist nach der Spülung mit Ethanol in Vergleich zu den anderen Testgruppen als geringer anzunehmen. Dies lässt sich durch die initiale Verdrängung der Feuchtigkeit zusammen mit der höheren Verdampfungsrate von Ethanol erklären. Eine mögliche Erklärung für die guten Haftwerte nach Ethanol-Spülung ist, dass bei dem Versuch, die Kanäle nicht zu stark zu trocknen, eine hohe Restfeuchte in den Kanälen verblieben ist. Diese wurde im Fall der Ethanol-Spülung reduziert, in den anderen Versuchsgruppe hatte die Abschlusspülung geringen bis keinen trocknenden Effekt, sodass dort die Restfeuchte des Dentins unter Umständen zu hoch war. Des Weiteren ist die Anwesenheit von Feuchtigkeit keine genaue Angabe, und kann somit sehr individuell interpretiert werden. Um also eine genauere Aussage bezüglich der Korrelation zwischen dem Haftwert am Dentin und endodontischer Spüllösung treffen zu können, scheinen weitere Studien mit standardisierter Restfeuchte des Wurzelkanaldentins nötig.

6.3 Schlussfolgerung und klinische Relevanz

Die Ergebnisse dieser Studie weisen grundsätzlich darauf hin, dass mit dem Sealer *Well-Root ST* hohe Haftwerte zu erreichen sind. Wie bereits erwähnt, wird im klinischen Alltag in der Regel mehr als eine Spüllösung verwendet, da nur die Kombination mehrerer Spüllösungen alle Anforderungen der mechanischen Aufbereitung erfüllen kann. Die in dieser Studie ermittelten Haftwerte dienen deshalb als erster Anhaltspunkt, welchen Spüllösungen bei Verwendung von *Well-Root ST* der Vorzug gegeben werden sollte. Um die klinische Realität besser abzubilden, sind dennoch weitere Studien nötig, die die Haftwerte in Abhängigkeit verschiedener Spülprotokolle ermitteln.

Insgesamt lässt sich aber sagen, dass für die häufig angewendeten Spüllösungen mit Ausnahme von Zitronensäure Haftwerte erzielt werden, die den Haftwerten anderer bereits verwendeter Sealer ebenbürtig oder sogar überlegen sind. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass bei Verwendung eines Chelators zur Entfernung der Schmierschicht EDTA gegenüber Zitronensäure der Vorzug gegeben werden sollte. Aufgrund der besseren Biokompatibilität scheint *Well-Root ST* deshalb gerade bei kritischen Indikationen, wie nicht geschlossene Apices oder nervnaher Lage der Wurzelspitze, eine gute Alternative zu den klassischen Sealern wie *AH Plus* zu sein.

7 Zusammenfassung

7.1 Ziel der Studie

Für eine erfolgreiche endodontische Behandlung und gute Prognose des wurzelkanalbehandelten Zahnes ist eine suffiziente, stabile Wurzelfüllung maßgeblich entscheidend. Während sich Guttapercha als Kernmaterial der Wurzelfüllung seit Jahrzehnten als Goldstandard bewährt, werden im Bereich der Sealer immer wieder neue Materialien und Materialklassen entwickelt. In Studien wurde für diverse Sealer bereits nachgewiesen, dass die Verwendung unterschiedlicher Spüllösungen auch zu variierenden Haftwerten führt. Häufig ergaben sich bei belassen der Schmierschicht zudem höhere Haftwerte, als nach deren Entfernung.

Ziel dieser in vitro Studie war es, die Auswirkungen verschiedener Spülflüssigkeiten auf den Haftverbund zwischen Wurzelkanaldentin und dem biokeramischen Sealer *Well-Root ST* sowie den Einfluss der Schmierschicht, zu ermitteln.

7.2 Material und Methoden

Zur Durchführung dieser Studie wurden 60 humane, kariesfreie extrahierte Zähne verwendet, welche zuvor keiner endodontischen Behandlung erfahren hatten. Die Zähne wurden auf eine Länge von 9 mm dekapitiert und mit dem maschinellen Aufbereitungssystem *F360/Endopilot* auf ISO 55, AL 8 mm aufbereitet. Anschließend wurde mittels K-Reamer manuell auf ISO 60, 8 mm AL und mittels *BioRaCe* ISO 60 auf 7,5 mm AL aufbereitet. Die Zähne wurden randomisiert 6 Gruppen zugeteilt und mit den Spüllösungen 1: Aqua dest, 2: Ethylendiamintetraacetat 17%, 3: Zitronensäure 40%, 4: Ethanol 95 %, 5: Natriumhypochlorit 5,25 % und 6: Chlorhexidindigluconat 2% mit jeweils 3 ml für 1 min gespült.

Nach Spülung und Trocknung der Kanäle erfolgte das Einbringen des Stahlspreader mit dem zu untersuchenden Wurzelkanalsealer.

Nach 4-wöchiger, feuchter Lagerung bei 37 °C wurden die Proben einem Pull-Out-Versuch mittels Universalprüfmaschine unterzogen. Dabei wurde die maximale Kraft bis zum adhäsiven Versagen ermittelt. Des Weiteren erfolgte eine Analyse der entstandenen Frakturmodi.

Zusammenfassung

Die statistische Analyse erfolgte mittels der Shapiro-Wilk, ANOVA, Levene, Gabriel- und Chi-Quadrat-Tests.

7.3 Ergebnisse

Die statistische Analyse ergab, dass die verwendeten endodontischen Spüllösungen einen signifikanten Einfluss auf die Haftwerte von *Well-Root ST* hatten.

Die mit Abstand besten Haftwerte dieser Studie wurden bei Spülung mit Ethanol erzielt. Auch die Spüllösungen mit Aqua dest., CHX und NaOCl erzielten solide Haftwerte, hatten allerdings einen Unterschied von etwa 3 MPa zu Ethanol. Die Chelatoren EDTA und vor allem Zitronensäure erzielten in dieser Studie die mit Abstand schlechtesten Haftwerte. Somit führte die Anwendung von Chelatoren zur Auflösung der Schmierschicht zu schlechteren Haftwerten. Die Statistik ergab allerdings keine Korrelation der Frakturmodi mit dem Haftverbund.

7.4 Schlussfolgerung

Unter den Bedingungen dieser Studie wies der verwendete Wurzelkanalsealer *Well-Root ST* hohe Haftwerte auf. Besonders die Spülung mit Ethanol führte zu sehr guten Haftwerten am Wurzelkanalentin (Median: 8,61 MPa), weshalb über eine Abschlusspülung mit Alkohol bei der Wurzelfüllung mit *Well-Root ST* nachgedacht werden sollte. Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Studie ist bei der Entfernung der Schmierschicht EDTA gegenüber Zitronensäure der Vorzug zu geben.

8 Abstract

8.1 Aim of the study

A sufficient, stable root canal filling is crucial for successful endodontic treatment and a good prognosis for the root canal-treated tooth. While gutta-percha has proven to be the gold standard as the core material for root canal fillings for decades, new materials and material classes are constantly being developed in the field of sealers. Studies have already shown for various sealers that the use of different rinsing solutions also leads to varying adhesion values. In many cases, leaving the smear layer in place also resulted in higher adhesion values than after removing it.

The aim of this in vitro study was to determine the effects of different rinsing liquids on the bond between root canal dentin and the bioceramic sealer *Well-Root ST*, as well as the influence of the smear layer.

8.2 Materials and methods

To conduct this study, 60 human, caries-free extracted teeth that had not previously undergone endodontic treatment were used. The teeth were decapitated to a length of 9mm and prepared to ISO 55, working length (WL) of 8 mm using the *F360/EndoPilot* automated preparation system. The teeth were then manually prepared to ISO 60, 8 mm WL using K-Reamer and to 7.5 mm WL using *BioRaCe* ISO 60. The teeth were randomly assigned to 6 groups and rinsed with the rinsing solutions 1: distilled water, 2: ethylenediamine tetraacetate 17 %, 3: citric acid 40 %, 4: ethanol 95 %, 5: sodium hypochlorite 5.25 % and 6: chlorhexidine digluconate 2 %, each with 3 ml for 1 min.

After rinsing and drying the canals, the steel spreader was inserted with the root canal sealer to be examined.

After 4 weeks of moist storage at 37 °C, the samples were subjected to a pull-out test using a universal testing machine. The maximum force up to adhesive failure was determined. The resulting fracture modes were also analyzed.

The statistical analysis was carried out using Shapiro-Wilk, ANOVA, Levene, Gabriel and chi-square tests.

8.3 Results

The statistical analysis showed that the endodontic rinsing solutions used had a significant influence on the adhesion values of *Well-Root ST*.

By far the best adhesion values in this study were achieved when rinsing with ethanol. The rinsing solutions with distilled water, CHX and NaOCl also achieved solid adhesion values, but had a difference of around 3 MPa to ethanol. The chelators EDTA and especially citric acid achieved by far the worst adhesion values in this study. Thus, the use of chelators to dissolve the smear layer led to weaker adhesion values. However, the statistics showed no correlation between the fracture modes and the adhesive bond.

8.4 Conclusion

Under the conditions of this study, the root canal sealer *Well-Root ST* showed high adhesion values. Rinsing with ethanol in particular led to very good adhesion values on the root canal dentin (median: 8.61 MPa), which is why a final rinse with alcohol should be considered when filling the roots with *Well-Root ST*. Based on the results of the present study, EDTA should be preferred to citric acid when removing the smear layer.

9 Literatur

1. Al-Haddad A, Che Ab Aziz ZA (2016) Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Review. *International journal of biomaterials* 2016:9753210. doi:10.1155/2016/9753210
2. Al-Hiyasat AS, Alfirjani SA (2019) The effect of obturation techniques on the push-out bond strength of a premixed bioceramic root canal sealer. *J Dent* 89:103169. doi:10.1016/j.jdent.2019.07.007
3. Alsubait S, Albader S, Alajlan N, Alkhunaini N, Niazy A, Almahdy A (2019) Comparison of the antibacterial activity of calcium silicate- and epoxy resin-based endodontic sealers against *Enterococcus faecalis* biofilms: a confocal laser-scanning microscopy analysis. *Odontology* 107(4):513–520. doi:10.1007/s10266-019-00425-7
4. Armstrong S, Breschi L, Özcan M, Pfefferkorn F, Ferrari M, van Meerbeek B (2017) Academy of Dental Materials guidance on in vitro testing of dental composite bonding effectiveness to dentin/enamel using micro-tensile bond strength (μ TBS) approach. *Dent Mater* 33(2):133–143. doi:10.1016/j.dental.2016.11.015
5. Arslan H, Yilmaz CB, Karatas E, Barutcigil C, Topcuoglu HS, Yeter KY (2015) Efficacy of different treatments of root canal walls on the pull-out bond strength of the fiber posts. *Lasers Med Sci* 30(2):863–868. doi:10.1007/s10103-013-1457-4
6. Azar MR, Safi L, Nikaein A (2012) Comparison of the cleaning capacity of Mtwo and Pro Taper rotary systems and manual instruments in primary teeth. *Dent Res J (Isfahan)* 9(2):146–151. doi:10.4103/1735-3327.95227
7. Badole GP, Warhadpande MM, Meshram GK, Bahadure RN, Tawani SG, Tawani G, Badole SG (2013) A comparative evaluation of cytotoxicity of root canal sealers: an in vitro study. *Restor Dent Endod* 38(4):204–209. doi:10.5395/rde.2013.38.4.204
8. Baia JCP, Ribeiro MES, Nogueira BCL, Lima RR, da Silva E Souza Júnior, Mário Honorato, Loretto SC (2019) Is buffalo enamel a suitable substrate for bond strength tests? *Clin Cosmet Investig Dent* 11:81–87. doi:10.2147/CCIDE.S194201
9. Bajaj D, Sundaram N, Nazari A, Arola D (2006) Age, dehydration and fatigue crack growth in dentin. *Biomaterials* 27(11):2507–2517. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.11.035
10. Barbizam JVB, Trope M, Tanomaru-Filho M, Teixeira ECN, Teixeira FB (2011) Bond strength of different endodontic sealers to dentin: push-out test. *J Appl Oral Sci* 19(6):644–647. doi:10.1590/S1678-77572011000600017
11. Binus S, Koch A, Petschelt A, Berthold C (2013) Restoration of endodontically treated teeth with major hard tissue loss--bond strength of conventionally and adhesively luted fiber-reinforced composite posts. *Dent Traumatol* 29(5):339–354. doi:10.1111/edt.12013

Abstract

12. Branstetter J, Fraunhofer JA von (1982) The physical properties and sealing action of endodontic sealer cements: a review of the literature. *J Endod* 8(7):312–316.
doi:10.1016/S0099-2399(82)80280-X
13. Bukhari S, Karabucak B (2019) The Antimicrobial Effect of Bioceramic Sealer on an 8-week Matured *Enterococcus faecalis* Biofilm Attached to Root Canal Dentinal Surface. *J Endod* 45(8):1047–1052. doi:10.1016/j.joen.2019.04.004
14. Bürklein S, Schäfer E (2011) Einzeitige versus zweizeitige Wurzelkanalbehandlung. *Zahnmedizin up2date* 5(03):247–260. doi:10.1055/s-0030-1271001
15. Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2013) Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 46(6):590–597.
doi:10.1111/iej.12037
16. Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2014) Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J* 47(5):405–409. doi:10.1111/iej.12161
17. Bürklein S, Poschmann T, Schäfer E (2014) Shaping ability of different nickel-titanium systems in simulated S-shaped canals with and without glide path. *J Endod* 40(8):1231–1234.
doi:10.1016/j.joen.2014.01.043
18. Candeiro GTM, Moura-Netto C, D'Almeida-Couto RS, Azambuja-Júnior N, Marques MM, Cai S, Gavini G (2016) Cytotoxicity, genotoxicity and antibacterial effectiveness of a bioceramic endodontic sealer. *Int Endod J* 49(9):858–864. doi:10.1111/iej.12523
19. Carvalho CN, Grazziotin-Soares R, de Miranda Candeiro, George Táccio, Gallego Martinez L, Souza JP de, Santos Oliveira P, Bauer J, Gavini G (2017) Micro Push-out Bond Strength and Bioactivity Analysis of a Bioceramic Root Canal Sealer. *Iran Endod J* 12(3):343–348.
doi:10.22037/iej.v12i3.16091
20. Christofzik D, Schwendicke F, Flörke C, Härtl A, Dörfer C, Größner-Schreiber B (2015) In Vitro Comparison of Raypex 6 and Endopilot Using a Novel, Computer-Aided Measurement System, for Determining the Working Length. *PLoS One* 10(8):e0134383.
doi:10.1371/journal.pone.0134383
21. Christofzik DW, Bartols A, Khaled M, Größner-Schreiber B, Dörfer CE (2017) The accuracy of the auto-stop function of different endodontic devices in detecting the apical constriction. *BMC Oral Health* 17(1):141. doi:10.1186/s12903-017-0425-y
22. Cohen BI, Pagnillo MK, Musikant BL, Deutsch AS (1998) Formaldehyde evaluation from endodontic materials. *Oral Health* 88(12):37–39

Abstract

23. Costa JA, Rached-Júnior FA, Souza-Gabriel AE, Silva-Sousa YTC, Sousa-Neto MD (2010) Push-out strength of methacrylate resin-based sealers to root canal walls. *Int Endod J* 43(8):698–706. doi:10.1111/j.1365-2591.2010.01766.x
24. Crespo S, Cortes O, Garcia C, Perez L (2008) Comparison between rotary and manual instrumentation in primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 32(4):295–298. doi:10.17796/jcpd.32.4.l57l36355u606576
25. da Silva, Emmanuel João Nogueira Leal, Zaia AA, Peters OA (2017) Cytocompatibility of calcium silicate-based sealers in a three-dimensional cell culture model. *Clin Oral Investig* 21(5):1531–1536. doi:10.1007/s00784-016-1918-9
26. D'Arcangelo C, Cinelli M, Angelis F de, D'Amario M (2007) The effect of resin cement film thickness on the pullout strength of a fiber-reinforced post system. *J Prosthet Dent* 98(3):193–198. doi:10.1016/S0022-3913(07)60055-9
27. Decker U (2015) Analyse der koronalen Dichtigkeit unter Verwendung verschiedener Wurzelkanalsealer mit verschiedenen Obturationstechniken bei ovalen Wurzelkanälen. Marburg, Philipps-Universität Marburg, Diss., 2014, Philipps-Universität Marburg
28. De-Deus G, Coutinho-Filho T, Reis C, Murad C, Paciornik S (2006) Polymicrobial leakage of four root canal sealers at two different thicknesses. *J Endod* 32(10):998–1001. doi:10.1016/j.joen.2006.04.003
29. Deimen C (2017) Einfluss verschiedener Spülflüssigkeiten auf den Haftverbund von AH 26 zum Wurzelkanaldentin. Philipps-Universität Marburg, Marburg
30. DeWald JP (1997) The use of extracted teeth for in vitro bonding studies: a review of infection control considerations. *Dent Mater* 13(2):74–81. doi:10.1016/S0109-5641(97)80015-2
31. DGZMK (2006) Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und DGZ zum Thema Wurzelkanalspülung. DZZ10
32. Dias-Junior, Luiz Carlos de Lima, Castro RF, Fernandes AD, Guerreiro MYR, Silva, Emmanuel J N L, Brandão, Juliana Melo da Silva (2021) Final Endodontic Irrigation with 70% Ethanol Enhanced Calcium Hydroxide Removal from the Apical Third. *J Endod* 47(1):105–111. doi:10.1016/j.joen.2020.09.017
33. Dietrich S (2018) Einfluss verschiedener Spüllösungen auf den Haftverbund des Sealers Apexit Plus zum Wurzelkanaldentin. Philipps-Universität Marburg, Marburg
34. Drake DR, Wiemann AH, Rivera EM, Walton RE (1994) Bacterial retention in canal walls in vitro: effect of smear layer. *J Endod* 20(2):78–82. doi:10.1016/S0099-2399(06)81186-6
35. Ebert J, Leyer A, Günther O, Lohbauer U, Petschelt A, Frankenberger R, Roggendorf MJ (2011) Bond strength of adhesive cements to root canal dentin tested with a novel pull-out approach. *J Endod* 37(11):1558–1561. doi:10.1016/j.joen.2011.08.009

Abstract

36. Eick JD, Wilko RA, Anderson CH, Sorensen SE (1970) Scanning electron microscopy of cut tooth surfaces and identification of debris by use of the electron microprobe. *J Dent Res* 49(6):Suppl:1359-68. doi:10.1177/00220345700490063601
37. Eldeniz AU, Ørstavik D (2009) A laboratory assessment of coronal bacterial leakage in root canals filled with new and conventional sealers. *Int Endod J* 42(4):303–312. doi:10.1111/j.1365-2591.2008.01509.x
38. Fauth V Der Einfluss der Wurzelkanalfeuchtigkeit auf die apikale Dichtigkeit adhäsiver und nicht-adhäsiver Sealer. Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2011. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:29-opus-23960>
39. Fortea L, Sanz-Serrano D, Luz L-B, Bardini G, Mercade M (2024) Update on chelating agents in endodontic treatment: A systematic review. *J Clin Exp Dent* 16(4):e516-e538. doi:10.4317/jced.60989
40. Galhano G, Melo RM de, Valandro LF, Bottino MA (2009) Comparison of resin push-out strength to root dentin of bovine- and human-teeth. *Indian J Dent Res* 20(3):332–336. doi:10.4103/0970-9290.57378
41. Ganesh AS (2020) Comparative evaluation of shear bond strength between fifth, sixth, seventh, and eighth generation bonding agents: An In Vitro study. *Indian J Dent Res* 31(5):752–757. doi:10.4103/ijdr.IJDR_635_19
42. Gençoğlu N, Samani S, Günday M (1993) Dentinal wall adaptation of thermoplasticized gutta-percha in the absence or presence of smear layer: a scanning electron microscopic study. *J Endod* 19(11):558–562. doi:10.1016/S0099-2399(06)81286-0
43. Gençoğlu N, Samani S, Günday M (1993) Evaluation of sealing properties of Thermafil and Ultrafil techniques in the absence or presence of smear layer. *J Endod* 19(12):599–603. doi:10.1016/S0099-2399(06)80273-6
44. Goldman M, Goldman LB, Cavaleri R, Bogis J, Lin PS (1982) The efficacy of several endodontic irrigating solutions: a scanning electron microscopic study: Part 2. *J Endod* 8(11):487–492. doi:10.1016/s0099-2399(82)80073-3
45. Gomes, Brenda P F A, Vianna ME, Zaia AA, Almeida JFA, Souza-Filho FJ, Ferraz CCR (2013) Chlorhexidine in endodontics. *Braz Dent J* 24(2):89–102. doi:10.1590/0103-6440201302188
46. Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, Tay F, Ferrari M (2004) The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci* 112(4):353–361. doi:10.1111/j.1600-0722.2004.00146.x

Abstract

47. Goracci C, Grandini S, Bossù M, Bertelli E, Ferrari M (2007) Laboratory assessment of the retentive potential of adhesive posts: a review. *J Dent* 35(11):827–835.
doi:10.1016/j.jdent.2007.07.009
48. Guelzow A, Stamm O, Martus P, Kielbassa AM (2005) Comparative study of six rotary nickel-titanium systems and hand instrumentation for root canal preparation. *Int Endod J* 38(10):743–752. doi:10.1111/j.1365-2591.2005.01010.x
49. Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y (2014) Irrigation in endodontics. *Br Dent J* 216(6):299–303. doi:10.1038/sj.bdj.2014.204
50. Hein L, Hickel R, Mohr K, Reichl F-X (Hrsg) (2014) *Atlas der Pharmakologie und Toxikologie für Zahnmediziner*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
51. Hellwig E, Schäfer E, Klimek J, Attin T (2018) *Einführung in die Zahnerhaltung. Prüfungswissen Kariologie und Parodontologie*, 7. Aufl. Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln
52. Hench LL, Wilson J (1984) Surface-active biomaterials. *Science* 226(4675):630–636.
doi:10.1126/science.6093253
53. Herrera DR, Santos ZT, Tay LY, Silva EJ, Loguercio AD, Gomes, Brenda P F A (2013) Efficacy of different final irrigant activation protocols on smear layer removal by EDTA and citric acid. *Microsc Res Tech* 76(4):364–369. doi:10.1002/jemt.22175
54. Hoshino RA, Silva GFd, Delfino MM, Guerreiro-Tanomaru JM, Tanomaru-Filho M, Sasso-Cerri E, Filho IB, Cerri PS (2020) Physical Properties, Antimicrobial Activity and In Vivo Tissue Response to Apexit Plus. *Materials (Basel)* 13(5). doi:10.3390/ma13051171
55. Hülsmann M (2008) *Endodontie*, 1. Aufl. Thieme, s.l.
56. Jitaru S, Hodisan I, Timis L, Lucian A, Bud M (2016) The use of bioceramics in endodontics - literature review. *Clujul medical* (1957) 89(4):470–473. doi:10.15386/cjmed-612
57. Kahn FH, Rosenberg PA, Schertzer L, Korthals G, Nguyen PN (1997) An in-vitro evaluation of sealer placement methods. *Int Endod J* 30(3):181–186. doi:10.1046/j.1365-2591.1997.00061.x
58. Kaiser E, Grünberg C, Bauer F (2017) *Wurzelfüllmaterialien und -techniker. Ein Überblick*. https://www.bzb-online.de/juli17/bzb7817_30.pdf
59. Kakoura DDS F, Pantelidou DDS PO (2018) Retreatment Efficacy of Endodontic Bioceramic Sealers: A Review of the Literature. *Odvotos - Int J Dent Sc* 20(2):39–50.
doi:10.15517/ijds.v0i0.33163
60. Kaufman AY (1981) Facial emphysema caused by hydrogen peroxide irrigation: report of a case. *J Endod* 7(10):470–472. doi:10.1016/s0099-2399(81)80309-3
61. Komabayashi T, Ahn C, Zhang S, Zhu Q, Spångberg LSW (2009) Chronologic comparison of root dentin moisture in extracted human teeth stored in formalin, sodium azide, and

Abstract

- distilled water. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 108(1):e50-4.
doi:10.1016/j.tripleo.2009.03.022
62. Konjhodzic-Prcic A, Jakupovic S, Hasic-Brankovic L, Vukovic A (2015) Evaluation of Biocompatibility of Root Canal Sealers on L929 Fibroblasts with Multiscan EX Spectrophotometer. *Acta Inform Med* 23(3):135–137. doi:10.5455/aim.2015.23.135-137
63. Krell KF, Wefel JS (1984) A calcium phosphate cement root canal sealer--scanning electron microscopic analysis. *J Endod* 10(12):571–576. doi:10.1016/S0099-2399(84)80103-X
64. Krifka S, Börzsönyi A, Koch A, Hiller K-A, Schmalz G, Friedl K-H (2008) Bond strength of adhesive systems to dentin and enamel--human vs. bovine primary teeth in vitro. *Dent Mater* 24(7):888–894. doi:10.1016/j.dental.2007.11.003
65. Lee JK, Kim S, Lee S, Kim H-C, Kim E (2019) In Vitro Comparison of Biocompatibility of Calcium Silicate-Based Root Canal Sealers. *Materials (Basel)* 12(15). doi:10.3390/ma12152411
66. Lottanti S, Tauböck TT, Zehnder M (2014) Shrinkage of backfill gutta-percha upon cooling. *J Endod* 40(5):721–724. doi:10.1016/j.joen.2013.09.043
67. Love RM, Chandler NP, Jenkinson HF (1996) Penetration of smeared or nonsmeared dentine by *Streptococcus gordonii*. *Int Endod J* 29(1):2–12. doi:10.1111/j.1365-2591.1996.tb01353.x
68. Macedo VC, Faria e Silva AL, Martins LRM (2010) Effect of cement type, relining procedure, and length of cementation on pull-out bond strength of fiber posts. *J Endod* 36(9):1543–1546. doi:10.1016/j.joen.2010.04.014
69. Machado R, Garcia, Lucas da Fonseca Roberti, da Silva Neto, Ulisses Xavier, Cruz Filho, Antônio de Miranda da, Silva RG, Vansan LP (2018) Evaluation of 17% EDTA and 10% citric acid in smear layer removal and tubular dentin sealer penetration. *Microsc Res Tech* 81(3):275–282. doi:10.1002/jemt.22976
70. Mader CL, Baumgartner JC, Peters DD (1984) Scanning electron microscopic investigation of the smeared layer on root canal walls. *J Endod* 10(10):477–483. doi:10.1016/S0099-2399(84)80204-6
71. Manfredi M, Figini L, Gagliani M, Lodi G (2016) Single versus multiple visits for endodontic treatment of permanent teeth. *Cochrane Database Syst Rev* 12:CD005296. doi:10.1002/14651858.CD005296.pub3
72. McComb D, Smith DC (1975) A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *J Endod* 1(7):238–242. doi:10.1016/S0099-2399(75)80226-3
73. Mehlawat R, Kapoor R, Gandhi K, Kumar D, Malhotra R, Ahuja S (2019) Comparative evaluation of instrumentation timing and cleaning efficacy in extracted primary molars using

Abstract

- manual and NiTi rotary technique - Invitro study. *J Oral Biol Craniofac Res* 9(2):151–155. doi:10.1016/j.jobcr.2019.03.003
74. Michael Arnold (2010) Techniken zur Wurzelkanalfüllung. Bewertung und praktische Hinweise. *Bayrisches Zahnärzteblatt*:60–65
75. Miletić I, Anić I, Pezelj-Ribarić S, Jukić S (1999) Leakage of five root canal sealers. *Int Endod J* 32(5):415–418. doi:10.1046/j.1365-2591.1999.00254.x
76. Mohammadi Z (2008) Sodium hypochlorite in endodontics: an update review. *Int Dent J* 58(6):329–341. doi:10.1111/j.1875-595x.2008.tb00354.x
77. Mohammadi Z, Yaripour S, Shalavi S, Palazzi F, Asgary S (2017) Root Canal Irrigants and Dentin Bonding: An Update. *Iran Endod J* 12(2):131–136. doi:10.22037/iej.2017.27
78. Mohammadi Z, Shalavi S, Yaripour S, Kinoshita J-I, Manabe A, Kobayashi M, Giardino L, Palazzi F, Sharifi F, Jafarzadeh H (2019) Smear Layer Removing Ability of Root Canal Irrigation Solutions: A Review. *J Contemp Dent Pract* 20(3):395–402
79. Murat Demiral (2017) In Vitro Assessment of the Tooth Discolouration Induced by Well Root ST, Dia-Proseal and MTA Fill Apex Root Canal Sealer. *Scholars Journal of Dental Science* (4):27–30
80. Nicholson JW, Czarnecka B (2016) Materials for the direct restoration of teeth. Woodhead Publishing series in biomaterials, Number 116. Woodhead Publishing, Amsterdam
81. Nova V, Karygianni L, Altenburger MJ, Wolkewitz M, Kielbassa AM, Wrbas K-T (2013) Pull-out bond strength of a fibre-reinforced composite post system luted with self-adhesive resin cements. *J Dent* 41(11):1020–1026. doi:10.1016/j.jdent.2013.08.011
82. Olcay K, Taşlı PN, Güven EP, Ülker GMY, Öğüt EE, Çiftçioğlu E, Kiratlı B, Şahin F (2020) Effect of a novel bioceramic root canal sealer on the angiogenesis-enhancing potential of assorted human odontogenic stem cells compared with principal tricalcium silicate-based cements. *J Appl Oral Sci* 28:e20190215. doi:10.1590/1678-7757-2019-0215
83. Orstavik D, Haapasalo M (1990) Disinfection by endodontic irrigants and dressings of experimentally infected dentinal tubules. *Endod Dent Traumatol* 6(4):142–149. doi:10.1111/j.1600-9657.1990.tb00409.x
84. Ozata F, Onal B, Erdilek N, Türkün SL (1999) A comparative study of apical leakage of Apexit, Ketac-Endo, and Diaket root canal sealers. *J Endod* 25(9):603–604. doi:10.1016/S0099-2399(99)80317-3
85. Ozkan HB, Cobankara FK, Sayin Z, Ozer F (2020) Evaluation of the Antibacterial Effects of Single and Combined use of Different Irrigation Solutions Against Intracanal *Enterococcus Faecalis*. *Acta Stomatol Croat* 54(3):250–262. doi:10.15644/asc54/3/3

Abstract

86. Ozok AR, van der Sluis LWM, Wu M-K, Wesselink PR (2008) Sealing ability of a new polydimethylsiloxane-based root canal filling material. *J Endod* 34(2):204–207.
doi:10.1016/j.joen.2007.11.005
87. Panchal V, Jeevanandan G, Erulappan SM (2019) Comparison between the Effectiveness of Rotary and Manual Instrumentation in Primary Teeth: A Systematic Review. *Int J Clin Pediatr Dent* 12(4):340–346. doi:10.5005/jp-journals-10005-1637
88. Pashley DH (1992) Smear layer: overview of structure and function. *Proc Finn Dent Soc* 88 Suppl 1:215–224
89. Perez F, Calas P, Rochd T (1996) Effect of dentin treatment on in vitro root tubule bacterial invasion. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 82(4):446–451.
doi:10.1016/s1079-2104(96)80313-1
90. Pintor AVB, Dos Santos, Marcello Rotter Marins, Ferreira DM, Barcelos R, Primo LG, Maia LC (2016 Winter) Does Smear Layer Removal Influence Root Canal Therapy Outcome? A Systematic Review, Bd 1, United States
91. Poggio C, Riva P, Chiesa M, Colombo M, Pietrocola G (2017) Comparative cytotoxicity evaluation of eight root canal sealers. *J Clin Exp Dent* 9(4):e574-e578. doi:10.4317/jced.53724
92. Poggio C, Dagna A, Ceci M, Meravini M-V, Colombo M, Pietrocola G (2017) Solubility and pH of bioceramic root canal sealers: A comparative study. *J Clin Exp Dent* 9(10):e1189-e1194. doi:10.4317/jced.54040
93. Rossi-Fedele G, Roberts AP (2007) A preliminary study investigating the survival of tetracycline resistant *Enterococcus faecalis* after root canal irrigation with high concentrations of tetracycline. *Int Endod J* 40(10):772–777. doi:10.1111/j.1365-2591.2007.01285.x
94. R uth A, Frankenberger R (2014) Revidierbarkeit adhäsiver Sealer im Vergleich zu nicht-adhäsiven Sealern. Marburg, Philipps-Universität Marburg, Diss., 2014. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hebis:04-z2014-06804>
95. Salz U, Poppe D, Sbicego S, Roulet J-F (2009) Sealing properties of a new root canal sealer. *Int Endod J* 42(12):1084–1089. doi:10.1111/j.1365-2591.2009.01635.x
96. Sarkar NK, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I (2005) Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate. *J Endod* 31(2):97–100.
doi:10.1097/01.don.0000133155.04468.41
97. Schilder H (2006) Filling root canals in three dimensions. 1967. *J Endod* 32(4):281–290.
doi:10.1016/j.joen.2006.02.007
98. Schirrmeister JF Untersuchungen zur apikalen und koronalen Dichtigkeit von Wurzelkanalsealern auf Kalziumphosphat-Basis im Vergleich zu marktüblichen Füllpasten. Eine In-

Abstract

- vitro-Studie zur Evaluation eines neuen Versuchsdesigns. @Freiburg (Breisgau), Univ., Diss, 2003
99. Schlichting R (2019) Spüllösungen in der Endodontie und ihre Aktivierung. Nicht ganz neu - trotzdem so wichtig. S.51-56. https://www.bzb-online.de/okt19/bzb1019_29.pdf. Zugriffen: 08.11.20
100. Scribante A, Contreras-Bulnes R, Montasser MA, Vallittu PK (2016) Orthodontics: Bracket Materials, Adhesives Systems, and Their Bond Strength. *Biomed Res Int* 2016. doi:10.1155/2016/1329814
101. Shetty S, Kahler SL, Kahler B (2017) Alkaline Material Effects on Roots of Teeth. *Materials (Basel)* 10(12). doi:10.3390/ma10121412
102. Shokouhinejad N, Nekoofar MH, Razmi H, Sajadi S, Davies TE, Saghiri MA, Gorjestani H, Dummer PMH (2012) Bioactivity of EndoSequence root repair material and bioaggregate. *Int Endod J* 45(12):1127–1134. doi:10.1111/j.1365-2591.2012.02083.x
103. Silva, Emmanuel João Nogueira Leal da, Santos CC, Zaia AA (2013) Long-term cytotoxic effects of contemporary root canal sealers. *J Appl Oral Sci* 21(1):43–47. doi:10.1590/1678-7757201302304
104. Silveira CMM, Pimpão MV, Fernandes LA, Westphalen VPD, Cavenago BC, Carneiro E (2019) Influence of Different Irrigation Solutions and Instrumentation Techniques on the Amount of Apically Extruded Debris. *Eur Endod J* 4(3):122–126. doi:10.14744/eej.2019.57966
105. Simon C (2015) Bakteriendichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen nach Einsatz verschiedener Obturationstechniken – Eine In-vitro-Studie. Marburg, Philipps-Universität Marburg, Diss., 2015. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hebis:04-z2015-04276>
106. Siqueira JF (2003) Microbial causes of endodontic flare-ups. *Int Endod J* 36(7):453–463. doi:10.1046/j.1365-2591.2003.00671.x
107. Söderholm K-J (1991) Correlation of in vivo and in vitro performance of adhesive restorative materials: A report of the ASC MD156 task group on test methods for the adhesion of restorative materials. *Dental Materials* 7(2):74–83. doi:10.1016/0109-5641(91)90049-5
108. Stelzer R, Gernhardt CR, Schaller H-G, Fuhrmann R, Knipping S Der Einfluss verschiedener endodontischer Spüllösungen auf die Push-out-Haftfestigkeit verschiedener Wurzelkanal-Sealer. Eine In-vitro-Studie. @Halle, Univ., Medizinische Fakultät, Diss., 2013. <https://opendata.uni-halle.de/handle/1981185920/8009>
109. Stelzer R, Schaller H-G, Gernhardt CR (2014) Push-out bond strength of RealSeal SE and AH Plus after using different irrigation solutions. *J Endod* 40(10):1654–1657. doi:10.1016/j.joen.2014.05.001

Abstract

110. Stevens RW, Strother JM, McClanahan SB (2006) Leakage and sealer penetration in smear-free dentin after a final rinse with 95% ethanol. *J Endod* 32(8):785–788.
doi:10.1016/j.joen.2006.02.027
111. Stuart CH, Schwartz SA, Beeson TJ, Owatz CB (2006) Enterococcus faecalis: its role in root canal treatment failure and current concepts in retreatment. *J Endod* 32(2):93–98.
doi:10.1016/j.joen.2005.10.049
112. Sun X, Li S, Wang S, Luo C, Hou B (2018) The evaluation of E. faecalis colonies dissolution ability of sodium hypochlorite in microenvironment by a novel device. *Biomed Microdevices* 20(2):36. doi:10.1007/s10544-018-0279-3
113. Taha NA, Ozawa T, Messer HH (2010) Comparison of three techniques for preparing oval-shaped root canals. *J Endod* 36(3):532–535. doi:10.1016/j.joen.2009.11.015
114. Tay FR, Pashley DH (2007) Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod* 33(4):391–398. doi:10.1016/j.joen.2006.10.009
115. Thiruvankadam G, Asokan S, John B, Priya PG (2016) Effect of 95% Ethanol as a Final Irrigant before Root Canal Obturation in Primary Teeth: An in vitro Study. *Int J Clin Pediatr Dent* 9(1):21–24. doi:10.5005/jp-journals-10005-1327
116. Timpawat S, Amornchat C, Trisuwan WR (2001) Bacterial coronal leakage after obturation with three root canal sealers. *J Endod* 27(1):36–39. doi:10.1097/00004770-200101000-00011
117. Topbas C, Adiguzel O (2017) Endodontic Irrigation Solutions: A Review. *Int Dent Res* 7(3):54. doi:10.5577/intdentres.2017.vol7.no3.2
118. Torabinejad M, Watson TF, Pitt Ford TR (1993) Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. *J Endod* 19(12):591–595. doi:10.1016/S0099-2399(06)80271-2
119. Tuncel B, Nagas E, Cehreli Z, Uyanik O, Vallittu P, Lassila L (2015) Effect of endodontic chelating solutions on the bond strength of endodontic sealers. *Braz Oral Res* 29. doi:10.1590/1807-3107BOR-2015.vol29.0059
120. Violich DR, Chandler NP (2010) The smear layer in endodontics - a review. *Int Endod J* 43(1):2–15. doi:10.1111/j.1365-2591.2009.01627.x
121. Weber T (2016) *Memorix Zahnmedizin*, 4. Aufl. Thieme, Stuttgart
122. White RR, Goldman M, Lin PS (1987) The influence of the smeared layer upon dentinal tubule penetration by endodontic filling materials. Part II. *J Endod* 13(8):369–374.
doi:10.1016/S0099-2399(87)80195-4
123. Wolf HF, Baumann MA, Beer R (Hrsg) (2008) *Endodontologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart

Abstract

124. Wollner J, Schloss T (2016) Biokeramische Wurzelkanalfüllmaterialien – schon praxisreif? Ein Überblick über bisher in der Endodontie verwendete Materialien und ihre Anwendungsmöglichkeiten. *Quintessenz Zahnmedizin* 2016(04/16):385–392
125. Wu MK, Fan B, Wesselink PR (2000) Diminished leakage along root canals filled with gutta-percha without sealer over time: a laboratory study. *Int Endod J* 33(2):121–125. doi:10.1046/j.1365-2591.2000.00274.x
126. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS (1983) A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3. *J Endod* 9(4):137–142. doi:10.1016/S0099-2399(83)80032-6
127. Zehnder M (2006) Root canal irrigants. *J Endod* 32(5):389–398. doi:10.1016/j.joen.2005.09.014
128. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M (2009) Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *J Endod* 35(7):1051–1055. doi:10.1016/j.joen.2009.04.022
129. Zhang W, Li Z, Peng B (2010) Effects of iRoot SP on mineralization-related genes expression in MG63 cells. *J Endod* 36(12):1978–1982. doi:10.1016/j.joen.2010.08.038
130. Zhang W, Li Z, Peng B (2010) Ex vivo cytotoxicity of a new calcium silicate-based canal filling material. *Int Endod J* 43(9):769–774. doi:10.1111/j.1365-2591.2010.01733.x
131. Zhang S, Yang X, Fan M (2013) BioAggregate and iRoot BP Plus optimize the proliferation and mineralization ability of human dental pulp cells. *Int Endod J* 46(10):923–929. doi:10.1111/iej.12082
132. Zhou H, Shen Y, Zheng W, Li L, Zheng Y, Haapasalo M (2013) Physical properties of 5 root canal sealers. *J Endod* 39(10):1281–1286. doi:10.1016/j.joen.2013.06.012

10 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
Abb.	Abbildung
AL	Arbeitslänge
ANOVA	analysis of variance (=Varianzanalyse)
Aqua dest.	Destilliertes Wasser
CHX	Chlorhexidindigluconat
DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
<i>E. faecalis</i>	Enterococcus faecalis
EBA	Ethoxybenzoic acid
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
F	Kraft
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
hPDLSCs	Human periodontal ligament stem cells
IL	Interleukin
IQ	Interquartilbereich
ISO	International organization of standardization
Min	Minute
Mm	Millimeter
MTA	Mineraltrioxidaggregat
MPa	Megapascal
MW	Mittelwert
N	Newton
NaOCl	Natriumhypochlorit
Ncm	Newtonzentimeter
P	Irrtumswahrscheinlichkeit
SD	standard deviation (=Standardabweichung)
Upm	Umdrehungen pro Minute
µm	Mikrometer
#	Größe
°	Grad
%	Prozent

>	größer als/mehr als
<	kleiner als/weniger als

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 cis-1,4-Polyisopren - Summenformel Guttapercha	12
Abbildung 2 <i>trans</i> -1,4-Polyisopren - Summenformel Guttapercha	12
Abbildung 3 - Wurzelkanalsealer Well-Root ST.....	16
Abbildung 4 - Vorbereitung der gesäuberten Zähne zum Röntgen - Befestigung mit Wachs auf der Speicherfolie	22
Abbildung 5 - Röntgenaufnahme vor Aufbereitung und Dekapitation, Kontrolle nach Aufbereitung mit und ohne Spreader	23
Abbildung 6 - Schema Prüfvorrichtung	25
Abbildung 7 - Übersicht Frakturmodi A, B, C	26
Abbildung 8 - Beispielhafte Darstellung der Frakturmodi: adhäsiver Bruch zum Dentin, gemischter Bruch, kohäsiver Bruch.....	26
Abbildung 9 - Boxplot-Diagramm der Haftkraft von Well Root ST in Abhängigkeit von der Spüllösung	28
Abbildung 10 - Gesamtverteilung der Frakturmodi	29

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Wurzelfüllmaterialien in der Übersicht [54, 122].....	13
Tabelle 2 - Einstellungen Universalprüfmaschine	24
Tabelle 3 - Explorative Daten und Normalverteilungsanalyse	27
Tabelle 4 - Paarweise Analyse mittels parametrischem Post-hoc-Test nach Gabriel (* = signifikanter p-Wert).....	28
Tabelle 5 - Prozentuale Verteilung der Frakturmodi.....	29

13 Materialliste

Artikel	Hersteller
Aqua dest.	B. Braun, Melsungen, Deutschland
<i>BioRaCe Feilen</i>	FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz
<i>CHX-Endo 2%</i>	Lege Artis, Dettenhausen, Deutschland
<i>C-Pilot Feilen ISO 15</i>	VDW, München, Deutschland
<i>Diamantschleifer Rotring</i>	Busch, Engelskirchen, Deutschland
Digitalspiegelreflexkamera <i>Canon EOS 500D</i> , <i>Micro-Objektiv Canon MP-E 65</i>	Canyon Inc., Tokyo, Japan
<i>EDTA 17%</i>	Wissenschaftliches Labor der Abteilung der Zahnerhaltungskunde, Philipps Universität Marburg, Deutschland
<i>EndoPilot</i>	Komet Dental, Lemgo, Deutschland
Ethanol 70% Hofmann's	Hofmann und Sommer, Königsee, Deutsch- land
<i>F360 – Feilen</i>	Komet Dental, Lemgo, Deutschlang
Kochsalzlösung 0,9%	B. Braun, Melsungen, Deutschland
<i>Eppendorf-Reaktionsgefäße 1,5 ml</i>	Eppendorf AG, Hamburg, Deutschland
<i>Minifix Messlehre</i>	VDW, München, Deutschland
Natriumhypochlorit 5,25%	Speiko – Dr. Speier GmbH, Bielefeld, Deutschland
Natriumazidlösung 0,001%	Wissenschaftliches Labor der Abteilung der Zahnerhaltungskunde, Philipps Universität Marburg, Deutschland
<i>Omnifix 2ml Spritzen</i>	B. Braun, Melsungen, Deutschland
Papierspitzen	Roeko, Langenau, Deutschland
<i>Rocatec – System</i>	3M ESPE, Seefeld, Deutschland
<i>Rotes Winkelstück</i>	KaVo, Biberach, Deutschland
<i>Scaler</i>	Hu-Friedy, Leimen, Deutschland
Skalpell No. 15	B. Braun, Melsungen, Deutschland
Stahl – Spreader	Komet Dental, Lemgo, Deutschland
Trimmer	Wassermann, Hamburg, Deutschland
Universalprüfmaschine <i>Zwick 1120</i>	ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutsch- land

Materialliste

<i>VMK Endoneedle</i>	Dr. Buquet, Dilbeek, Belgien
Boxing-Wachs	Yeti Dental, Engen, Deutschland
<i>Well – Root ST</i>	Vericom, Chuncheon-si, Gangwon-Do, Südkorea
Zitronensäure 40%	Apotheke des UKGM, Marburg, Deutschland

14 Spreaderauswertung – Frakturmodi

Aqua dest. (Gruppe A)	
Probennummer	Frakturmodus
002	Gemischt
003	Kohäsiv
005	Adhäsiv zum Dentin
006	Gemischt
007	Gemischt
013	Gemischt
021	Gemischt
028	Gemischt
035	Gemischt
150	Gemischt

CHX 2 % (Gruppe B)	
Probennummer	Frakturmodus
012'	Gemischt
013'	Gemischt
063	Kohäsiv
069	Gemischt
102	Gemischt
108	Gemischt
115	Gemischt
122	Gemischt
133	Gemischt
136	Gemischt

Spreaderauswertung – Frakturmodi

EDTA 17 % (Gruppe C)	
Probennummer	Frakturmodus
018	Kohäsiv
038	Kohäsiv
040	Kohäsiv
046	Gemischt
052	Gemischt
057	Gemischt
061	Gemischt
065	Kohäsiv
161	Gemischt
191	Kohäsiv

Ethanol 70 % (Gruppe D)	
Probennummer	Frakturmodus
000	Kohäsiv
010	Kohäsiv
064	Gemischt
111	Kohäsiv
117	Kohäsiv
120	Kohäsiv
123	Kohäsiv
129	Kohäsiv
135	Kohäsiv
138	Gemischt

Spreaderauswertung – Frakturmodi

NaOCl 5,25 % (Gruppe E)	
Probennummer	Frakturmodus
006'	Kohäsiv
009	Kohäsiv
015'	Gemischt
017'	Kohäsiv
018'	Kohäsiv
022'	Kohäsiv
025'	Gemischt
047	Gemischt
049	Gemischt
060	Gemischt

Zitronensäure 40 % (Gruppe F)	
Probennummer	Frakturmodus
028	Adhäsiv zum Dentin
048	Adhäsiv zum Dentin
054	Adhäsiv zum Dentin
101	Adhäsiv zum Dentin
106	Adhäsiv zum Dentin
116'	Adhäsiv zum Dentin
116''	Adhäsiv zum Dentin
116'''	Adhäsiv zum Dentin
128	Adhäsiv zum Dentin
131	Adhäsiv zum Dentin

15 Anhang

15.1 Verzeichnis akademischer Lehrer

Meine akademischen Lehrer an der Philipps-Universität Marburg waren folgende ProfessorInnen und DozentInnen:

Adamkiewicz, Arweiler, Auschill, Braun, Bremmer, Cetin, Czubayko, Feußer, Frankenberger, Gente, Hoch, Höffken, Korbmacher-Steiner, Lill, Lotzmann, Mittag, Moll, Mutters, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Oliver, Plant, Ramaswamy, Richter, Roggendorf, Weihe, Wrocklage

15.2 Danksagung

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr. Roland Frankenberger, für die Möglichkeit in der Poliklinik für Zahnerhaltung an der Universität Marburg promovieren zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn OA Priv. - Doz. Matthias J. Roggendorf für die Überlassung des Dissertationsthemas, die Unterstützung im experimentellen Teil, die Durchsicht des Manuskripts und der generell hervorragenden Betreuung.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr. Franz-Josef Faber und Herrn Dr. Hubert C. Roggendorf für die Möglichkeit, die Zwick-Universalprüfmaschine an der Universität Köln nutzen zu dürfen und dort entsprechend eingewiesen und unterstützt zu werden.

Bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Bruder bedanke ich mich für die Unterstützung und Motivation während meines gesamten Studiums und darüber hinaus.

Simone Klingelhöfer danke ich für diverse Probelesungen, die zum Erfolg meiner Promotion beigetragen haben.

Dr. Karolin De Angelis, Dr. Kristin Rosenberg und Dr. Nadine Hundertmark danke ich für den regelmäßigen fachlichen Austausch und Beistand.