

Aus dem Department für Zahn-, Mund-, Kieferheilkunde
der Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie
des Universitätsklinikums Halle (Saale)
Direktor: Prof. Dr. Hans-Günter Schaller

**Der Einfluss verschiedener endodontischer Spüllösungen auf die
Push-out-Haftfestigkeit verschiedener Wurzelkanal-Sealer –
eine In-vitro-Studie**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Zahnmedizin (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von: Reimund Stelzer
geboren am 22.08.1983 in Halle (Saale)

Betreuer: PD Dr. med. dent. habil. Christian Gernhardt

Gutachter: 1. Prof. Dr. med. dent. habil. Hans-Günter Schaller
2. Prof. Dr. med. Dr. med. dent. habil. Robert Fuhrmann
3. Prof. Dr. med. habil. Stephan Knipping

eingereicht am: 30.01.2013

verteidigt am: 30.10.2013

Für meine Familie

Referat

Ziel dieser In-vitro-Studie war es, unter Einsatz des Mikro-Ausstoßversuchs zum einen die Haftung von zwei Obturationsmaterialien an unbehandelten Wurzelkanalwänden zu bestimmen und zum anderen mögliche Veränderungen der Haftung durch den Einsatz ausgewählter Spüllösungen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden 200 menschliche, standardisiert aufbereitete Wurzelkanäle mit isotonischer Kochsalzlösung, Natriumhypochlorit, EDTA und CHX vorbehandelt und anschließend mit Guttapercha/AH Plus™ oder RealSeal™ (Resilon™)/RealSeal SE™ gefüllt. Die Wurzeln wurden in 1 mm dünne, transversale Scheiben geschnitten und deren Wurzelfüllmaterial wurde mittels passender Stempel in einer Universalprüfmaschine herausgedrückt. Die Haftung der Materialien ergab sich aus den maximal gemessenen Kräften und der Fläche der Kanalwände. Letztere konnten durch lichtmikroskopische Vermessung der Wurzelkanalumfangs und den Scheibendicken bestimmt werden. Insgesamt gingen 600 Proben verteilt auf zehn Versuchsreihen in die Untersuchung ein. AH Plus™ zeigte keine signifikanten Veränderungen der Haftfestigkeit in Abhängigkeit vom Spülprotokoll, sodass beim Einsatz von isotonischer Kochsalzlösung 2,58 (\pm 1,30) MPa erreicht wurden. Demgegenüber waren die Haftwerte von RealSeal SE™ bei einer alleinigen Spülung mit isotonischer Kochsalzlösung mit 2,08 (\pm 0,79) MPa zwar tendenziell niedriger, aber nicht signifikant verschieden von AH Plus™. Allerdings schwankten beim adhäsiven Wurzelfüllmaterial die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Art der Vorbehandlung. So verringerte sich die Haftung beim Einsatz von Natriumhypochlorit (ohne Abschlusspülung), EDTA und CHX auf ungefähr die Hälfte der entsprechenden Kontrollgruppe und lag damit signifikant unter den Werten von AH Plus™. Unter Berücksichtigung der Limitationen dieser In-vitro-Studie lässt sich schlussfolgern, dass das neuartige Wurzelfüllmaterial Resilon™ in Kombination mit dem selbstkonditionierenden Sealer RealSeal SE™ keine Verbesserung in Bezug auf die Haftfestigkeit an der Wurzelkanalwand gegenüber einer Obturation mit Guttapercha/AH Plus™ erzielt. Das Mikro-Ausstoßverfahren wird zunehmend verwendet, um die Haftung von Wurzelfüllmaterialien an den Kanalwänden zu untersuchen. In Verbindung mit Methoden der artifiziellen Alterung, der Simulation von Kaubelastungen und dem Vergleich der Ergebnisse zwischen verschiedenen Wurzelniveaus ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Fragestellungen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Pulpa-Dentin-Einheit	3
2.2	Erkrankungen der Pulpa und des Periapex	5
2.3	Wurzelkanalbehandlung	6
2.3.1	Mechanische Aufbereitung	9
2.3.2	Chemische Aufbereitung	11
2.3.3	Wurzelfüllung	13
2.4	Dentin-adhäsiver Verbund	16
2.5	Polymerisation im Wurzelkanal	18
2.6	Testmethoden	20
3	Zielstellung	23
4	Material und Methoden	23
4.1	Versuchsplanung	23
4.2	Material	24
4.2.1	Wurzelfüllmaterialien und Sealer	24
4.2.2	Spüllösungen	25
4.3	Methode	26
4.3.1	Auswahl und Vorbereitung der Wurzeln	26
4.3.2	Aufbereitung	26
4.3.3	Wurzelkanalfüllung	27
4.3.4	Herstellung der Wurzelscheiben	29
4.3.5	Bestimmung der Push-out-Haftkraft	30
4.3.6	Bestimmung der Push-out-Haftfestigkeit	32
4.4	Statistik	34

5	Ergebnisse	35
6	Diskussion	49
6.1	Diskussion der Methodik	49
6.1.1	Push-out-Test	49
6.1.2	Versuchszähne	51
6.1.3	Probenherstellung	52
6.2	Diskussion der Ergebnisse	56
7	Zusammenfassung	64
8	Literaturverzeichnis	67
9	Thesen	77
	Tabellarischer Lebenslauf	
	Selbstständigkeitserklärung	
	Erklärung über frühere Promotionsversuche	
	Danksagung	

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

4-META	4-Methacryltrioxyethyltrimellitananhydrid
Abb.	Abbildung
Bis-GMA	Bisphenol-A-Glycidyl-Methacrylat
bzw.	beziehungsweise
CHX	Chlorhexidindigluconat
EBPADMA	Ethoxyliertes Bisphenol-A-Dimethacrylat
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
et al.	und andere
Gew%	Massenprozent
ggf.	gegebenenfalls
H ₂ O	Isotonische Kochsalzlösung
HClO	Hypochlorige Säure
HEMA	2-Hydroxyethylmethacrylat
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
MMPs	Matrix-Metalloproteinasen
MPa	Megapascal
N	Newton
NaOCl	Natriumhypochlorit
o. g.	oben genannt
Tab.	Tabelle
u. a.	unter anderem
U/min	Umdrehungen pro Minute
Vol%	Volumenprozent

1 Einleitung

Voraussetzung für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist neben der Schaffung eines keimfreien Milieus ein dauerhaft dichter Verschluss der behandelten Wurzelkanalsysteme (Siqueira, 2001). Zu diesem Ziel können während und vor allem nach der mechanischen Aufbereitung Spüllösungen mit unterschiedlichen antibakteriellen Eigenschaften eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe sollen persistierende Mikroorganismen und deren Substrat aus von der Aufbereitung nicht erfassten Bereichen entfernt werden.

Jedes der eingesetzten Agenzien hat eine andere chemische Wirkung – allerdings ist keine Spüllösung in der Lage, alle Anforderungen zu erfüllen. Daher werden in der klinischen Praxis einzelne Lösungen entsprechend ihrer Indikation ausgewählt oder es kommen Kombinationen aus mehreren Lösungen in einem sogenannten Spülprotokoll zum Einsatz. Im Anschluss an die chemo-mechanische Aufbereitung werden Wurzelfüllstifte und -pasten („Sealer“) eingesetzt, die den entstandenen Hohlraum füllen und dauerhaft verschließen, um eine Reinfektion zu verhindern. Für diese Aufgabe haben sich Guttapercha-Stifte zusammen mit dem auf Epoxidharz basierenden Sealer AH Plus™, als konventionelles Wurzelfüllmaterial – und Goldstandard – durchgesetzt.

Dem steht das zunehmende Bestreben gegenüber, Verfahren aus der adhäsiven Füllungstherapie auch im Bereich der Endodontie einzusetzen. So wurde Anfang des neuen Jahrtausends das adhäsive Wurzelfüllmaterial Resilon™ (Resilon™ Research, Conn., USA) vorgestellt, das unter dem Handelsnamen RealSeal™ erhältlich ist. Seine auf Polyester-Polymer basierenden Bestandteile sollen einen festen Verbund sowohl zwischen dem niedrig-viskosen Sealer und der Wurzelkanalwand als auch mit den Resilon™-Stiften ermöglichen. Frühe Untersuchungen zeigten vielversprechende Ergebnisse. So propagierten Teixeira et al. 2004 die Möglichkeit, mit Hilfe von Resilon™ einen festen „Monoblock“ zu schaffen. Auf diese Weise sollten die durch die mechanische Aufbereitung geschwächten Wurzeln gegen Frakturen gestärkt und zusätzlich die Wurzelkanäle durch die adhäsive Technologie abgedichtet werden (Teixeira et al., 2004b).

Jedoch bestehen bei der Anwendung von adhäsiven Verfahren in der Endodontie auch Schwierigkeiten. So können der Zugang zu den apikalen Wurzelkanalbereichen, die Kontrolle der Feuchtigkeit und die Applikation der Materialien problematisch sein. Zusätzlich steigt der C-Faktor deutlich über die aus der restaurativen Füllungstherapie bekannten Werte (Tay et al., 2005a). Da die Spüllösungen nicht nur antibakteriell wirken, sondern auch Veränderungen am Wurzelentin hervorrufen können und außerdem durch Rückstände direkte Wechselwirkungen mit den Wurzelfüllmaterialien entstehen können, müssen sie auch als potenzielle Ursache von Haftungsveränderungen betrachtet werden.

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Haftung von zwei Wurzelfüllmaterialien – Guttapercha/AH Plus™ und RealSeal™, in Kombination mit dem selbstkonditionierenden Sealer RealSeal SE™ – am Wurzelkanal-Dentin nach Vorbehandlung mit isotonischer Kochsalzlösung, Natriumhypochlorit, EDTA und CHX als Spüllösungen zu bestimmen. Als Testverfahren für diese In-vitro-Studie diente das Mikro-Ausstoßverfahren an dünnen Proben („thin-slice push-out test“).

2 Literaturübersicht

2.1 Pulpa-Dentin-Einheit

Makroskopisch können am menschlichen Zahn Krone, Hals und Wurzel unterschieden werden. Die Zahnkrone überragt die Gingiva, die wiederum den Zahnhals bedeckt. Eine oder mehrere Wurzeln dienen der Verankerung des Zahnes im Kieferknochen. Die Hauptmasse des Zahnes besteht aus Dentin, das man als innere Hartschicht sowohl in der Wurzel als auch in der Krone findet. Dem Dentin aufgelagert sind Schmelz im Bereich der Krone sowie Zement im Bereich der Wurzel. Das Dentin besteht zu ca. 70 Gew% aus anorganischer Substanz, vor allem Phosphat und Kalzium in Form von Hydroxylapatit-Kristallen, sowie Spurenelementen. Die organischen Bestandteile, mit einem Hauptanteil von Kollagen Typ I und Kollagenartigen Verbindungen, sind für ca. 20 Gew% verantwortlich. Der Rest ist Wasser (Welsch, 2005).

Das Dentin umschließt die Pulpa und bildet mit ihr die funktionelle „Pulpa-Dentin-Einheit“, auch Endodont genannt (Mjör et al., 2001b; Welsch, 2005). An der Pulpa-Dentin-Grenzfläche befinden sich die Zellkörper der Odontoblasten. Sie unterhalten das Dentin nach Abschluss der Zahnbildung physiologisch mittels Bildung von Sekundärdentin. Von jeder dieser Zellen erstreckt sich ein in einem Dentinkanälchen liegender Fortsatz, die Tomes-Faser. Diese verläuft leicht geschwungen und im rechten Winkel zur Pulpa-Dentin-Grenze bis ins periphere Dentin. Ihr Durchmesser beträgt ca. 2 μm und sie verengt sich mit zunehmendem Abstand vom Zellkörper. So kann das Lumen der Dentinkanälchen (Tubuli) Pulpa-nah bis zu 80 % der Gesamtquerschnittsfläche des Dentins ausmachen, Pulpa-fern sinkt der Anteil auf ca. 4 %.

Die Odontoblastenfortsätze haben 0,35 bis 0,6 μm dicke Seitenäste (Mikrovilli), die tief in das intertubuläre Dentin reichen und mit Mikrovilli der benachbarten Zellen in Kontakt stehen können (Hellwig et al., 2003). Anzahl, Dimension und Verteilung der Tubuli sind bei jungen und älteren Menschen, aber auch individuell und in Abhängigkeit vom Zahntyp sehr verschieden. Zusätzlich gibt es eine ausgeprägte Variabilität je nach der Lokalisation innerhalb eines Zahnes. So fanden Ferrari et al. (2000) im koronalen Wurzelndentin ca. 36.000, im mittleren Drittel ca. 28.000 und im apikalen Bereich ca. 23.000 Tubuli je mm^2 . Demgegenüber fanden Mjör et al. im apikalen Pulpa-nahen Wurzelndentin 14.400 und im peripheren Wurzelndentin 2.500 Tubuli je mm^2 . Die Dichte der Dentintubuli an der Pulpa-Dentin-Grenze nimmt somit von ca. 40.000 am koronalen Kronendentin auf ca. 14.400 je mm^2 am apikalen Wurzelndentin ab. Das Oberflächenverhältnis von Tubuli zu festem Dentin verändert sich demnach von koronal nach apikal zu Gunsten der festen Dentinoberfläche (Mjör et al., 2001a).

Die Odontoblasten bilden zeitlebens neues Dentin an der Pulpa-Dentin-Grenzschicht. Dieses junge Dentin ist am Beginn der Dentinogenese zunächst nicht-mineralisiert (Prädentin). Mit

steigendem Lebensalter erhöht sich der Mineralgehalt durch Bildung und Konflusion von Kalkglobuli (Zwischendentin, Zone der Mineralisation). Ist die Mineralisation unvollständig, so können hypomineralisierte Bereiche persistieren (Interglobulardentin) (Welsch, 2005). Nach peripher folgt als älteste Schicht das vollständig mineralisierte, zirkumpulpale Manteldentin mit geringerer Mineralisation. Hier verzweigen sich die Mikrovilli stark. In Richtung des bestehenden Dentins bilden die Odontoblasten auch nach dem Abschluss der Zahnentwicklung zeitlebens neues Dentin. Dies kann regulär in Form von Sekundärdentin geschehen, aber auch als Reaktion auf pathologische Reize als Tertiärdentin (Lehmann und Hellwig, 2004). Im axialen Schnittbild liegt zwischen der Wand der Dentinkanälchen und den Tomesschen Fasern der periodontoblastische Raum, der gefüllt ist mit Flüssigkeit und Strukturelementen. Die Odontoblastenfortsätze bilden an den Wänden der Dentinkanälchen das peritubuläre Dentin, das kaum Kollagen enthält und von allen Dentintypen am stärksten mineralisiert ist (Marshall et al., 1997). Die Bildung des peritubulären Dentins führt zur allmählichen Verengung der Kanälchen und kann in der vollständigen Obliteration münden (Mjör et al., 2001b). Zwischen den Tubuli befindet sich das weniger stark mineralisierte intertubuläre Dentin mit einem über 50 %igen Anteil an kollagenem Faserwerk.

Die Pulpa besteht als spezialisierte Form des Bindegewebes aus dessen Elementen und gehört zum mesenchymalen Gewebe mit einem hohen Wasseranteil. Die Grundsubstanz der Pulpa besteht im Wesentlichen aus Glykosaminoglykanen und Proteoglykanen, in die alle weiteren Zellen, vergleichbar mit einem anastomosierenden Netz, eingelagert sind. Dazu gehören unter anderem Fibroblasten, Lymphgefäße, freie Zellen der Abwehr, undifferenzierte Mesenchymzellen (Ersatzzellen), Nerven- und retikuläre Fasern, Fibrillen kollagener und präkollagener Art sowie ein Netz von Blutgefäßen. Alle Zellen der Pulpa können aus den undifferenzierten Zellen des Grundgewebes nachgebildet werden. Durch die lebenslange Apposition von Sekundär- und ggf. Tertiärdentin, gebildet von der die Pulpa als einteiliger Zellsaum auskleidenden Odontoblastenschicht, kommt es mit zunehmendem Lebensalter zur Verkleinerung des Pulpencavums (Hellwig et al., 2003). In engem Kontakt zu den Odontoblasten bilden marklose und dünn myelinisierte Nervenfasern den Raschkowschen Plexus. Das daran angrenzende Pulpagewebe ist im Vergleich zu anderen Pulpabereichen zellarm (Weil-Zone). Der Umriss der Wurzelkanäle folgt im Querschnitt in etwa dem der Wurzel. Im Bereich der Wurzelpulpa gibt es häufig Seitenkanälchen, die als Ausläufer der Pulpa eine Verbindung zum Desmodont herstellen. An der Wurzelspitze sind diese Ausläufer besonders zahlreich und werden als apikale Ramifikationen bezeichnet (Lehmann und Hellwig, 2004). Aufgrund der Verbindungen zum benachbarten Gewebe weiten sich Erkrankungen der Pulpa häufig auf das umgebende Parodont aus. Die Kanäle einer Wurzel können verschiedene Konfigurationen annehmen. So kann bei der Einteilung nach Weine (1989) neben einem

einzelnen durchgehenden Kanal (Typ I) auch ein sich apikal aufspaltender Kanal beobachtet werden (Typ IV). Außerdem sind zwei vollständig getrennt verlaufende Kanäle in einer Wurzel möglich (Typ III) sowie sich erst apikal vereinigende Verläufe (Typ II). Zu- und Abfluss der Blut-, Lymph- und Nervenbahnen erfolgen hauptsächlich über das Foramen apicale an der Wurzelspitze, dessen engste Stelle (physiologischer Apex) einen Durchmesser von 0,15 bis 0,25 mm aufweist. Hauptaufgabe der Pulpa ist die Ernährung und Bildung des Dentins sowie die Rezeption von äußeren Reizen (Hellwig et al., 2003).

2.2 Erkrankungen der Pulpa und des Periapex

Die gesunde, funktionelle Pulpa-Dentin-Einheit reagiert auf ausreichend starke Irritationen mit einer Sklerose der Dentintubuli, der Bildung von Tertiärdentin an der Pulpa-Dentin-Grenze und einer Entzündung der Pulpa („Pulpitis“) (Guertzen et al., 1993). Eine besonders große Bedeutung kommt dabei Bakterien bzw. Mikroorganismen der Mundhöhle und ihren Stoffwechselprodukten zu (Kakehashi et al., 1965), mit denen die Pulpa infolge einer tiefen Karies in Kontakt kommt. Bei anhaltender Reizung können sich verschiedene Formen der Pulpitis ausbilden. Eine histologisch exakte Diagnose lässt sich in vivo naturgemäß kaum stellen (Ketterl, 1993). Aus diesem Grund beschränkt man sich klinisch auf die Diagnose einer reversiblen bzw. irreversiblen Pulpitis. Letztere imponiert durch quälend starke und anhaltende Schmerzen. Sie mündet in einer Nekrose der Pulpa und kann bei ausbleibender Therapie zu Erkrankungen des periapikalen Gewebes führen (Cujé und Hülsmann, 2011). Neben der bereits erwähnten entzündlichen Kolliquationsnekrose durch Bakterien und ihre Toxine sind diverse andere Ursachen einer Pulpa-Nekrose bekannt. So kann eine traumatische Unterbrechung der Durchblutung zu einer Ischämie und anschließender Koagulationsnekrose führen. Traumatisch bedingte Zahnfrakturen ermöglichen bei ausreichend großem Hartsubstanzverlust ebenfalls die Invasion von Erregern. Iatrogene Pulpitiden können durch eine unzureichende Kühlung oder durch Übertrocknung während der Präparation auftreten. Außerdem ist eine bakterielle Invasion in Folge einer fortgeschrittenen tiefen Parodontitis möglich. Zusätzlich wirken viele häufig verwendete zahnärztliche Materialien irritierend auf die Pulpa. Entscheidend für den Grad der Pulpa-Reizung sind meist Dauer und Intensität der Irritation sowie die Dicke und Beschaffenheit der Restdentin-Schicht (Hellwig et al., 2003).

Der Ablauf einer Pulpitis ist vergleichbar mit Entzündungen in anderen Geweben. Der entscheidende Unterschied besteht in der vollständigen Ummantelung der Pulpa durch das Zahnhartgewebe, weshalb bei steigendem intrapulpaem Druck keine Ausdehnungsmöglichkeit besteht. Wenn ein Reiz lange und intensiv genug einwirkt, kann aus dem lokalen Geschehen eine generalisierte Pulpitis werden. So findet nach der vaskulären Phase auch eine zelluläre Immunantwort statt. Dabei wandern zuerst neutrophile Granulozyten Chemotaxis-gesteuert ein.

Wird der verursachende Reiz zu diesem Zeitpunkt entfernt, ist eine Ausheilung der Pulpitis möglich. Bei weiterhin bestehender Irritation wandern immer mehr Granulozyten ein und verursachen mit ihrem Zelltod – durch die Freisetzung von toxischen zellulären Bestandteilen sowie proteolytischen Enzymen – auch Schäden in eigentlich gesunden Pulpateilen. Dieser Prozess kann final in einer Nekrose der Pulpa münden. Neben dem akuten Entzündungsverlauf ist auch eine chronische Manifestation möglich (Hülsmann, 2008).

Die Infektion der Pulpa bzw. des betroffenen Wurzelkanals erfolgt in der Regel durch Bakterien der normalen Mundhöhlen-Flora. Ein besonders pathologischer Verlauf stellt sich nach erfolgter Invasion und weitgehendem Verschluss des Endodonts ein. Dann kommt es zu einem selektiven Wachstum bestimmter, zumeist obligat anaerober Bakterienarten. Generell besteht die Möglichkeit, dass sich das Entzündungsgeschehen – in Folge einer Infektion der Pulpa bzw. eines bakteriell besiedelten Wurzelkanals – über das Foramen apikale oder Seitenkanäle auf das Parodont ausbreitet (Parodontitis apikalis) (Cujé und Hülsmann, 2011). Daran können sich eine Resorption des periapikalen Alveolarknochens sowie die Bildung von Granulomen und Zysten anschließen. Diese Veränderungen müssen von anderen Erkrankungen ohne Beteiligung einer Pulpitis differentialdiagnostisch abgegrenzt werden. Auf Grund der günstigeren Situation für das Immunsystem stellt sich im Parodont häufig ein Gleichgewicht zwischen Angriff und Immunantwort ein. Chronische Verlaufsformen sind dabei häufig. Eine vereinfachte Einteilung der apikalen Parodontitiden kann wie folgt geschehen (Guertzen et al., 1993):

- Parodontitis apikalis acuta
- Parodontitis apikalis chronica (Granulom, Zyste)
- akuter apikaler Abszess
- chronischer apikaler Abszess

Wird die – meist infektiöse – Ursache einer periapikalen Veränderung beseitigt, kann mit einer Heilung gerechnet werden (Gängler et al., 2010).

2.3 Wurzelkanalbehandlung

Epidemiologische Studien zeigen, dass die Anzahl der Wurzelkanalbehandlungen im Verlauf der letzten Jahrzehnte national und international stetig zugenommen hat (Hülsmann, 2008). Laut Statistischem Jahrbuch der KZBV von 2011 stieg in den alten Bundesländern die Anzahl der Wurzelkanalbehandlungen seit 1970 von 3,16 Mio. auf 6,28 Mio. im Jahr 2011. Im gleichen Zeitraum sank die Zahl der Extraktionen von 17,18 Mio. auf 10,9 Mio. (Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung, 2012).

Die Wurzelkanalbehandlung – als eine Möglichkeit der endodontischen Therapie – dient im Wesentlichen der funktionellen Erhaltung von Zähnen, bei denen eine Vitalerhaltung nicht mehr

möglich ist. Wichtige Indikationen für eine solche Maßnahme sind irreversible Pulpitiden bzw. irreversibel geschädigte Pulpen und Pulpanekrosen, intentionelle Devitalisierung aus parodontalen oder prothetischen Gründen sowie apikale Parodontitiden. Als Kontraindikationen gelten Zähne, die in ihrer Funktion nicht wiederhergestellt werden können ebenso wie eine unzureichende parodontale Verankerung, eine ablehnende Patientenhaltung und mangelhafte Mundhygiene. Bei einigen Patienten muss aus allgemeinmedizinischen Gründen von einer zahnärztliche Therapie abgesehen werden (Hellwig et al., 2003).

Die Erhebung der für eine Therapieentscheidung notwendigen Befunde erfolgt während der allgemein- und zahnmedizinischen Anamnese. Letztere umfasst eine extra- und eine intraorale Untersuchung. Das Augenmerk fällt somit nicht nur auf die Zähne selbst, sondern auch auf Mundschleimhaut und -hygiene, das Parodont, vorhandene Restaurationen und die Abklärung von möglichen Schwellungen und Fisteln. Bei Verdacht auf eine Erkrankung der Pulpa können im Verlauf der intraoralen Inspektion insbesondere die Perkussion der Zähne, die Palpation des Kieferkamms, eine Prüfung auf pathologische Zahnbeweglichkeit, die Sondierung des Parodonts, Sensibilitätstests und Röntgenuntersuchungen entscheidende Hinweise liefern.

Das Ziel der Wurzelkanalbehandlung lässt sich im Kern mit der Entfernung von pathogenen Mikroorganismen aus dem Endodont bzw. der dauerhaften Verhinderung einer Infektion desselben zusammenfassen. Dieser Grundgedanke beruht auf der Erkenntnis, dass pathologische pulpale und periapikale Prozesse fast immer im Zusammenhang mit Bakterien entstehen (Kakehashi et al., 1965). Im Verlauf der Wurzelkanalbehandlung müssen somit folgende Maßnahmen umgesetzt werden (nach Bergenholtz, 1990):

- striktes Befolgen aseptischer Behandlungsregeln
- chemo-mechanische Säuberung des Wurzelkanalsystems
- Verwendung antibakterieller Zwischeneinlagen
- Verschluss des Wurzelkanals mit einer definitiven und dichten Wurzelfüllung

Folglich wird nach gestellter Indikation zur endodontischen Therapie – und möglicher Lokalanästhesie – ein keimfreies Arbeitsfeld mittels Kariesexkavation, eventuell einer Aufbaufüllung und Kofferdamm hergestellt. Anschließend wird mit rotierenden diamantierten Instrumenten eine zweckmäßige Zugangskavität geschaffen und das Pulpakammerdach vollständig abgetragen. Dies ist eine Voraussetzung für die sichere Lokalisation aller Wurzelkanäle am Pulpakammerboden und ermöglicht ein spannungsfreies Einbringen der Wurzelkanalinstrumente. Der Lokalisation der Wurzelkanäleingänge folgend, werden die Kanäle aufbereitet und das meist infizierte Pulpagewebe wird entfernt. Dazu sind unterschiedliche Techniken in Gebrauch, die sämtlich auf einer Kombination von mechanischen

und chemischen Verfahren beruhen. Dieses Vorgehen dient während der laufenden Therapie dazu, vitales und nekrotisches Pulpagewebe vollständig zu beseitigen. Durch die mechanische Aufbereitung werden Wurzelkanäle und Dentinwände grob von Mikroorganismen und organischem Material befreit. Gleichzeitig wird das Kanallumen vergrößert, wodurch sich ein leichter Zugang zu den weiter apikal liegenden Wurzelkanalbereichen und eine verbesserte Wirkung der desinfizierenden Spüllösungen ergeben. Durch die Aufbereitung wird die vollständige Obturation mittels Formgebung des Wurzelkanalsystems ermöglicht (Grossman, 1988). Als Teilschritt während der Aufbereitung muss für jeden Kanal die notwendige Arbeitslänge ermittelt werden, meist unter Verwendung von Röntgenaufnahmen oder elektrometrischen Verfahren. Nach erfolgter Trocknung der Kanäle kann die Wurzelfüllung mit einem von zahlreichen auf dem Markt verfügbaren Materialien erfolgen, sofern die Aufbereitung vollständig und der Zahn – nach einer medikamentösen Zwischeneinlage und einer angemessenen Heilungszeit – klinisch symptomlos ist (European Society of Endodontology, 2006).

Die ideale Wurzelkanalfüllung sollte bis zur apikalen Konstriktion – dem endodontischen Apex – bzw. kurz davor reichen. Der endodontische oder auch physiologische Apex liegt meist ca. 1 mm von der röntgenologischen Wurzelspitze entfernt. Eine Aufbereitung bis über diese engste Stelle des Wurzelkanals hinaus kann bei einer vitalen Pulpa zu einer mechanischen oder chemischen Irritation des periapikalen Gewebes führen. Bei nekrotischer oder infizierter Pulpa führt eine Überinstrumentierung zum Verschleppen von Erregern in das apikale Parodont (Bergenholtz, 1990). Zur dauerhaften Sicherung des aseptischen Zustands des Wurzelkanalsystems ist weiterhin ein speicheldichter koronaler Verschluss erforderlich (Lin et al., 1992; Siqueira et al., 2000; Siqueira, 2001).

Die Faktoren, die zum Scheitern einer Wurzelkanalbehandlung führen können, sind vielfältig. Zum einen sind Fehler bei der Indikationsstellung zu nennen, aber auch anatomische Besonderheiten können die Aufbereitung erschweren oder vollständig verhindern. Außerdem können Misserfolge durch die iatrogene Intervention, insbesondere während der mechanischen Aufbereitung, bedingt sein. Dazu gehören unter anderem eine zu kleine Zugangskavität, Perforationen, Blockaden des Wurzelkanals oder unzureichender bzw. exzessiver Dentinabtrag. Aber auch die Qualität der Obturation und die Länge der Wurzelfüllung sind wichtige Einflussfaktoren. Nach Abschluss der Therapie können Traumen, Frakturen und undichte Restaurationen die Prognose des Zahnes verschlechtern (Mills, 1999). Als Hauptursache für den fehlenden Therapieerfolg wird im Allgemeinen eine persistierende Infektion bzw. Reinfektion des Endodonts angesehen (Lin et al., 1992; Schmalz, 1990; Siqueira, 2001). Wurzellängsfrakturen treten bei ca. 2,6 bis 4 % aller wurzelkanalbehandelten Zähne auf. Sie stehen im ursächlichen Zusammenhang mit einem hohen Substanzverlust, bedingt durch Karies

oder die Aufbereitung. Traumen in Folge von Unfällen, aber auch physiologische Belastungen können plötzliche Frakturen auslösen, wohingegen chronisch subkritische und parafunktionelle Einflüsse zu Ermüdungsbrüchen führen können (Sedgley und Messer, 1992; Hülsmann, 2008; Tang et al., 2010).

Studien, die die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Wurzelkanalbehandlung untersuchen, kommen häufig zu stark abweichenden Ergebnissen, was an den unterschiedlichen Ausgangssituationen und der unzureichenden Definition der Kriterien einer „erfolgreichen“ Therapie liegen kann. In einer wissenschaftlichen Stellungnahme von 2001 fassten DGZMK und DGZ die verfügbare Literatur zusammen und fanden bei Zähnen mit einer irreversiblen Pulpitis oder Pulpanekrose ohne assoziierte periapikale Läsion bei primärer Wurzelkanalbehandlung eine Erfolgsrate von 85 bis 95 %. Demgegenüber steht ein durchschnittlicher positiver posttherapeutischer Verlauf zu 70 bis 85 % bei Zähnen mit infiziertem Endodont und periapikaler Läsion gegenüber. Diese Daten müssen allerdings unter dem Aspekt der Beobachtungszeit von einem bis fünf Jahren beurteilt werden. Ein längeres Zeitintervall führt zu niedrigeren Erfolgsraten (Schmalz, 1990).

2.3.1 Mechanische Aufbereitung

Zur Formgebung und mechanischen Reinigung der Wurzelkanäle werden Handinstrumente und/oder maschinelle Verfahren eingesetzt. Die verwendeten Instrumente bestehen aus Chrom-Nickel-Edelstahl, Titan oder Nickel-Titan (NiTi) und werden aus Rohlingen mit verschiedenen Querschnitten – zum Beispiel dreieckig, viereckig oder rund – mittels Fräsen oder Verwindung gefertigt. Die mechanischen Eigenschaften der Instrumente leiten sich aus ihrem Material, dem Querschnitt, der Größe des Spanraums und des Kerns sowie ihrem Schneidekantenwinkel ab. Instrumente aus Edelstahl können vorgebogen werden und minimieren so die Gefahr, den Wurzelkanalverlauf bei der Aufbereitung zu verlagern („elbow-zip“ Effekt). Nickel-Titan-Instrumente weisen ein geringeres Elastizitätsmodul und ein kleineres Biegemoment als Edelstahlinstrumente auf, ihre Torsionsfestigkeit ist jedoch höher. Sie können nicht vorgebogen werden und nehmen nach der Verwendung im Wurzelkanal ihre ursprüngliche Form wieder an (pseudoelastisches Verhalten und „memory effect“). Titan-Instrumente haben bei vergleichbarer Frakturresistenz wie Edelstahlinstrumente eine höhere Flexibilität, weshalb sie bevorzugt bei gekrümmten Kanälen eingesetzt werden (Hellwig et al., 2003).

Das grundsätzliche Ziel der mechanischen Aufbereitung ist die Reinigung und Formgebung der Wurzelkanäle, ohne ihren Verlauf zu ändern. Dabei soll der aufbereitete den ursprünglichen Kanal vollständig einschließen und gleichzeitig ein zu hoher Verlust an Hartschubstanz vermieden werden. Eine gleichmäßig konische Form vom Apex bis zur Zahnkrone ermöglicht bei einem ausreichend großen Lumen des Kanals eine effiziente Spülung. Außerdem ermöglicht der Erhalt der apikalen Konstriktion ein gutes Kondensieren des Wurzelfüllmaterials (Schilder, 1974).

Die Aufbereitung der Wurzelkanäle kann mittels Handinstrumenten durch drehende und feilende Bewegungen erfolgen. Allen manuellen Wurzelkanalinstrumenten gemeinsam ist ihr Aufbau aus Griff, Schaft und Arbeitsteil. Die Dicke des Instruments, in Hundertstel Millimeter gemessen von einem Punkt (D1) mit 1 mm Abstand zur Instrumentenspitze, wird durch die Größenangabe (ISO-Norm) ausgewiesen. Der Durchmesser nimmt entlang des Arbeitsteils kontinuierlich zu und ist am Punkt D2 im Abstand von 16 mm zur Instrumentenspitze um 0,32 mm größer. Diese Steigerung des Durchmessers von 0,02 mm je Millimeter Länge des Arbeitsteils entspricht einer Konizität von 2 % (Hülsmann, 2008). Neuere NiTi-Instrumente werden auch mit Konizitäten von 4, 6, 12 % oder mehr angeboten. Auch sind variierende Konizitäten entlang von maschinellen Aufbereitungsinstrumenten möglich (Hülsmann, 2002b).

Für den klinischen Einsatz sind Elastizität, Schneidleistung und Bruchsicherheit der verwendeten Instrumente von großer Bedeutung. Ein hoher Biege- und Steifigkeitswiderstand, die mit steigender ISO-Größe zunimmt, sind typisch für Edelmetallinstrumente (Camps und Pertot, 1994). Bei deren Anwendung können Verlust der Arbeitslänge, Stufenbildung, Perforationen und Begradigungen der apikalen Bereiche in gekrümmten Kanälen auftreten (Schäfer und Lohmann, 2002).

Für eine schnellere und effizientere Wurzelkanalpräparation wurden unter anderem Aufbereitungsverfahren unter Verwendung von maschinell angetriebenen Geräten entwickelt. Diese Antriebssysteme können mit verschiedenen Instrumenten zur rotierenden Aufbereitung der Kanäle verwendet werden. Wichtige Konstruktionsmerkmale der maschinellen Ni-Ti-Systeme nach Hülsmann (2002b) sind: nicht-schneidende Instrumentenspitze (Batt-Spitze), variierende Konizität, variierende Länge des Arbeitsteils und seitliche Führungsflächen („radial lands“).

Die ProFile®-Instrumente (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) weisen einen U-förmigen Querschnitt, eine Batt-Spitze und „radial lands“ auf. Sie werden mit Konizitäten von 4 und 6 % angeboten und sind für die Verwendung mit Motoren bei niedrigen Drehzahlen sowie hohem Drehmoment ausgelegt. Wichtig bei der Anwendung ist die Beibehaltung einer konstanten Geschwindigkeit von 150 bis 350 U/min, das Führen der Instrumente in einer kontinuierlichen Ein- und Auswärtsbewegung sowie der Einsatz mit wenig Druck. Bei Überschreitung der zulässigen Kennzahlen – Drehzahl und Drehmoment – drohen vermehrt Instrumentenbrüche. Zur Minimierung des Frakturrisikos wird in aktuellen Motoren eine instrumentenabhängige Torque-Kontrolle eingesetzt, die bei Erreichen der gesetzten Grenzwerte die Drehrichtung ändert oder den Motor stoppt. Mit den ProFile®-Instrumenten kann die Präparationszeit im Vergleich zur Handaufbereitung verringert und dem Verlauf von gekrümmten Kanälen besser

gefolgt werden. Die Reinigungswirkung von ProFile® ist mit einer manuellen Aufbereitung vergleichbar (Hülsmann, 2002a).

Abgesehen von den eingesetzten Instrumenten kann bei der Aufbereitung nach verschiedenen Methoden vorgegangen werden. Diese lassen sich grob in apikal-koronale und koronal-apikale Techniken einteilen, je nachdem, welcher Anteil des Wurzelkanals zuerst erweitert wird. Für die mittlerweile sehr zahlreichen maschinellen Verfahren kommen noch systemspezifische Vorgehensweisen hinzu (Gängler et al., 2010). Allerdings lässt sich weder mit der manuellen- noch mit der maschinellen Aufbereitung eine vollständige Instrumentierung aller Kanalflächen erreichen. Wesentliche Anteile der Wurzelkanalwände verbleiben nicht-instrumentiert, der chemischen Desinfektion mittels Spülung und medikamentöser Einlage kommt daher eine große Bedeutung zu (Zirkel, 2012).

Bei jeglicher mechanischer Instrumentierung der Zahnhartsubstanz und damit auch der Wurzelkanalwände entsteht eine Schmierschicht („smear layer“) mit 1 bis 5 µm Dicke auf dem Hartgewebe. Sie besteht aus zermahlenem Dentin, pulpalen Geweberückständen, Odontoblasten-Fortsätzen und – im Fall von infizierten Kanälen – auch Bakterien. Die einzelnen Gewebetrümmer können sich zu Komplexen mit einer Größe von unter 0,5 bis 15 µm zusammenlagern (Eick et al., 1970; Pashley et al., 1989) und die Dentintubuli bis zu einer Tiefe von 6 bis 40 µm verholzen (Heckendorff und Hülsmann, 2002). Bei elektronenmikroskopischer Betrachtung erscheint die Schmierschicht amorph, irregulär und gekörnt (Sen et al., 1995). Abhängig von der Art der Bearbeitungsinstrumente, insbesondere den Schneideigenschaften, können sich Dicke und Zusammensetzung der smear layer verändern.

2.3.2 Chemische Aufbereitung

Zur Beseitigung angefallener Gewebereste nach der Aufbereitung, aber auch zur Entfernung von Detritus, Bakterien und persistierendem Pulpagewebe aus Seitenkanälchen und unzugänglichen Bereichen des Wurzelkanalsystems ist eine Spülung mit geeigneten Lösungen notwendig. Diese dient damit auch der Prävention und Beseitigung von Blockaden sowie der Entfernung möglicher Ernährungssubstrate der Mikroorganismen. Weiterhin soll die Spülung das Endodont desinfizieren und als Gleitmittel für die Wurzelkanalinstrumente dienen (Hülsmann, 2002c). Die Spülung der Wurzelkanäle stellt somit einen integralen Bestandteil der chemo-mechanischen Wurzelkanalaufbereitung dar (DGZMK und DGZ, 2006). Wichtige Eigenschaften, die eine Wurzelkanalspüllösung aufweisen sollte sind (Hellwig et al., 2003):

- geringe Toxizität
- bakterizide Wirkung
- Auflösung von vitalem und nekrotischem Pulpagewebe

- niedrige Oberflächenspannung
- Schmiereffekt
- Entfernung der smear layer.

Die antimikrobielle Wirkung einer Spüllösung steigt mit ihrer Applikationsdauer (Spratt et al., 2001), der Konzentration, der Applikationsmenge und der Temperatur. Eine ausreichend große apikale Aufbereitung ist notwendig, um die Spitze der Spülkanüle ohne Friktion bis kurz vor dem Apex platzieren zu können. Ein Verklemmen der Kanüle im Wurzelkanal kann zum Überpressen der Spüllösung ins apikale Gewebe und damit zu Gewebedestruktion mit starken Schmerzen führen und ist aus diesem Grund zu vermeiden.

Isotonische Kochsalzlösung (0,9 %ige Natriumchlorid-Lösung) ist die gewebefreundlichste Spüllösung. Allerdings ist keine antibakterielle Wirkung gegeben bzw. bewirkt sie lediglich das Herausspülen von Geweberesten (Beer et al., 2004).

Natriumhypochlorit (NaOCl) erfüllt die Anforderungen an eine endodontische Spüllösung weitestgehend. Seine Wirkung beruht unter anderem auf der Freisetzung von hypochloriger Säure (HClO), die eine oxidierende und chlorierende Wirkung besitzt (Estrela et al., 2002). Sie löst sowohl vitales als auch avitales Gewebe in Abhängigkeit von der Einwirkzeit auf (Hand et al., 1978; Andersen et al., 1992; Beer et al., 2004). NaOCl wird in der Regel in wässrigen Lösungen mit Konzentrationen von 1 bis 5,25 %, bei einem pH-Wert über 11 angewendet und ist die am häufigsten verwendete endodontische Spüllösung (Guida, 2006; Schwartz, 2006; Hülsmann, 2008). Seine antibakterielle Wirkung ist im genannten Konzentrationsbereich ungefähr gleich gut, aber stark abhängig von der Eindringtiefe der Spülung in den Kanal und somit vom Kanaldurchmesser sowie der verwendeten Menge an Spüllösung und der Einwirkzeit. Die Entfernung der Schmierschicht ist allein mit dieser Spüllösung nicht möglich, jedoch kann NaOCl unabhängig davon bei Konzentrationen von 2 % und mehr das freigelegte Dentinkollagen auflösen (Guida, 2006).

Ethylendiamintetraacetat oder kurz EDTA gehört zu den Chelat-Verbindungen, die als großmolekulare Komplexbildner die Fähigkeit besitzen, selektiv Calciumionen des Dentins an sich zu binden. Ihre Anwendung soll die Aufbereitung enger und stark kalzifizierter Kanäle erleichtern (Hülsmann, 2002c). Eine intensive Spülung mit EDTA am Ende der Aufbereitung ermöglicht es, die Schmierschicht – die bei jeder mechanischen Bearbeitung von Zahnhartgewebe entsteht – auf der Wurzelkanalwand deutlich zu verringern und die Eingänge der Dentintubuli freizulegen (Sen et al., 1995).

Als Hauptgrund für eine Entfernung der smear layer wird deren Gehalt an Bakterien aufgeführt, mit der daraus resultierenden schlechteren Wirksamkeit desinfizierender Spüllösungen und

medikamentöser Einlagen – wie NaOCl und Calciumhydroxid. Bei einem Verbleib der Schmierschicht wird eine effektive Penetration der Dentintubuli behindert (Clark-Holke et al., 2003; Shahravan et al., 2007). Eine vollständige Entfernung ermöglicht auch eine bessere Adaptation der Wurzelfüllmaterialien an die Kanalwand (Karagöz-Küçükay und Bayirli, 1994; Sen et al., 1995) und verringert Undichtigkeiten bei Verwendung der meisten derzeit gebräuchlichen Sealer (Cobankara et al., 2002; Economides et al., 2004; Khayat und Jahanbin, 2005). Die Diskussion zur Entfernung der Schmierschicht wird kontrovers geführt und ein allgemeiner Konsens scheint noch nicht erreicht zu sein. So wird als Argument für ihren Verbleib auch ein möglicher Verschluss der Tubuli genannt, wodurch sich die Penetration durch Keime und Noxen verringern soll (Shahravan et al., 2007).

Chlorhexidindigluconat (CHX) weist in Konzentrationen von 0,2 bis 2 % eine ebenso gute antimikrobielle Wirkung auf wie NaOCl und hat eine geringe Toxizität (Ryan, 2010). Es wirkt nicht gewebeauflösend und kann Endotoxine (LPS) nicht neutralisieren. CHX lagert sich auf Grund seiner kationischen Struktur an negativ geladene Flächen an (Substantivität) und entfaltet eine Depotwirkung für eine Dauer von 48 bis 72 Stunden (White et al., 1997). Durch seine Wirksamkeit gegenüber *Enterococcus faecalis* und Pilze, welche verstärkt bei endodontischen Misserfolgen vorgefunden werden, wird CHX bevorzugt als Zusatzspülung bei Revisionen und Gangränbehandlung eingesetzt (DGZMK und DGZ, 2006; Hülsmann, 2008). Zusätzlich wird die Applikation von CHX wegen seiner inhibierenden Wirkung auf Matrix-Metallproteinase (MMPs) propagiert, um die enzymatische Degradation des Dentinkollagens zu reduzieren (Hebling et al., 2005) und die Langlebigkeit des Komposit-Dentin-Verbunds zu verbessern.

2.3.3 Wurzelfüllung

Die Dichtigkeit der Wurzelfüllung gegenüber einer Reinfektion des Endodonts ist wesentlich für den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung. So konnte gezeigt werden, dass Bakterien aus dem Speichel bei direktem Kontakt mit der Wurzelfüllung innerhalb kurzer Zeit entlang der Wurzelfüllung bis zum Apex penetrieren und dort pathologische Prozesse induzieren oder unterhalten können (Siqueira, 2001). Die definitive Wurzelfüllung sollte somit den gesamten Wurzelkanal dauerhaft dicht verschließen, samt aller eröffneten Dentintubuli sowie Seiten- und akzessorischen Kanälen, und das Eindringen von Mikroorganismen und Flüssigkeit verhindern. Anforderungen, die an ein ideales Wurzelfüllmaterial gestellt werden, sind:

- biokompatibel
- bakteriostatisch oder bakterizid
- nicht resorbierbar
- dimensionsstabil
- porenfrei

- unlöslich in Gewebeflüssigkeiten
- undurchlässig für Flüssigkeiten
- Haftung an der Zahnhartsubstanz
- ausreichende Verarbeitbarkeit
- leicht applizierbar
- leicht entfernbar
- radio-opak
- keine Verfärbung der Zahnhartsubstanz auslösend

Trotz aller Entwicklungsbemühungen ist derzeit kein Material allein in der Lage, all diese Forderungen zu erfüllen. Vielmehr ist eine Kombination aus einer erhärtenden, cremigen Wurzelfüllpaste (Sealer) und Stiften gebräuchlich (Hülsmann, 2008).

Sealer sind erhärtende Materialien, die den Raum zwischen der Wurzelkanalwand und einem Stift dicht auffüllen sollen. Sie dienen dem Ausgleich kleinerer Unebenheiten entlang der Kanalwand und verschließen laterale, akzessorische Kanäle und offene Dentintubuli. In pastöser Form in den Wurzelkanal eingebracht, erhärten Sealer nach einer gewissen Zeit. Eine Röntgenopazität ist zum Beispiel durch den Zusatz von Metallsalzen gewährleistet (Hellwig et al., 2003).

Einer der derzeit gebräuchlichsten Sealer ist das auf Epoxidharz basierende AH Plus™ (AH Plus™, Dentsply, Deutschland), das die wichtigsten Anforderungen erfüllt. Seine beiden Komponenten werden zum Applikationszeitpunkt gemischt und in den Wurzelkanal eingebracht. Im Gegensatz zum Vorgängerprodukt setzt AH Plus™ kein Formaldehyd frei und verfügt somit über eine verbesserte Biokompatibilität. AH Plus™ härtet nach acht Stunden aus, bei einer Schrumpfung von 1,76 Vol%, und verfügt dann über ein gutes Abdichtungsvermögen (Hülsmann, 2008). In Kombination mit AH Plus™ werden meist Wurzelfüllstifte aus Guttapercha verwendet. Dieses Material wird aus dem Milchsaft des Isonandra-Gutta-Baums und weiteren Komponenten gefertigt. Es gilt als äußerst biokompatibel, leicht zu verarbeiten und allgemein als Goldstandard der Wurzelfüllmaterialien (Ureyen Kaya et al., 2008).

Mit dem erfolgreichen Einsatz der Adhäsivtechnik an koronalem Dentin wuchs der Wunsch, die Bonding-Technologie auch am intraradikulären Dentin anzuwenden. Da bisher kein Wurzelfüllmaterial verfügbar war, das alle Anforderungen für einen bakterien- und flüssigkeitsdichten Verschluss vollständig, zuverlässig und vorhersagbar gewährleistete, erhoffte man sich durch die Einführung von adhäsiv zu verarbeitenden Füllmaterialien neue Behandlungsperspektiven (Shipper et al., 2004; Teixeira et al., 2004a). Die Wurzelfüllung mit den neuen adhäsiven Sealern soll mittels Bonding und Kompositfüllung das Endodont

bakteriendicht verschließen und die Zahnwurzel stabilisieren. Der niedrig-visköse Sealer soll nach Abschluss der Polymerisation eine feste Verbindung zum auf Polyester basierenden Kernmaterial herstellen und so einen „Monoblock“ bilden (Teixeira et al., 2004a). 2003 wurde das thermoplastische und auf Polyester-Polymer basierende Material Resilon™ eingeführt, das aktuell unter dem Produktnamen RealSeal™ (RealSeal™, SybronEndo, CA, USA) vermarktet wird. Die Resilon™-Stifte werden in den gleichen ISO-Größen und Konizitäten angeboten wie Guttaperchastifte. Die klinische Handhabung und Revidierbarkeit werden als vergleichbar angesehen und der Gebrauch klassischer Wurzelfüllmethoden gilt als sinnvoll (Shipper et al., 2004). In frühen Studien konnte eine signifikant verbesserte Frakturfestigkeit von mit Resilon™ gefüllten Wurzeln nachgewiesen werden (Teixeira et al., 2004b; Hammad et al., 2007). Zusätzlich wurde eine bessere Dichtigkeit als bei Guttapercha und AH-26 festgestellt (Shipper et al., 2004). Als nachteilig gilt die enzymatische Löslichkeit durch bakterielle Hydrolyse, wodurch die dauerhafte Dichtigkeit fraglich wird (Tay et al., 2005c; Tay et al., 2005b). Auch die den Komposit-basierten Obturationsmaterialien innewohnende Polymerisations schrumpfung wird als reduzierender Faktor diskutiert (Tay et al., 2005a). Zusätzlich konnte eine geringe Haftung des adhäsiven Sealers an den Resilon™-Stiften nachgewiesen werden, vermutlich bedingt durch einen zu geringen Gehalt an Dimethacrylaten und freien Radikalen in der gut polymerisierten Resilon™-Matrix (Gesi et al., 2005; Hiraishi et al., 2005; Tay et al., 2006). Shanahan und Duncan sichteteten 2011 die zu Resilon™ verfügbare Literatur und fanden zahlreiche kontroverse Studienergebnisse, insbesondere in den Bereichen Dichtigkeit, Frakturfestigkeit und Biokompatibilität. Auf den Mangel an evidenzbasierten klinischen Studien zu Resilon™ machten Kim et al. (2010) aufmerksam.

Für die Wurzelfüllung mittels Sealer und Stiften existieren verschiedene Techniken. Nach wie vor wird die Füllmethode mittels lateraler Kondensation am häufigsten eingesetzt, sie hat die am längsten nachgewiesene Funktionszeit und klinischen Erfolg (Gängler et al., 2010). Dabei wird ein zur apikalen Aufbereitung formkongruenter Wurzelfüllstift mit Sealer beschichtet und in den Kanal eingesetzt. Anschließend wird er mit einem konischen Stopfinstrument (Spreader) an die Wurzelkanalwand und leicht nach apikal kondensiert. Die Auffüllung des dabei entstehenden Hohlraums erfolgt mit einem zusätzlichen Guttaperchastift von kleinerer ISO, der ebenso kondensiert wird. Der Vorgang wiederholt sich solange, bis der Kanal vollständig gefüllt ist. Nach Abschluss der Wurzelkanalbehandlung sollte unter dem Gesichtspunkt der Prävention einer Bakterieninvasion in das endodontische System sowie zur Frakturprophylaxe möglichst zeitnah eine bakteriendichte und die Zahnhartsubstanz stabilisierende Restauration des wurzelkanalbehandelten Zahnes erfolgen (DGZMK, 1999).

2.4 Dentin-adhäsiver Verbund

Dentin weist im Gegensatz zu Schmelz einen deutlich geringeren Anteil an anorganischen Bestandteilen auf und enthält gleichzeitig mehr Feuchtigkeit. Dies erschwert die Herstellung einer festen Verbindung zu den hydrophoben Kompositen. Nakabayashi et al. beschrieben 1982 erstmals eine praktikable und in ihren Grundsätzen heute noch angewandte Methode, um diese Problematik zu lösen. Dabei werden mit Hilfe einer Säure die oberflächlichen, anorganischen Bestandteile aus dem Dentin herausgelöst, um das Dentinkollagen-Geflecht und die Dentintubuli freizulegen. Anschließend wird ein Monomer aufgebracht, das in die Tubuli und vor allem in das Kollagengeflecht penetriert, dieses stabilisiert und eine mikromechanische Verankerung herstellt. Auf diese erste ausgehärtete Schicht (Hybridschicht) (Nakabayashi, 1992) kann anschließend das Restaurations-Komposit aufgebracht werden. Das Monomer fungiert demnach mit seinen hydrophilen und -phoben Komponenten als Verbindungsmaterial zwischen dem hydrophilen Dentin und dem hydrophoben Komposit.

Im Zuge zahlreicher Weiterentwicklungen sind heute sehr unterschiedliche Adhäsivsysteme gebräuchlich, wobei die Einteilung in Verfahren mit einem separaten Ätzmittel („etch-and-rinse“) und Selbstätzende („self-etch“) hilfreich ist. Zusätzlich kann die Anzahl der notwendigen Anwendungsschritte (Ein- oder Mehrschrittverfahren) betrachtet werden (van Meerbeek et al., 2003). Die höchsten Haftfestigkeiten werden bis dato mit den klassischen „Etch-and-rinse“-Systemen gemessen (Helvey, 2011). Durch ihren separaten Ätzschritt erzielen sie jedoch einen so ausgeprägten demineralisierenden Effekt, dass das Dentinkollagen unter Umständen nicht mehr in seiner ganzen Tiefe infiltriert werden kann. Hieraus können wiederum Undichtigkeiten, Schwachstellen und beschleunigte Alterungsprozesse im Verbund – ausgelöst durch hydrolytische und enzymatische Dentinkollagen-Degradation – resultieren (Schwartz, 2006). Außerdem muss bei zahlreichen „Etch-and-rinse“-Systemen das Dentin vor dem Aufbringen der ersten Adhäsivschicht feucht gehalten werden („wet-bonding“), andernfalls droht das freigelegte Kollagengeflecht zu kollabieren, was die spätere Penetration erschwert (van Meerbeek et al., 2003). Selbstätzende Adhäsive bewirken mit ihren sauren Bestandteilen zwar eine geringere Demineralisation, allerdings infiltrieren sie das gesamte freigelegte Dentinkollagen gleichzeitig. Der Haftungsmechanismus der „Self-etch“-Systeme unterscheidet sich von dem der „Etch-and-rinse“-Verfahren. Durch den Wegfall des separaten Ätzschrittes werden die herausgelösten anorganischen Komponenten nicht mehr weggespült, sondern in den Verbund eingebaut. Zusätzlich wird das Dentin bei steigendem pH-Wert der sauren Komponenten, also vor allem von den milden selbstätzenden Materialien ($\text{pH} > 2$), kaum noch demineralisiert (Kim et al., 2009), damit möglichst viele Hydroxylapatitkristalle im Kollagengeflecht verbleiben (siehe Abb. 1). Zu diesen wiederum können die funktionellen Monomere Ionenbindungen herstellen und so eine Verankerung am Hartgewebe realisieren (van

Meerbeek et al., 2010; Blunck, 2011). Durch den Wegfall des Ätzschrittes und den Verzicht auf „wet-bonding“ erscheint die Anwendung von selbstätzenden Materialien in den schwer zugänglichen Wurzelkanälen vorteilhaft. Das kontrollierte und zuverlässige Einbringen des selbstätzenden Primers wird jedoch auch beim Einsatz von selbstätzenden Mehrschrittverfahren in der Endodontie als Herausforderung betrachtet. Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht in der Entfernung von Primerüberschüssen und der vollständigen Evaporation des Primer-Lösungsmittels vor allem im apikalen Kanalbereich. Eine Möglichkeit zur Reduktion der Techniksensitivität besteht in der Verwendung sogenannter selbst-adhäsiver Systeme („self-adhesive“), die in einem einzigen Schritt angewendet werden. Ein Beispiel für die Weiterentwicklungen in der adhäsiven Endodontie ist das RealSeal™-System (Kim et al., 2010). In seiner ursprünglichen Version wird dieser Komposit-Sealer mit einem selbstätzenden Primer verwendet (Mehrschritttechnik, RealSeal™, SybronEndo, CA, USA) und zählt zur dritten Generation der adhäsiven Wurzelfüll-Sealer. Bei der neueren Version – die in der vorliegenden Studie eingesetzt wurde – enthält der Sealer saure Monomere und kommt ohne einen eigenständigen Primer aus (Einschritttechnik, self-adhesive; RealSeal SE™, SybronEndo, CA, USA). Der Sealer RealSeal SE™ enthält als sauren Bestandteil 4-META (4-Methacryltrioxyethyltrimellitananhydrid), wodurch er hydrophile Eigenschaften aufweist und selbstätzend wirkt. Zusätzlich forciert 4-META die Diffusion in das Dentin zur Ausbildung einer Hybridschicht. Aufgrund der genannten Eigenschaften wird RealSeal SE™ auch als Material der vierten Generation angesehen (Haragushiku et al., 2012).

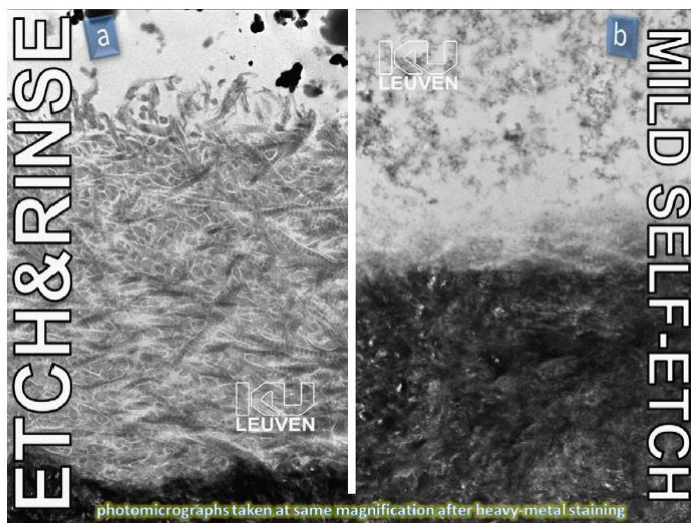


Abb.1 Grenzschicht Dentin–Adhäsiv: links: Verbundschicht eines „Etch-and-rinse“-Adhäsivs mit ausgeprägter Dentindemineralisation und großflächig freigelegtem Kollagengeflecht, das vom Adhäsiv penetriert wird (a); rechts: Hybridschicht eines milden selbstätzenden Adhäsivs in einer elektronenmikroskopischen Aufnahme. Das Dentin wurde weit weniger demineralisiert und die Hybridschicht stellt sich dünner dar. Innerhalb des Adhäsivs befinden sich zahlreiche aus dem Dentin herausgelöste Hydroxylapatit-Kristalle (b) (aus: van Meerbeek et al., 2010).

2.5 Polymerisation im Wurzelkanal

Grundsätzliches Ziel aller adhäsiven Verfahren im Wurzelkanal ist es, eine feste und damit dichte Verbindung zwischen dem Wurzelkandentin und dem Obturationsmaterial herzustellen. Dieses in der Literatur als „Monoblock“ bekannte Konzept wurde 2007 von Tay und Pashley genauer klassifiziert. Sie teilen den angestrebten Monoblock nach der Anzahl seiner zirkulären adhäsiven Verbundschichten ein. Bei einem primären Monoblock existiert demnach nur eine Grenzschicht zwischen dem Wurzelkanalentin und dem Füllmaterial, zum Beispiel wenn zur Obturation nur Sealer ohne Stifte verwendet wird. Ein sekundärer Monoblock weist zwei Verbundschichten auf: eine zwischen dem Substrat (dem Dentin) und dem Sealer und eine weitere zwischen dem Sealer und dem Stiftmaterial. Das RealSeal™-System kann mit seinen Stiften und dem Sealer in die letztgenannte Kategorie eingeordnet werden. Von einem tertiären Monoblock wird gesprochen, wenn zwischen dem Stiftmaterial und dem Sealer eine zusätzliche Verbundschicht liegt. Das kann dann der Fall sein, wenn eine spezielle Vorbehandlung oder Oberflächenbeschichtung der Stifte vorgenommen wurde, etwa mit einem unpolymersierten Komposit. Grundvoraussetzung für einen funktionierenden Monoblock sind (I) eine feste und innige Verbindung zwischen allen beteiligten Materialien, sowohl untereinander als auch mit dem Substrat, und (II) ein vergleichbares E-Modul der Wurzelfüllmaterialien zu dem des Dentins (Tay und Pashley, 2007).

Bereits die klinische Umsetzung der ersten Forderung wird von mehreren Teilaspekten beeinflusst. So ähneln die anatomischen und morphologischen Eigenschaften des Wurzelkandentins zwar grundsätzlich denen der Zahnkrone, trotzdem können die im Kronenbereich gewonnenen Ergebnisse nicht eins zu eins auf den Wurzelbereich übertragen werden. Denn die meist langen und engen Kanäle behindern den Zugang insbesondere zum apikalen Bereich. Damit wird eine Vorbehandlung der Kanalwände, zum Beispiel mit chemischen Agenzien zur Desinfektion und Entfernung der Schmierschicht, erschwert, was einer vollständigen und kontrollierten Anwendung – insbesondere von Mehrschritt-Adhäsiven – entgegensteht. Eventuelle Restfeuchtigkeit in der Dentinwand kann sich in hochhydrophile Adhäsivschichten einlagern und Schwachstellen verursachen (semipermeable Membran; Tay et al., 1992; Schwartz, 2006; Tay und Pashley, 2007). Die bei allen Kompositmaterialien während der Polymerisation auftretende Volumenschrumpfung ist bei Methacrylat-basierten, niedriggefüllten, niedrigviskosen Wurzelkanal-Sealern größer als bei den typischerweise hochgefüllten Kompositen der koronalen Füllungstherapie (Gee et al., 1993; Sakaguchi et al., 2004; Kim et al., 2010). Problematisch wird dieser Umstand, wenn die auftretenden Schrumpfkraften (S-Faktor) höher ausfallen als die Haftung der Materialien untereinander bzw. an der Wurzelkanalwand. Daraus können ein teilweises oder vollständiges Versagen des Verbundes und Undichtigkeiten resultieren (Carvalho et al., 1996). Erschwerend kommt der so genannte C-Faktor hinzu, der das

Verhältnis aus gebundener zu freier Oberfläche der Kompositschicht angibt. Dabei wird zugrunde gelegt, dass sich Komposit ohne Kontakt zur Kavität „verbiegen“ oder „nachfließen“ und so die Schrumpfkraft reduzieren kann. Würde man zum Beispiel eine Klasse-I-Kavität in einem einzigen Schritt mit Komposit füllen, ständen die fünf Wände der Kavität nur einer einzelnen freien Fläche – der okklusalen – gegenüber. Das Verhältnis beträgt in diesem Beispiel 5/1, der C-Faktor wäre 5. Da bereits ein Verhältnis von 3 als ungünstig eingestuft wird (Yoshikawa et al., 1999), kommen in der restaurativen Füllungstherapie spezielle Schicht- oder Konkrement-Techniken zum Einsatz. In Wurzelkanälen existieren entsprechend ihrer Geometrie deutlich mehr gebundene Flächen als bei koronalen Kavitäten. So liegen im Idealfall auf der gesamten Wurzellänge die Kanalwände und die Stiftoberflächen eng beieinander und direkt gegenüber (laterale Kondensation). Die sie trennende Sealer-Schicht ist sehr dünn, ihr Volumen genügt nicht, um ein Nachfließen zur Stressreduktion zu ermöglichen (Davidson et al., 1984; Ferracane, 2005). Allerdings ist bei dünnen Sealerschichten wiederum die Volumenschrumpfung und damit der S-Faktor geringer, wohingegen die zur Haftung verfügbare Stift- bzw. Hartgewebsoberfläche zunimmt. Tay et al. (2005a) verglichen den Einfluss des S-Faktors auf den C-Faktor und kamen zu dem Schluss, dass der Letztere bei klinisch relevanten Sealer-Schichtdicken die dominanteren der beiden Variablen ist. Einen C-Faktor von mehr als 200 berechneten Bouillaguet et al. (2003) für adhäsiv zementierte Wurzelstifte. Für adhäsive Wurzelfüllungen wurden auch C-Faktoren von mehr als 1.000 berechnet, wobei primär dünnere Sealerschichtdicken und sekundär zunehmende Wurzelkanallängen sowie kleinere Aufbereitungsgrößen zu höheren C-Faktoren führten (Tay et al., 2005a). Bei Füllung eines auf ISO 25 aufbereiteten 20 mm langen Wurzelkanals allein mit einem Sealer wurde ein C-Faktor von 32 berechnet. Der Einsatz von Wurzelfüllstiften erhöhte im gleichen Beispiel bei einer angenommenen Sealerdicke von 500 µm den C-Faktor auf 46 (Tay et al., 2005a). Dentintubuli können als Reservoir für nachfließendes Komposit angesehen werden, genau wie Mikroporositäten in der Sealerschicht – die die ungebundene Kompositoberfläche vergrößern (Alster et al., 1992) – sowie das zeitliche verzögerte Abbindeverhalten (Stansbury et al., 2005) die Stressverteilung positiv beeinflussen können (Schwartz, 2006). An der inneren Grenzschicht eines sekundären Monoblocks, also zwischen Sealer und Stiftmaterial, muss ebenfalls eine feste Haftung erreicht werden. So fanden Belli et al. (2011) für das Resilon™-System erhöhte Belastungsbereiche an der Verbindungsfläche des adhäsiven Sealers zu den Resilon™-Stiften. In der gleichen Untersuchung wurde eine Zunahme der ungünstigen Belastungskräfte im Monoblock mit steigender Anzahl der zirkulären adhäsiven Verbundschichten gefunden. Die Verfasser führten diesen Umstand auf den Einsatz von Materialien verschiedener E-Moduli zurück, die als Schwachpunkte des adhäsiven Verbundes angesehen wurden. Die Forderung nach einem Dentin-ähnlichen E-Modul aller beteiligten Komponenten wurde demzufolge unterstrichen.

Die veränderten biomechanischen Eigenschaften der endodontisch behandelten Wurzeln sind in erster Linie auf den Verlust von Dentinsubstanz zurückzuführen (Dietschi et al., 2007). Wenn für die Restauration zu steife Stifte, zum Beispiel aus Keramik, eingesetzt werden, wird die Belastung nicht im Stiftmaterial absorbiert, sondern die Kräfte werden direkt auf die Verbindungsregion Stift–Dentin und damit auf das geschwächte Zahnhartgewebe übertragen (Dietschi et al., 2008). Daraus kann entweder ein Versagen des Verbundes mit der Zahnhartsubstanz resultieren oder es können ausgeprägte Wurzelfrakturen entstehen, die restaurativ nicht mehr zu versorgen sind (Fredriksson et al., 1998; Asmussen et al., 1999; Akkayan und Gülmez, 2002). Für das Resilon™-System wurden einerseits ermutigende Ergebnisse bezüglich der vertikalen Wurzelfrakturen gefunden (Teixeira et al., 2004b), andererseits wurde die Steifigkeit von Resilon™ als zu gering eingeschätzt, um Wurzeln zu stabilisieren (Williams et al., 2006). Außerdem scheint der Einsatz von adhäsiven Verfahren allein nicht auszureichen, wenn das Stiftmaterial nicht fest genug ist (Grande et al., 2007).

2.6 Testmethoden

In-vitro-Verfahren zur Messung der Haftfestigkeit von Restaurationsmaterialien an Zahnhartsubstanz werden bevorzugt bei neu entwickelten Materialien verwendet, um ihre Einsatzfähigkeit bei präklinischen Tests zu ermitteln. Außerdem können so die Auswirkungen von beeinflussenden Faktoren in einer standardisierten Umgebung untersucht werden. Zu diesem Zweck existiert eine Vielzahl von Versuchsaufbauten, basierend auf unterschiedlichen Ansätzen. Einige Testmethoden werden dabei sehr häufig angewendet, aber bis dato existiert kein vollständig standardisiertes Verfahren, das einen direkten Vergleich von in verschiedenen Laboratorien gewonnenen Ergebnissen ermöglicht (Sudsangiam und van Noort, 1999; Salz und Bock, 2010).

Grundsätzlich können die Testmethoden in Makro- und Mikro-Verfahren unterteilt werden, je nach Größe der Kontaktfläche zwischen Zahnhartsubstanz und Restaurationsmaterial. Bei Proben mit einer Dentin-adhäsiven Fläche von mehr als 3 mm² wird von Makro-Testversuchen gesprochen. Bei Letzteren erfolgt die Kraftapplikation über Scherkräfte (Makro-Scherkraft-Test, „macro shear bond test“), mittels Zug („macro tensile test“) oder durch Druck („macro push-out test“) (van Meerbeek et al., 2010). Die Art und Weise der Übertragung der Testkraft auf die Proben hat einen großen Einfluss auf die Verteilung der Belastung. So konnten mit Weiterentwicklung der adhäsiven Materialien zunehmend kohäsive Brüche beobachtet werden. Diese ereignen sich im Zahnhartgewebe, im Komposit oder in beiden. Seinerzeit glaubte man, mit den Adhäsiven einen so festen Verbund zum Hartgewebe herstellen zu können, dass eher das Zahngewebe oder das Komposit frakturieren würde als die Verbindung zwischen beiden. Allerdings stellte sich heraus, dass diese kohäsiven Brüche ein den Makro-Tests innewohnendes

Problem sind. So kann bei den Zugverfahren eine nicht genau im rechten Winkel zur Testfläche einwirkende Kraft sehr leicht eine zusätzliche, komprimierende Wirkung entfalten. Bei konventionellen Scherversuchen hingegen kann die seitlich entlang der Zahnfläche applizierte Kraft – bedingt durch die Testgeometrie – in eine Zugkraft abgeändert werden. Aus einem angestrebten Scher- wird dann eher ein Biege- und Spaltungstest (Sudangiam und van Noort, 1999). Zusätzlich zeigten van Noort et al. (1989) mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode („finite element analysis“), dass besonders an den Probenrändern bei Zug- und Scherversuchen sehr große Kräfte auftreten, die die oben beschriebenen Frakturen verursachen (van Noort et al., 1991; DeHoff et al., 1995). Die nominal gemessenen bzw. durchschnittlichen Haftkräfte (Kraft/Fläche) führten demnach zu einer gravierenden Unterschätzung der innerhalb einer Probe lokal sehr unterschiedlichen Belastungen. Mit konventionellen Makro-Tests ist es nicht möglich, adhäsive Verbundfestigkeiten von mehr als 20 MPa zu messen (Versluis et al., 1997). Aus diesem Grund wurden Versuchsaufbauten mit Kontaktflächen von weniger als 3 mm² (Mikro-Verfahren) ab ungefähr 1995 verstärkt angewendet (Braga et al., 2010).

Ein großer Vorteil der Mikro-Haftkraft-Tests im Vergleich zu den Makro-Verfahren ist die Möglichkeit, mehrere Proben aus einem Zahn zu gewinnen und so regionale Haftungsunterschiede zu untersuchen. Außerdem konnte gezeigt werden, dass zum Beispiel bei Mikro-Zugversuchen („micro-tensile bond strength test“, μ TBS) die gemessenen Haftwerte ungefähr doppelt bis viermal so hoch waren wie bei Makro-Zugversuchen. Dadurch erschien der μ TBS am besten geeignet, um auch geringe Haftfestigkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Restaurationsmaterialien zu bestimmen (Braga et al., 2010). Zurückgeführt wird dieser Umstand darauf, dass mit kleiner werdender Verbundfläche auch die Gefahr von Materialfehlern sinkt und es somit seltener zur Ausbildung von kritischen Brüchen kommt.

Der Mikrozugkraft-Test (μ TBS) wurde 1994 von Sano et al. eingeführt und gilt derzeit als das am weitesten verbreitete Verfahren zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Adhäsiven an Zahnhartsubstanz (Sano et al., 1994). Grund dafür ist die Beobachtung, dass die gemessene Haftkraft indirekt proportional zur Größe der adhäsiven Fläche ist und dass bei kleineren Versuchsflächen der Anteil an adhäsiven Brüchen – also das direkte Versagen des Verbundes – steigt. Bei weniger als 2 mm² Verbundfläche liegen fast nur noch adhäsive Brüche vor (Phrukkanon et al., 1998). Zur Herstellung der Proben wird auf der vorbereiteten Zahnfläche ein Kompositaufbau hergestellt und dann der ganze Zahn mit Präzisionssägen in ca. 1 mm dünne Scheiben gesägt. Anschließend können diese Scheiben mit rotierenden Instrumenten an der Dentin-adhäsiven Grenze hantel- oder uhrglasförmig eingekerbt werden („trimming technique“). Alternativ können die 1 mm dünnen Scheiben erneut zersägt werden, so dass 1 x 1 mm dünne Probenstäbe entstehen („non-trimming technique“). Getestet wird somit eine ca. 1 mm² große adhäsive Fläche. Die Haftkraft der Materialien wird durch die Applikation

einer Zugkraft in Probenlängsachse bis zum Bruch der Verbindung bestimmt. Die wesentlichen Kritikpunkte an diesem Verfahren sind die sehr aufwendige Probenherstellung, der häufige Verlust der fragilen Proben noch vor der eigentlichen Testung sowie die Schwierigkeit, ausschließlich Zugkräfte ohne jede Biegebeanspruchung anzuwenden. Zusätzlich ist die Messung von Haftwerten unter 5 MPa problematisch (Pashley et al., 1995; Pashley et al., 1999).

Dem steht das neuere Mikro-Ausstoßverfahren gegenüber („thin-slice push-out test“, Abb. 2), bei dem 1 mm dünne horizontale Scheiben aus einer Wurzel gesägt werden. Dadurch können ebenfalls mehrere Proben je Zahnwurzel gewonnen und regionale Unterschiede untersucht werden. Durch den Einsatz von kleinen Proben erhofft man sich eine gleichmäßigere Stressverteilung bei Belastung der Wurzelfüllmaterialien mit einem Stempel. Der Mikro-Ausstoßversuch wird gegenüber dem μ TBS als besser umsetzbar betrachtet, unter anderem wegen der deutlich verringerten Gefahr von Probenverlusten noch vor dem eigentlichen Test und der geringeren Streuung der gewonnenen Messwerte (Goracci et al., 2004). Ein weiterer Vorteil des Mikro-Ausstoßverfahrens ist die parallel zur Verbundfläche einwirkende Kraft, die nicht nur eine genauere Beurteilung der Haftfestigkeit als konventionelle Scherversuche ermöglicht (Drummond et al., 1996), sondern auch eher mit der klinischen Situation vergleichbar ist (Sudangiam und van Noort, 1999). Zusätzlich gelten die gewonnenen Ergebnisse als reproduzierbar (Haller et al., 1993b), wobei auch geringe Haftfestigkeitswerte bestimmt werden können (Ungor et al., 2006).

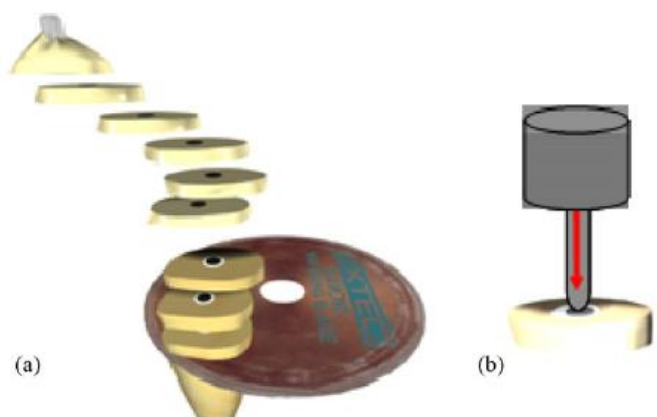


Abb. 2 Mikro-Ausstoßversuch: Zersägen einer Wurzel in mehrere horizontale, 1 mm dünne Scheiben mit Hilfe einer Diamantscheibe (a), anschließend Herausdrücken des im Wurzelkanal zementierten Stiftes in apikal-koronaler Richtung. Der Stempel ist auf die Dimensionen des Kanals abgestimmt und bewirkt eine Scherbelastung entlang der Verbundschicht bis zum Versagen der Haftung, was zum Herausdrücken des Stiftes aus dem Kanal führt (b). (aus: Goracci et al., 2007)

3 Zielstellung

Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Bestimmung der Haftfestigkeit eines konventionellen Wurzelfüllmaterials im Vergleich zu einem neuen, adhäsiven Material sowie eine Beurteilung des Einflusses verschiedener gebräuchlicher endodontischer Spüllösungen mit Hilfe des Mikro-Ausstoßverfahrens. Dabei sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Unterscheiden sich die verwendeten Wurzelfüllmaterialien in ihrer Haftung am Dentin?
- Wie wirken sich unterschiedliche Spüllösungen auf die Haftung der Materialien aus?
- Bewirken identische Spülprotokolle bei Materialien mit ungleichen Haftmechanismen divergierende Effekte?
- Verspricht der Einsatz des adhäsiven Wurzelfüllmaterials klinische Vorteile?

4 Material und Methoden

4.1 Versuchsplanung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung der Verbundfestigkeit zweier Wurzelkanalfüllmaterialien mit den typischerweise dazu verwendeten Sealern beim Einsatz verschiedener Spüllösungen an vorbehandeltem Wurzelentin. Für die Wurzelkanalfüllungen kamen Guttapercha in Kombination mit dem Sealer AH Plus™ und RealSeal™ mit RealSeal SE™ zum Einsatz. Als Spüllösungen wurden verwendet:

- 0,9 %ige isotonische Kochsalzlösung
- 3 %ige Natriumhypochlorit-Lösung
- 3 %ige Natriumhypochlorit-Lösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung
- 17 %ige EDTA-Lösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung
- 2 %ige Chlorhexidinlösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung.

Alle Wurzelfüllmaterialien und alle Spüllösungen sollten miteinander kombiniert werden, um die Veränderung der Push-out-Haftfestigkeit an horizontalen, 1 mm dünnen Wurzelscheiben zu ermitteln. Die Gruppen, in denen die Haftung der Wurzelfüllmaterialien an chemisch unverändertem Dentin, also nach alleiniger Spülung mit Kochsalzlösung, getestet wurde, dienten als Kontrollgruppen.

4.2 Material

4.2.1 Wurzelfüllmaterialien und Sealer

Guttapercha (Antaeos, VDW, Deutschland)

Guttapercha ist das erprobteste Material für Wurzelfüllstifte. Die Guttaperchapoints bestehen zu ca. 20 % aus Guttapercha, dem eingedickten Milchsafte tropischer Bäume, der als Matrix fungiert. Neben dem Füllstoff Zinkoxid und Kunststoffen sind geringe Mengen Wachs zur Verbesserung der Plastizität enthalten. Metallsulfate werden zur Gewährleistung der Röntgenopazität beigemischt. Guttapercha ist biokompatibel, inert und bei Temperaturen von ca. 60 °C plastisch verformbar, bei niedrigen Temperaturen hingegen dimensionsstabil. Es kann in zwei kristallinen Phasen (α und β) oder in einer amorphen Phase vorliegen. Frisch gewonnenes Guttapercha befindet sich meist in der α -Phase, wohingegen die in der klinischen Praxis und in dieser Untersuchung verwendeten konventionellen Guttaperchastifte zur β -Gruppe gehören. Guttaperchapoints werden in ISO-Größen ab 15 angeboten, mit den gängigsten Konizitäten von 2 % und 4 %.

AH Plus™ (AH Plus™, Dentsply, Deutschland; Kürzel: AH)

Der Sealer AH Plus™ ist eine auf Epoxid-Amin-Harz basierende Wurzelfüllpaste mit großer klinischer Verbreitung. Er weist ein gutes Abdichtungsvermögen auf und ist volumenbeständig. Im periradikulären Gewebe wird er teilweise resorbiert bzw. bindegewebig abgekapselt, führt aber bei sachgerechter Anwendung kaum zu Irritationen. Der Sealer wird aus zwei Komponenten zu gleichen Teilen angemischt und erhärtet dann langsam.

AH Plus™-Paste A enthält

- Bisphenol Epoxidharze
- Calciumwolframat
- Zirkoniumoxid
- Siliciumdioxid
- Eisenoxid

AH Plus™-Paste B enthält

- verschiedene Diamine
- Aminoadamantan
- Calciumwolframat
- Zirkoniumoxid
- Siliciumdioxid
- Silikonöl

RealSeal™-Wurzelfüllstifte (RealSeal™, SybronEndo, CA, USA)

RealSeal™ ist ein Handelsname für das 2003 erstmals vorgestellte Wurzelfüllmaterial Resilon™. Das thermoplastische, synthetische, auf Polycaprolacton (Polyester-Polymer) basierende Material soll in Kombination mit einem niedrig-viskösen Sealer einen adhäsiven Verbund mit dem Dentin der Wurzelkanalwand eingehen. Laut Hersteller ist mit diesem

Material ein bakteriendichter, wandständiger Verschluss des Wurzelkanals möglich. Gleichzeitig soll die durch die endodontische Aufbereitung mechanisch geschwächte Wurzel ihre Ausgangsstabilität zurückgewinnen. Resilon™ wird als Alternative zu Guttapercha empfohlen, bei vergleichbaren physikalischen Eigenschaften und ähnlicher klinischer Handhabung. Neben Polyestern sind funktionelle Dimethacrylate, radioopake Füllstoffe und bioaktive Gläser enthalten. Die RealSeal™-Stifte werden in den gleichen ISO-Größen und Konizitäten angeboten wie Guttapercha-Points.

RealSeal SE™ (RealSeal SE™, SybronEndo, CA, USA; Kürzel: RS)

Der dualhärtende, auf Methacrylaten basierende Sealer RealSeal™ soll den adhäsiven Verbund zwischen den Resilon™-Stiften und der Wurzelkanalwand herstellen. RealSeal™ wird mit einem separaten Primer angeboten oder, wie in dieser Studie verwendet, als selbst-adhäsive Einschnitt-Variante. Der Sealer besteht aus einer Mischung verschiedener Methacrylate wie ethoxyliertem Bisphenol-A-Dimethacrylat (EBPADMA), Bisphenol-A-Glycidyl-Methacrylat (Bis-GMA), Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) und sauren Monomeren. Weitere Bestandteile sind Bariumglas, Silikat, Calciumhydroxid, Bismutchloridoxid, Peroxid, Photoinitiatoren und Stabilisatoren.

4.2.2 Spüllösungen

Isotone Kochsalzlösung (Isotone Kochsalz-Lösung 0,9 % Braun, B. Braun Melsungen AG, Deutschland; Kürzel: H₂O)

Isotonische Kochsalzlösung wurde in dieser Arbeit zur Lagerung der Proben sowie als Spülmedium während der Wurzelkanalaufbereitung und nach ihrem Abschluss verwendet. Die Lösung enthält 0,9 Gew% Natriumchlorid und entspricht mit ihrer Osmolarität ungefähr der des menschlichen Blutplasmas. Sie ist kostengünstig und verändert nicht das Zahnhartgewebe.

Natriumhypochlorit (Natriumhypochlorit 3%, Hedinger, Deutschland; Kürzel: NaOCl)

Wässrige Natriumhypochlorit-Lösung wird in der endodontischen Therapie wegen ihrer stark oxidativen Wirkung zur Desinfektion der Wurzelkanäle verwendet. Das schwach nach Chlor riechende Mittel hat einen pH-Wert von 10,7 bis 12,2. Das in der Endodontie als Standardspüllösung geltende Mittel löst sowohl vitales als auch avitales Gewebe auf und verfügt über eine gute antibakterielle Wirkung. Natriumhypochlorit muss kühl und lichtgeschützt verwahrt werden, da es sonst zerfällt und an Wirksamkeit verliert. In der vorliegenden Studie wurde eine Natriumhypochlorit-Lösung mit einer Konzentration von 3 % verwendet.

EDTA (EDTA-Lösung, Speiko - Dr. Speier GmbH, Deutschland)

Ethylendiamintetraacetat (EDTA) gehört zu den Chelatoren bzw. Komplexbildnern, die in der Lage sind, selektiv Calciumionen des Dentins an sich zu binden. Durch Einsatz dieser Spülflüssigkeit soll die Aufbereitung von engen, blockierten oder stark kalzifizierten Kanälen erleichtert werden. In der adhäsiven Zahnheilkunde wird EDTA verwendet, um die Schmierschicht nach der Präparation zu entfernen, die sonst die Eingänge der Dentintubuli blockiert und die Ausbildung der Hybridschicht zwischen Dentinkollagen und dem Adhäsiv beeinträchtigt. Zum Einsatz kam eine 17 %ige wässrige EDTA-Lösung mit einem pH-Wert von ca. 8,5.

Chlorhexidin (Chlorhexidindigluconat-Lösung 2 %, Engelhard Arzneimittel, Deutschland)

Chlorhexidindigluconat (CHX) gehört zu den Bisguaniden und wird wegen seiner antibakteriellen Eigenschaften zur Desinfektion von Wurzelkanälen genutzt. Die verwendete CHX-Spülung enthält 2 % Chlorhexidin, gereinigtes Wasser sowie Aromastoffe und weist einen pH-Wert von 5,5 bis 7 auf.

4.3 Methode

4.3.1 Auswahl und Vorbereitung der Wurzeln

Für die Studie wurden 200 gerade Wurzeln von extrahierten menschlichen Zähnen der zweiten Dentition verwendet. Vor der Weiterverarbeitung erfolgte die Entfernung aller anhaftenden Geweberückstände mit Scalern (Hu-Friedy, Rotterdam, Niederlande). Die Zahnkronen wurden auf Höhe der Schmelz-Zementgrenze mit einer diamantierten Trennscheibe (Pluradent, Offenbach, Deutschland) unter Verwendung eines Handstücks abgetrennt. Dies erlaubte den Zugang zu den Wurzelkanälen. Wurzeln mit mehr als einem Kanal wurden aussortiert. Die Proben für die Untersuchung konnten aus Schneide- und Eckzähnen sowie Prämolaren und Molaren mit abgeschlossenem Wurzelwachstum hergestellt werden. Weisheitszähne wurden aus der vorliegenden Studie ausgeschlossen. Die Wurzelkanäle durften im Rahmen der klinischen Therapie noch nicht instrumentiert worden sein.

4.3.2 Aufbereitung

Zu Beginn der endodontischen Aufbereitung wurde eine K-Feile mit ISO 15 (Antaeos, VDW GmbH, München, Deutschland) so weit in die Kanäle eingeführt, dass sie am Foramen apikale gerade wieder sichtbar wurde. Diese gemessene Länge entsprach der jeweiligen Wurzellänge. Die Arbeitslänge ergab sich aus Wurzellänge minus 1 mm. Die maschinelle Aufbereitung der Kanäle erfolgte mit dem ProFile®-System (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) entsprechend den Herstellerangaben. Zum Einsatz kam folgende Feilensequenz: .06/25

(Konizität 6 % und ISO 25), .06/20, .04/25 und .04/20. Abschließend erfolgte die Ausformung der Kanäle mit der Folge: .04/30, .04/35 und .04/40, um runde Umrisse sowie eine gleichmäßige Konizität über die gesamte Länge zu erhalten. Die Feilen wurden in einem drehmomentstarken Motor (Endo IT control, Aseptico, Woodinville, WA, USA) bei konstantem feilenspezifischen Drehmoment und maximal 300 U/min verwendet. Zur Spülung während der Aufbereitung und als Lagermedium bis zur weiteren Verwendung kam ausschließlich isotonische Kochsalzlösung zur Anwendung.

4.3.3 Wurzelkanalfüllung

Für jede Versuchsgruppe wurden 20 Wurzeln mit jeweils 5 ml der entsprechenden Lösung vier Minuten lang gespült. Außer bei den Versuchsgruppen (II) und (VII) erfolgte eine Nachspülung mit 5 ml Kochsalzlösung für eine Minute. Dabei kam eine 0,30 mm dünne endodontische Spülkanüle (Transcoject, Dentaltechnik Neumünster, Deutschland) zum Einsatz, um nach Möglichkeit auch den apikalen Bereich der Wurzelkanäle zu erreichen und überschüssige Spüllösung nach Ablauf der Einwirkzeit abzusaugen. Die Trocknung der Kanäle erfolgte mit Papierspitzen (Pluradent, Offenbach, Deutschland) der ISO-Stärke 40 mit 4 % Konizität, so lange, bis keine Feuchtigkeitsrückstände mehr an der letzten Spitze erkennbar waren.

Für die Versuchsgruppen (I) bis (V) wurden beide Komponenten des Sealers AH Plus™, Paste A und Paste B, zu gleichen Teilen gemischt. Damit wurden die Guttapercha-Mastercones (ISO 40 und 4 % Konizität) beschichtet. Anschließend erfolgte die Einbringung der Mastercones mit pumpenden Bewegungen in die jeweiligen Wurzelkanäle. Darauf folgend wurden so lange akzessorische Guttapercha-Stifte mittels lateraler Kondensation unter Verwendung eines Handspreaders (Finger Spreader Ref. A0206, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) nachgefüllt, bis die Wurzelkanäle vollständig obturiert waren.

Bei den Versuchsgruppen (VI) bis (X) wurde ein ISO 40 Taper 0.04 RealSeal™-Mastercone mit dem zugehörigen RealSeal SE™-Sealer aus einer Automix-Spritze benetzt und mit pumpenden Bewegungen in den jeweiligen Wurzelkanal eingebracht. Eventuell verbliebene Hohlräume in der Wurzelfüllung sollten auf die gleiche Art wie bei den Versuchsgruppen mit Guttapercha unter Verwendung eines Handspreaders und akzessorischer Wurzelfüllstifte mittels lateraler Kondensation geschlossen werden.

Tab. 1 Gruppenübersicht

Versuchsgruppe	Wurzelfüllmaterial / Sealer (Gruppenabkürzung)	Spülung
I	Guttapercha/AH Plus™ (AH mit H ₂ O)	isotonische Kochsalzlösung
II	Guttapercha/AH Plus™ (AH mit NaOCl ohne H ₂ O)	Natriumhypochlorit-Lösung ohne abschließende Spülung durch isotonische Kochsalzlösung
III	Guttapercha/AH Plus™ (AH mit NaOCl mit H ₂ O)	Natriumhypochlorit-Lösung mit abschließender Spülung durch isotonische Kochsalzlösung
IV	Guttapercha/AH Plus™ (AH mit EDTA und H ₂ O)	EDTA-Lösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung
V	Guttapercha/AH Plus™ (AH mit CHX und H ₂ O)	Chlorhexidin-Lösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung
VI	RealSeal™/RealSeal SE™ (RS mit H ₂ O)	isotonische Kochsalzlösung
VII	RealSeal™/RealSeal SE™ (RS mit NaOCl ohne H ₂ O)	Natriumhypochlorit-Lösung ohne abschließende Spülung durch isotonische Kochsalzlösung
VIII	RealSeal™/RealSeal SE™ (RS mit NaOCl ohne H ₂ O)	Natriumhypochlorit-Lösung mit abschließender Spülung durch isotonische Kochsalzlösung
IX	RealSeal™/RealSeal SE™ (RS mit EDTA und H ₂ O)	EDTA-Lösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung
X	RealSeal™/RealSeal SE™ (RS mit CHX und H ₂ O)	Chlorhexidin-Lösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung

Abkürzungen: AH: Guttapercha/AH Plus™, RS: RealSeal™/RealSeal SE™; H₂O: isotonische Kochsalzlösung, NaOCl: Natriumhypochlorit, EDTA: Ethylendiamintetraacetat, CHX: Chlorhexidindigluconat

Nach Entfernung des überschüssigen Wurzelfüll- bzw. Sealermaterials mit Hilfe eines heißen Kugelstoppers wurden die Proben, bei denen das dualhärtende RealSeal SE™ zur Anwendung kam, zusätzlich lichtgehärtet. Dafür wurde ein Lichthärtegerät (Bluephase® G2, Pluradent, konstante Leistung 1.200 mW/cm²) 40 Sekunden lang von koronal so nahe wie möglich an die Wurzelkanaleingänge gehalten, ohne diese zu berühren.

Alle in dieser Form gefüllten Wurzeln lagerten bei Zimmertemperatur bis zur weiteren Verarbeitung nach sieben Tagen in isotonischer Kochsalzlösung.

4.3.4 Herstellung der Wurzelscheiben

Jede Wurzel wurde im rechten Winkel zur Längsachse so zersägt, dass jeweils eine ca. 1 mm dicke Scheibe aus jedem Wurzel Drittel – apikales, mittleres und koronales – gewonnen werden konnte. Dazu wurde zuerst jede Wurzelspitze unter Verwendung einer diamantierten Trennscheibe (Diamantscheibe H 340 220 ST, HOPF, Dicke: 0,3 mm) im Handstück, bei 8.000 U/min, um 2 mm gekürzt, anschließend wurden im Abstand von 1 mm entlang der Wurzellängsachse Markierungen angebracht. Diese Markierungen dienten zur Orientierung, um kurz unter bzw. oberhalb jeder angestrebten Scheibe einen Schnitt zu setzen (Abb. 3).

Mit wasserfesten farbigen Stiften (Edding 780 paint marker, edding International GmbH, Ahrensburg, Deutschland) erfolgte die Markierung jeder Scheibe (Probe) – entsprechend ihres ursprünglichen Wurzelniveaus – auf ihrer apikalen Dentinfläche mit einer jeweils anderen Farbe (siehe Abb. 4). Die Dicke der Scheiben wurde mit einer elektronischen Schiebelehre (Max Bahr, Hamburg, Deutschland, Messgenauigkeit $\pm 0,03$ mm) an jeweils drei verschiedenen Stellen ermittelt. Als Zielvorgabe diente eine Scheibendicke von $1 (\pm 0,05)$ mm. Zu dicke Proben wurden auf der koronalen Fläche mit einer diamantierten Scheibe (Diamantscheibe H 347 220 ST, HOPF, Körnung: $130 \mu\text{m}$), die im Handstück eingespannt wurde, bei einer Drehzahl von 5.000 U/min nachgearbeitet, um die vorgesehene Dicke zu erreichen. Die Lagerung aller Proben einer Wurzel erfolgte in einem mit Kochsalzlösung gefüllten Eppendorf-Gefäß (Protein LoBind Tube 2,0 ml, Eppendorf Tubes, Eppendorf AG, Hamburg, Deutschland). Diese wiederverschließbaren Tubes wurden beschriftet. In Verbindung mit den farblich gekennzeichneten Proben konnte jede einzelne Wurzelscheibe nicht nur den Versuchsgruppen und Wurzelniveaus, sondern auch den ursprünglichen Zähnen zugeordnet werden.

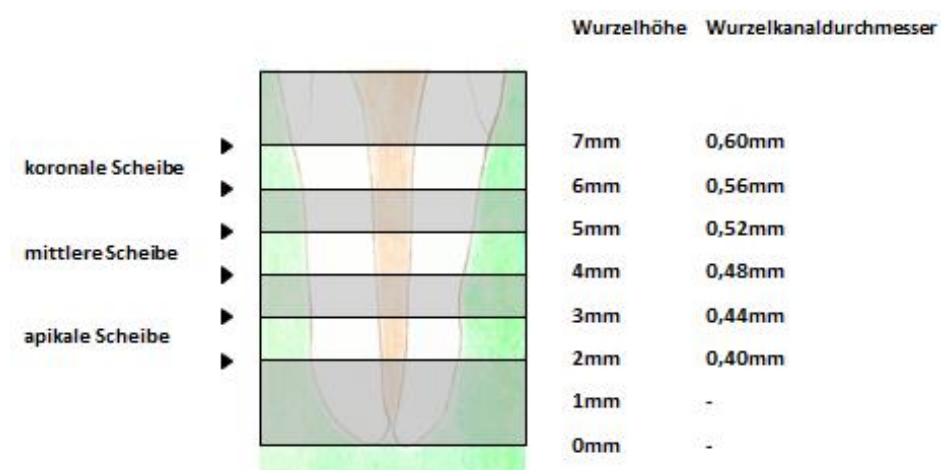


Abb. 3 Schnittebenen einer mit Wurzelfüllmaterial gefüllten Wurzel: Bereiche der horizontalen Schnitte (Pfeile) sowie verworfene (dunkel hinterlegt) und als Proben verwendete Wurzelanteile; Wurzelkanaldurchmesser auf Höhe der Sägeschnitte sind berechnete Werte bei idealer Umsetzung des Versuchsaufbaus.

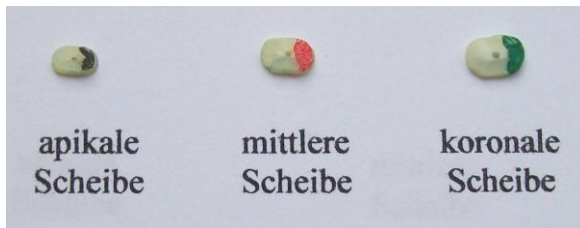


Abb. 4 Proben: drei Zahnscheiben einer Wurzel (Aufnahme erfolgte nach Ausstoßversuch)

4.3.5 Bestimmung der Push-out-Haftkraft

Der zur Messung der Push-out-Haftkraft verwendete Versuchsaufbau (Abb. 5 – 7) bestand aus einer Auflagefläche für die Wurzelscheiben (Proben) und einer Einspannvorrichtung für den jeweils verwendeten Stempel, die beide in einer Universal-Testmaschine (Zwick Z005, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) verankert wurden. Als Einspannvorrichtung für die Stempel – Stahldrähte mit unterschiedlichen Durchmessern (Vogelsang Edelmärkte, Hagen, Deutschland) – kam ein Bohrfutter zum Einsatz, das am Kraftsensor (KAP-Z 5kN, A.S.T.-Angewandte System Technik GmbH, Wolnzach, Deutschland) der Universal-Testmaschine befestigt war. Als Auflagefläche kam eine 1 cm starke Aluminiumscheibe mit einer zentralen, durchgehenden, 1 mm dicken Bohrung zum Einsatz, die so ausgerichtet war, dass die Stempel möglichst mittig über der Bohrung zu liegen kamen. Die Wurzelscheiben wurden mit ihrer koronalen Fläche auf die Bohrung der Auflagefläche gelegt und so unter den Stempeln ausgerichtet, dass die Stempel ausschließlich die Wurzelfüllungen berührten und zu allen Seiten ein gleichmäßiger Abstand zur Wurzelkanalwand bestand.

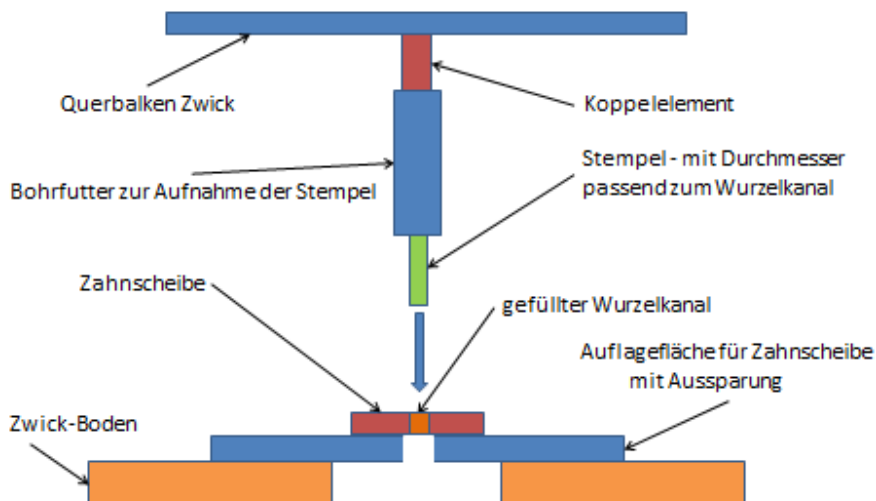


Abb. 5 Schema der Push-out-Versuchsanordnung



Abb. 6 Zwick-Universalprüfmaschine mit Stempeleinsatz und PC

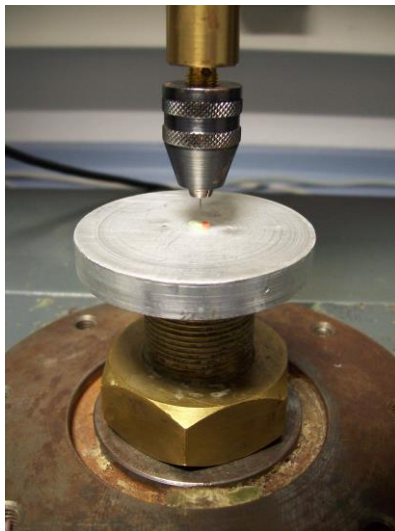


Abb. 7 Stempelvorrichtung: Eine Zahnscheibe (Probe) liegt, mit ihrer apikalen Fläche nach oben zeigend, über der Aussparung in der Auflagefläche. Ein Stempel (-Draht) wurde im Bohrfutter befestigt und mittig über dem Wurzelkanal der Zahnscheibe positioniert.

Da die Wurzelkanalaufbereitung und die Herstellung der Wurzelscheiben einem definierten Ablauf folgten, konnten die theoretisch vorhandenen Wurzelkanaldurchmesser vor Beginn der Tests ermittelt werden. Somit war es auch möglich, die jeweils notwendigen Stempeldurchmesser – maximal 0,2 mm weniger als der Wurzelkanaldurchmesser – zu bestimmen. Eine Übersicht über die Wurzelkanaldurchmesser und die verwendeten Stempel gibt Tabelle 2.

Tab. 2 Berechnete Kanal- und Stempeldurchmesser, alle Angaben in [mm]

Wurzelscheibe	Wurzelkanal- durchmesser auf apikaler Fläche	Verwendeter Stempeldurchmesser	Differenz zw. Kanal- und Stempeldurchmesser
Apikale	0,40	0,30	0,10
Mittlere	0,48	0,30	0,18
Koronale	0,56	0,40	0,16

Durch die Positionierung der Proben auf ihrer koronalen Fläche ergibt sich eine von den Stempeln hervorgerufene Krafrichtung von apikal – der Scheibenfläche mit dem kleineren Wurzelkanaldurchmesser – nach koronal, mit dem größeren Kanaldurchmesser. Die bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit der Stempel von 0,5 mm/min auftretenden Kräfte wurden in [N] gemessen und durch eine Software (testXpert Version 7.11, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) in einem Kraft-Zeit-Diagramm dargestellt. Die dabei entstandenen Graphen stiegen bis zu einem maximalen Kraft-Wert an, um dann wieder abzufallen. Dieser höchste Wert repräsentiert die maximale Belastbarkeit der Wurzelfüllung bis zum Versagen des Verbundes Wurzelentin–Sealer und wurde als Push-out-Haftkraft notiert.

4.3.6 Bestimmung der Push-out-Haftfestigkeit

Neben der absoluten Push-out-Haftkraft (F in [N]) ist vor allem die Push-out-Haftfestigkeit (p in [MPa]) – als Verhältnis von Kraft zu Fläche beim Versagen des adhäsiven Verbundes – von Bedeutung. Um die maximale Haftfestigkeit zu bestimmen, wurde die Kontaktfläche der Wurzelfüllung an der Kanalwand jeder einzelnen Probe bestimmt. Dazu wurde aus den Dicken der Proben, gemessen an jeweils drei Stellen mit Hilfe einer elektronischen Schiebelehre (MaxBahr, Messgenauigkeit 0,03 mm), ein Durchschnittswert (h in [mm]) je Probe gebildet. Diese und alle folgenden Kalkulationen erfolgten in Microsoft Excel 2010.

Der Umfang der Wurzelkanäle wurde mit Hilfe eines Lichtmikroskops (Axioplan 2 imaging, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Deutschland), einer Digitalkamera (AxioCam ICc 1, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Deutschland), die mit einem PC verbunden war, und entsprechender Software (AxioVision Version 4.8.10, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Deutschland) bei 25-facher Vergrößerung vermessen. Dazu wurde vom Untersucher der Wurzelkanalrand auf den am Bildschirm dargestellten Bildern der apikalen Probenflächen mit Hilfe der Funktion „Kurve (Spline)“ manuell markiert und so der jeweilige Kanalumfang (u in [mm]) ermittelt.



Abb. 8 Mikroskop-Arbeitsplatz

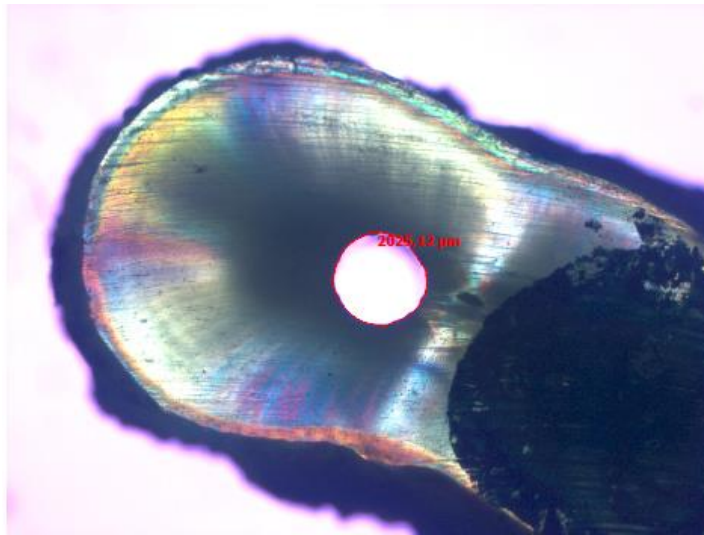


Abb. 9 Mikroskopische Aufnahme: Ansicht einer Wurzelscheibe von apikal, Vergrößerung 25x

Durch die Bestimmung der durchschnittlichen Probendicke (h) und der Wurzelkanalumfangs (u) konnte die adhäsive Fläche jeder Probe hinreichend genau berechnet werden. Dafür wurden zuerst die Wurzelkanalradien auf der apikalen Fläche ($r(2)$ in [mm]) bestimmt:

$$r(2) = \frac{u \times \Pi}{2}.$$

Anschließend wurden die Wurzelkanalradien auf den koronalen Flächen ($r(1)$ in [mm]) wie folgt berechnet:

$$r(1) = r(2) + \frac{0,04}{2} \times h.$$

Der Faktor 0,04 steht dabei für die gleichbleibende Konizität des ProTaper-Systems. In Folge dessen nimmt der Wurzelkanaldurchmesser mit jedem Millimeter in koronaler Richtung um

0,04 mm zu. Der Ausschnitt des Wurzelkanals jeder Probe kann somit als idealisierter gerader Kreiskegelstumpf betrachtet werden. Demzufolge ergibt sich die „Kantenlänge“ (s in [mm]) der Wurzelkanalwand nach:

$$s = \sqrt{((r(1) - r(2))^2 + h^2)}$$

und die adhäsive Fläche („Mantelfläche“, M in [mm²]) über die Formel:

$$M = \Pi \times s \times (r(2) + r(1))$$

Die Push-out-Haftfestigkeit (p in [MPa]) lässt sich über die Formel:

$$p = \frac{F}{M}$$

berechnen.

4.4 Statistik

Die gewonnenen Push-out-Haftfestigkeitswerte wurden je Versuchsgruppe – und somit unabhängig vom Wurzelniveau – mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS 20.0 (IBM, Armonk, NY, USA) analysiert.

Die Null- (H_0) und Alternativhypothesen (H_A) lauteten:

- H_{0-M} : Die verwendeten Wurzelfüllmaterialien und ihre Sealer haben keinen Einfluss auf die Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit.
- H_{A-M} : Die verwendeten Wurzelfüllmaterialien und ihre Sealer beeinflussen die Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit.
- H_{0-S} : Die verwendeten Spüllösungen haben keinen Einfluss auf die Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit.
- H_{A-S} : Die verwendeten Spüllösungen beeinflussen die Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit.
- H_{0-I} : Es gibt keine Interaktion zwischen den Wurzelfüllmaterialien und Spüllösungen, welche unabhängig von den einzelnen Faktoren „Wurzelfüllmaterial“ und „Spüllösung“ die Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit beeinflusst.
- H_{A-I} : Es gibt eine Wechselwirkung zwischen den Einzelfaktoren „Wurzelfüllmaterial“ und „Spüllösung“, welche die Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit beeinflusst und nicht durch die Wirkung der Einzelfaktoren erklärt werden kann.

Zur Überprüfung der Hypothesen kam eine zweifaktorielle Varianzanalyse (TWO-WAY ANOVA) mit den unabhängigen Variablen „Wurzelfüllmaterial“ und „Wurzelkanalspülung“,

gefolgt von Tukey-HSD- und Bonferroni-Post-hoc-Tests, zum Einsatz. Der paarweise Kruskal-Wallis-Test, korrigiert nach Bonferroni, ermöglichte den direkten Vergleich einzelner Versuchsgruppen. Das Signifikanz-Niveau der Vergleiche ohne Adjustierung lag bei 5 % ($p = 0,05$). Die Tabellen und Diagramme wurden mit SPSS 20.0 sowie Excel 2010 erstellt.

5 Ergebnisse

Einen ersten Überblick über die Push-out-Haftfestigkeiten der Wurzelfüllmaterialien in Kombination mit verschiedenen Spülungen zeigt Tabelle 3. Angegeben sind neben der Probenanzahl je Versuchsgruppe der Gruppenmittelwert, die Standardabweichung, der Median sowie Maximal- und Minimalwert. In den Abbildungen 10 und 11 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Zur Erklärung der Abkürzungen sei auf Tabelle 1 (Gruppenübersicht) verwiesen. Eine detaillierte Auflistung der Messergebnisse aller zehn Versuchsgruppen findet sich am Ende dieses Abschnitts.

Tab. 3 Statistische Maßzahlen (SPSS) aller Versuchsgruppen (alle Meßwerte in [MPa]), in Klammern Nummern der Versuchsgruppen

(Gruppennummer) Gruppenabkürzung	Proben- anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung	Median	Max.	Min.
(I) AH mit H ₂ O	60	2,58	1,30	2,52	5,84	0,58
(II) AH mit NaOCl ohne H ₂ O	60	2,47	1,15	2,57	5,42	0,21
(III) AH mit NaOCl und H ₂ O	60	2,96	0,64	2,87	4,28	1,94
(IV) AH mit EDTA und H ₂ O	60	2,53	0,72	2,51	4,20	1,18
(V) AH mit CHX und H ₂ O	60	2,13	0,63	1,96	3,31	1,09
(VI) RS mit H ₂ O	60	2,08	0,79	2,04	3,86	0,66
(VII) RS mit NaOCl ohne H ₂ O	60	1,28	0,60	1,11	2,75	0,21
(VIII) RS mit NaOCl und H ₂ O	60	2,35	0,94	2,33	4,43	0,68
(IX) RS mit EDTA und H ₂ O	60	0,91	0,64	0,79	2,81	0,11
(X) RS mit CHX und H ₂ O	60	1,05	0,65	1,02	2,86	0,24

Abkürzungen: Max.: Maximum, Min.: Minimum; AH: Guttapercha/AH Plus™, RS: RealSeal™/RealSeal SE™; H₂O: isotonischer Kochsalzlösung, NaOCl ohne H₂O: Spülung mit Natriumhypochlorit ohne Abschluss-Spülung mit Kochsalzlösung, NaOCl und H₂O: Spülung mit Natriumhypochlorit, gefolgt von Kochsalzlösung, EDTA und H₂O: EDTA-Spülung, gefolgt von Kochsalzlösung, CHX und H₂O: CHX-Spülung, gefolgt von Kochsalzlösung

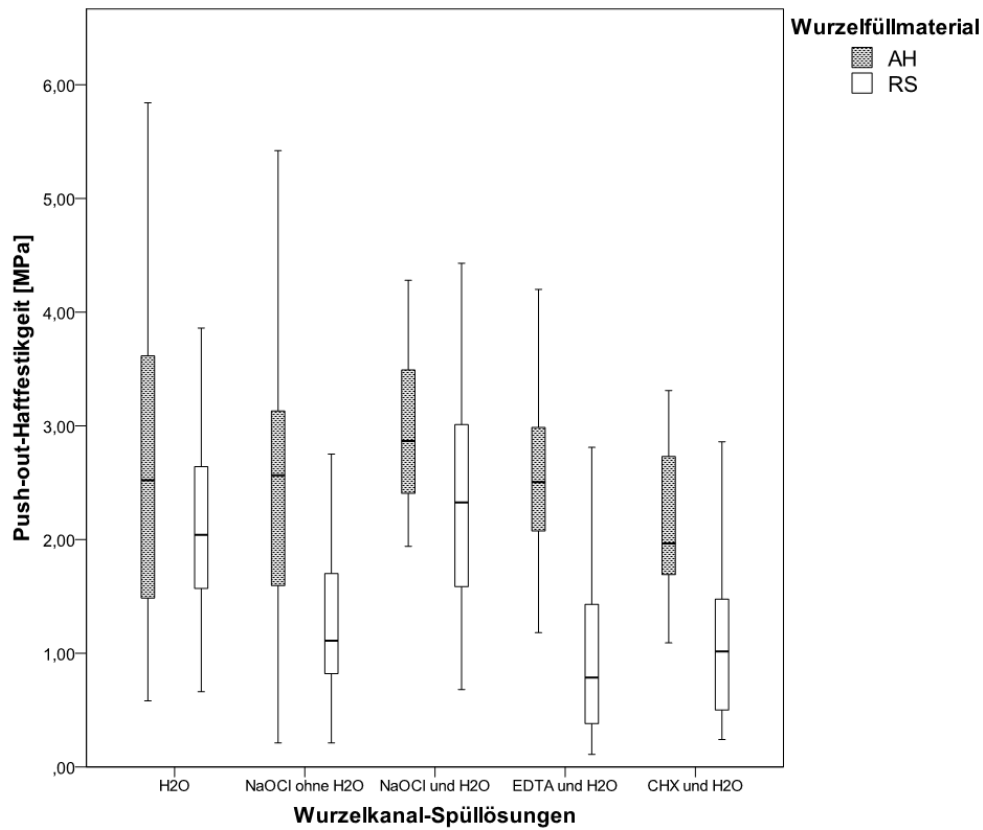


Abb. 10 Boxplot-Diagramm: Push-out-Haftfestigkeit [MPa] in Abhängigkeit von der Spüllösung und der Wahl des Wurzelfüllmaterials

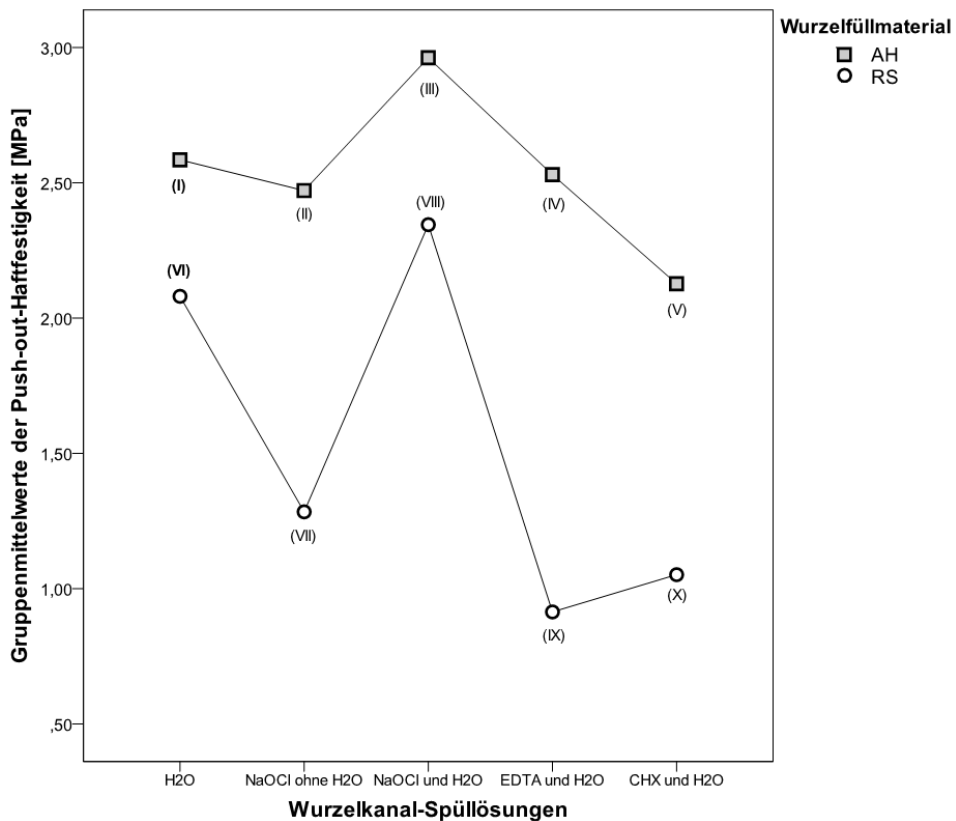


Abb. 11 Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit [MPa] nach Spülprotokoll und eingesetztem Wurzelfüllmaterial (ermöglicht eine graphische Beurteilung der Einzelfaktoren „Wurzelfüllmaterial“ und „Spüllösung“, in Klammern Gruppennummern, Kontrollgruppen fett hervorgehoben).

Für alle Materialkombinationen konnte eine Push-out-Haftfestigkeit der Wurzelfüllmaterialien am Dentin bestimmt werden. Die höchsten Werte erreichte Guttapercha in Kombination mit dem Sealer AH Plus™ nach Spülung der Wurzelkanäle mit Natriumhypochlorit-Lösung, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung (III). Die schwächsten Werte traten bei RealSeal™ in Kombination mit RealSeal SE™ bei einer Spülung der Wurzelkanäle mit EDTA-Lösung, gefolgt von Kochsalzlösung (IX) auf. Die mittlere Push-out-Haftfestigkeit ohne chemische Behandlung der Wurzelkanäle lag bei 2,58 MPa (Standardabweichung $\pm 1,30$ MPa) für AH Plus™ (I) bzw. 2,08 ($\pm 0,79$) MPa für das RealSeal™-System (VI). Die alleinige Verwendung einer Natriumhypochlorit-Spülung führte sowohl bei AH Plus™ zu einer Reduktion der Haftfestigkeit ($2,47 \pm 1,15$ MPa; Gruppe (II)) als auch beim adhäsiven Material ($1,28 \pm 0,60$ MPa; Gruppe (VII)). Eine abschließende Spülung mit Kochsalzlösung nach Verwendung von Natriumhypochlorit erhöhte die mittlere Haftfestigkeit bei beiden Materialkombinationen auf mehr als den Ausgangswert: Es wurden 2,96 ($\pm 0,64$) MPa bei Guttapercha und AH Plus™ (III) bzw. 2,35 ($\pm 0,94$) MPa bei RealSeal™ und RealSeal SE™ (VIII) gemessen. Eine Spülung der Wurzelkanäle mit EDTA, gefolgt von Kochsalzlösung, resultierte in einer mittleren Haftfestigkeit bei AH Plus™ (IV) von 2,53 ($\pm 0,72$) MPa und bei RealSeal SE™ (IX) von 0,91 ($\pm 0,64$) MPa. 2,13 ($\pm 0,63$) MPa wurden bei AH Plus™ bzw. 1,05 ($\pm 0,65$) MPa bei RealSeal SE™ nach Verwendung von CHX, gefolgt von Kochsalzlösung, gemessen (Gruppe (V), bzw. (X)).

Die Analyse der Push-out-Haftfestigkeiten mittels zweifaktorieller ANOVA (Tab. 4) zeigt einen signifikanten Einfluss ($p < 0,001$) der unabhängigen Variablen „Wurzelfüllmaterial“ und „Spüllösung“ auf die abhängige Variable „Push-out-Haftfestigkeit“. Zusätzlich wurde ein signifikanter Einfluss der Interaktion zwischen Material und Spüllösung ($p < 0,001$) festgestellt. Diese Interaktion der Materialien hatte allerdings bei Betrachtung des F-Wertes den geringsten Anteil an der durch die experimentelle Manipulation erklärten Varianz (F-Wert für die Variable „Material“: 213,64; „Spüllösung“: 33,88 und „Interaktion“: 8,68).

Tab. 4 Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA (SPSS) zur Überprüfung des Einflusses der verwendeten Wurzelfüllmaterialien, Spüllösungen sowie deren Interaktionen (Wurzelfüllmaterial * Spüllösung) auf die abhängige Variable „Push-out-Haftfestigkeit“.

Abhängige Variable: Push-out-Haftfestigkeit

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	269,494 ^a	9	29,944	42,654	0,000
Konstanter Term	2484,165	1	2484,165	3538,627	0,000
Wurzelfüllmaterial	149,980	1	149,980	213,643	0,000
Spüllösung	95,130	4	23,782	33,877	0,000
Wurzelfüllmaterial * Spüllösung	24,384	4	6,096	8,684	0,000
Fehler	414,188	590	0,702		
Gesamt	3167,847	600			
Korrigierte Gesamtvariation	683,682	599			

a. R-Quadrat = 0,394 (korrigiertes R-Quadrat = 0,385)

Die zu überprüfenden Nullhypothesen H_{0-M} , H_{0-S} und H_{0-I} sind demnach auf dem 5 %-Signifikanzniveau abzulehnen und die entsprechenden Alternativhypothesen H_{A-M} , H_{A-S} , H_{A-I} sind anzunehmen. Somit haben die Wahl der Wurzelfüllmaterialien und der Spüllösung sowie die Interaktion zwischen den Faktoren „Wurzelfüllmaterial“ und „Spüllösung“ einen signifikanten Einfluss auf die Gruppenmittelwerte der Push-out-Haftfestigkeit.

Da die Varianzanalyse lediglich eine allgemeine Aussage zum Einfluss der verwendeten Wurzelfülllösungen macht, kamen die Post-hoc-Tests Tukey-HSD und Bonferroni-Holm zum Einsatz (Tab. 5). Mit diesen zwei Analysen war es möglich, diejenigen Spüllösungen zu bestimmen, die sich in ihrem Effekt auf die Push-out-Haftfestigkeit unterschieden.

Tab. 5 Ergebnisse der Tukey- und Bonferroni-Post-hoc-Tests (SPSS): zum Vergleich des Einflusses der einzelnen Spüllösungen auf die Push-out-Haftfestigkeit, rot: signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$).

Vergleich der Spülprotokolle		Signifikanz Tukey-HSD	Signifikanz Bonferroni
H₂O	NaOCl ohne H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	NaOCl und H ₂ O	s. [0,026]	s. [0,031]
	EDTA und H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	CHX und H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
NaOCl ohne H₂O	H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	NaOCl und H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	EDTA und H ₂ O	n. s. [0,603]	n. s. [1,000]
	CHX und H ₂ O	n. s. [0,060]	n. s. [0,079]
NaOCl und H₂O	H ₂ O	s. [0,026]	s. [0,031]
	NaOCl ohne H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	EDTA und H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	CHX und H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
EDTA und H₂O	H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	NaOCl ohne H ₂ O	n. s. [0,603]	n. s. [1,000]
	NaOCl und H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	CHX und H ₂ O	n. s. [0,735]	n. s. [1,000]
CHX und H₂O	H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	NaOCl ohne H ₂ O	n. s. [0,060]	n. s. [0,079]
	NaOCl und H ₂ O	s. [$<0,001$]	s. [$<0,001$]
	EDTA und H ₂ O	n. s. [0,735]	n. s. [1,000]

Abkürzungen: s.: signifikant, n. s.: nicht signifikant; H₂O: Spülung mit isotonischer Kochsalzlösung, NaOCl ohne H₂O: Spülung mit Natriumhypochlorit ohne Abschluss-Spülung mit Kochsalzlösung, NaOCl und H₂O: Spülung mit Natriumhypochlorit, gefolgt von Kochsalzlösung, EDTA und H₂O: EDTA-Spülung, gefolgt von Kochsalzlösung, CHX und H₂O: CHX-Spülung, gefolgt von Kochsalzlösung

Aus den Post-hoc-Tests (Tab. 5) und den homogenen Untergruppen (Tab. 6) wird ersichtlich, dass nach Spülung mit Natriumhypochlorit, gefolgt von isotonischer Kochsalzlösung, die Haftfestigkeit signifikant ($p \leq 0,05$) höher ist als bei allen anderen Spüllösungen. Bei ausschließlicher Verwendung von isotonischer Kochsalzlösung verringert sich die Haftfestigkeit signifikant ($p \leq 0,05$), liegt aber immer noch höher als bei Spülungen mit CHX, EDTA oder Natriumhypochlorit ohne anschließende Spülungen mit isotonischer Kochsalzlösung ($p < 0,001$). Die Ergebnisse einer Spülung mit CHX, EDTA und Natriumhypochlorit ohne abschließenden Gebrauch von isotonischer Kochsalzlösung unterscheiden sich hingegen nicht signifikant voneinander ($p > 0,05$). Die Ergebnisse des Tukey-HSD-Tests werden von der Bonferroni-Holm-Analyse bestätigt und können ebenfalls Tabelle 5 entnommen werden.

Tab. 6 Homogene Untergruppen (SPSS): kein signifikanter Unterschied der Wirkung der Spülprotokolle mit CHX, EDTA und NaOCl ohne H₂O (Untergruppe 1); reine Kochsalzlösung (Untergruppe 2) zeigt signifikant andere Wirkung mit Natriumhypochlorit, gefolgt von Kochsalzlösung (Untergruppe 3); Betrachtung unabhängig vom verwendeten Wurzelfüllmaterial

Wurzelkanalspüllösung	Homogene Untergruppen		
	1	2	3
CHX und H ₂ O	1,5890		
EDTA und H ₂ O	1,7218		
NaOCl ohne H ₂ O	1,8773		
H ₂ O		2,3323	
NaOCl und H ₂ O			2,6534
Signifikanz	0,060	1,000	1,000

Mittelwerte für Gruppen in homogenen Untergruppen werden angezeigt

Grundlage: beobachtete Mittelwerte

Der Fehlerterm ist Mittel der Quadrate (Fehler) = 0,702

a. Verwendet Stichprobengrößen des harmonischen Mittels = 120,000

b. Alpha = 0,05

Zur genauen Bestimmung, in welchen experimentellen Gruppen sich die Haftfestigkeitswerte unterschieden, wurde der zweiseitige Kruskal-Wallis-Test für unverbundene Stichproben verwendet. Das allgemeine Signifikanz-Niveau von 5 % wurde nach Bonferroni-Holm adjustiert und zeigt signifikante Unterschiede bei $p \leq 0,0011$ an. Dieses sehr konservative Vorgehen sollte eine Alpha-Fehler-Kumulierung bei den multiplen Vergleichen verhindern. Die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests sind in Tabelle 8 dargestellt und werden kurz aufgeführt. Zur besseren Übersicht dient Abbildung 11.

- **Gruppe (I) AH mit H₂O** unterscheidet sich signifikant ausschließlich und mit höheren Haftfestigkeitswerten von den Gruppen (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O, (IX) RS mit EDTA und H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Der Unterschied zur Kontrollgruppe (VI) von RealSeal SE™ mit alleiniger Wurzelspülung durch isotonische Kochsalzlösung ist laut Kruskal-Wallis-Test nicht signifikant.
- Auch die **Gruppe (II) AH mit NaOCl ohne H₂O** unterscheidet sich signifikant ausschließlich und mit höheren Push-out-Werten von den Gruppen (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O, (IX) RS mit EDTA und H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Die Unterschiede zur Kontrollgruppe mit Guttapercha (I) als auch zur Resilon™-Kontrollgruppe (VI) sind nicht signifikant (Kruskal-Wallis-Test).
- **Gruppe (III) AH mit NaOCl und H₂O** zeigt nur zur Kontrollgruppe (I) AH und H₂O, (II) AH mit NaOCl ohne H₂O sowie (IV) AH mit EDTA und H₂O keine signifikanten Unterschiede. Im Vergleich zu allen übrigen Gruppen, demnach auch zur Kontrollgruppe (VI), weist AH Plus™ nach Spülung mit Natriumhypochlorit und isotonischer Kochsalzlösung bessere Haftfestigkeitswerte auf (Kruskal-Wallis-Test).

- **Gruppe (IV) AH mit EDTA und H₂O** weist signifikant bessere Haftfestigkeitswerte auf im Vergleich zu den Gruppen (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O, (IX) RS mit EDTA und H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Die Unterschiede zu den Kontrollgruppen (I) und (VI) sind nicht signifikant (Kruskal-Wallis-Test).
- **Gruppe (V) AH mit CHX und H₂O** unterscheidet sich mit signifikant schlechteren Push-out-Haftfestigkeitswerten von der Gruppe (III) AH mit NaOCl und H₂O und mit signifikant höheren Werten von den Gruppen (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O, (IX) RS mit EDTA und H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Im Vergleich zu den Kontrollgruppen (I) und (VI) weist Guttapercha/AH Plus™ nach Wurzelkanalspülung mit CHX und isotonischer Kochsalzlösung keine signifikanten Unterschiede auf (Kruskal-Wallis-Test).
- **Gruppe (VI) RS mit H₂O** zeigt ebenfalls signifikant schlechtere Haftfestigkeitswerte als die Gruppe (III) AH mit NaOCl und H₂O, aber signifikant höhere Werte als die Gruppen (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O, (IX) RS mit EDTA und H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Die Unterschiede zur Kontrollgruppe (I) AH Plus™ mit isotonischer Kochsalzlösung sind nicht signifikant (Kruskal-Wallis-Test).
- **Gruppe (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O** hingegen unterscheidet sich mit signifikant schlechteren Werten von allen anderen Gruppen außer (IX) RS mit EDTA und H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Die beiden Kontrollgruppen (I) und (VI) weisen signifikant höhere Push-out-Haftfestigkeiten auf (Kruskal-Wallis-Test).
- Die Haftfestigkeitswerte der **Gruppe (VIII) RS mit NaOCl und H₂O** sind signifikant schlechter als die der Gruppe (III) AH mit NaOCl und H₂O, aber signifikant besser als in den Gruppen (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O, (IX) RS mit EDTA und H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zu den Kontrollgruppen (I) und (VI) festgestellt werden (Kruskal-Wallis-Test).
- **Gruppe (IX) RS mit EDTA und H₂O** zeigt signifikant schlechtere Push-out-Werte im Vergleich zu allen anderen Gruppen, außer zu (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O sowie (X) RS mit CHX und H₂O. Die beiden Kontrollgruppen (I) und (VI) weisen signifikant höhere Werte auf (Kruskal-Wallis-Test).
- **Gruppe (X) RS mit CHX und H₂O** unterscheidet sich – mit signifikant schlechteren Haftfestigkeiten – von allen anderen Gruppen außer (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O sowie (IX) RS mit EDTA und H₂O. Die Kontrollgruppen (I) und (VI) erreichen signifikant höhere Werte als die Gruppe (X) (Kruskal-Wallis-Test).

Tab. 7 durchschnittliche Push-out-Haftfestigkeitswerte [MPa] der Wurzelfüllmaterialien, gemittelt über alle Spüllösungen

Wurzelfüllmaterial	Mittelwert	Standardabweichung
Guttapercha/AH Plus™	2,53	0,96
RealSeal™/RealSeal SE™	1,53	0,93

Tab. 8 Paarweise Vergleiche aller Versuchsgruppen nach Kruskal-Wallis (SPSS): Signifikanzniveau adjustiert nach Bonferroni, Unterschiede zwischen den Gruppen werden bei $p \leq 0,0011$ als signifikant angezeigt, Gruppennummern in runden und Signifikanzwerte in eckigen Klammern

	(I) AH mit H ₂ O	(II) AH mit NaOCl ohne H ₂ O	(III) AH mit NaOCl und H ₂ O	(IV) AH mit EDTA und H ₂ O	(V) AH mit CHX und H ₂ O	(VI) RS mit H ₂ O	(VII) RS mit NaOCl ohne H ₂ O	(VIII) RS mit NaOCl und H ₂ O	(IX) RS mit EDTA und H ₂ O	(X) RS mit CHX und H ₂ O
(I) AH mit H ₂ O	---	n.s. [0,869]	n.s. [0,005]	n.s. [0,523]	n.s. [0,140]	n.s. [0,077]	s. [<0,001]	n.s. [0,609]	s. [<0,001]	s. [<0,001]
(II) AH mit NaOCl ohne H ₂ O	n.s. [0,869]	---	n.s. [0,003]	n.s. [0,421]	n.s. [0,191]	n.s. [0,108]	s. [<0,001]	n.s. [0,729]	s. [<0,001]	s. [<0,001]
(III) AH mit NaOCl und H ₂ O	n.s. [0,005]	n.s. [0,003]	---	n.s. [0,028]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]
(IV) AH mit EDTA und H ₂ O	n.s. [0,523]	n.s. [0,421]	n.s. [0,028]	---	n.s. [0,035]	n.s. [0,016]	s. [<0,001]	n.s. [0,250]	s. [<0,001]	s. [<0,001]
(V) AH mit CHX und H ₂ O	n.s. [0,140]	n.s. [0,191]	s. [<0,001]	n.s. [0,035]	---	n.s. [0,766]	s. [<0,001]	n.s. [0,336]	s. [<0,001]	s. [<0,001]
(VI) RS mit H ₂ O	n.s. [0,077]	n.s. [0,108]	s. [<0,001]	n.s. [0,016]	n.s. [0,766]	---	s. [<0,001]	n.s. [0,208]	s. [<0,001]	s. [<0,001]
(VII) RS mit NaOCl ohne H ₂ O	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	---	s. [<0,001]	n.s. [0,062]	n.s. [0,239]
(VIII) RS mit NaOCl und H ₂ O	n.s. [0,609]	n.s. [0,729]	s. [<0,001]	n.s. [0,250]	n.s. [0,336]	n.s. [0,208]	s. [<0,001]	---	s. [<0,001]	s. [<0,001]
(IX) RS mit EDTA und H ₂ O	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	n.s. [0,062]	s. [<0,001]	---	n.s. [0,490]
(X) RS CHX und H ₂ O	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	s. [<0,001]	n.s. [0,239]	s. [<0,001]	n.s. [0,490]	---

Abkürzungen: s.: signifikant, n.s.: nicht signifikant; AH: Guttapercha/AH Plus™, RS: Real Seal™/Real Seal SE™; H₂O: isotonischer Kochsalzlösung, NaOCl ohne H₂O: Spülung mit Natriumhypochlorit ohne Abschluss-Spülung mit Kochsalzlösung, NaOCl und H₂O: Spülung mit Natriumhypochlorit, gefolgt von Kochsalzlösung, EDTA und H₂O: EDTA-Spülung, gefolgt von Kochsalzlösung, CHX und H₂O: CHX-Spülung, gefolgt von Kochsalzlösung

Im Folgenden werden ausgewählte (Mess-) Werte der experimentellen Arbeit aufgeführt.

Tab. 9 Wertetabelle Gruppe (I) AH mit H₂O: Mittelwert der Push-out-Haftkraft 2,58 MPa, Standardabweichung 1,30 MPa, 95 %-Konfidenzintervall des Mittelwerts [2,37 MPa; 2,80 MPa], Minimum 0,58 MPa, Maximum 5,84 MPa, Median 2,52 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	3,00	1,56	2,88	1,23	7,19	2,66
2	3,57	5,74	3,28	3,01	7,69	3,94
3	4,01	2,36	6,16	3,05	6,69	3,20
4	5,92	3,70	7,36	3,17	4,75	2,00
5	4,92	3,09	5,38	2,96	8,10	3,83
6	1,09	0,78	6,74	3,07	4,93	2,08
7	9,65	3,60	5,02	1,83	16,86	5,84
8	9,91	4,34	7,06	2,87	10,72	2,78
9	9,80	4,79	6,54	2,71	8,44	4,11
10	7,12	3,63	4,93	2,20	6,35	2,38
11	7,75	4,21	4,15	1,65	5,82	2,82
12	7,43	3,66	4,45	1,83	10,09	3,85
13	2,45	0,95	16,17	5,07	13,57	4,48
14	4,15	1,75	12,05	3,80	3,60	0,96
15	2,48	1,24	2,25	0,89	2,51	1,08
16	3,42	1,85	3,09	1,25	3,68	1,41
17	3,60	1,90	1,75	0,89	2,52	1,22
18	3,14	2,20	2,46	1,19	1,95	0,82
19	3,82	2,34	3,35	1,81	2,55	1,20
20	4,57	2,71	1,13	0,58	6,07	2,95

Tab. 10 Wertetabelle Gruppe (II) AH mit NaOCl ohne H₂O: Mittelwert 2,47 MPa, Standardabweichung 1,15 MPa, 95 %-Konfidenzintervall [2,26 MPa; 2,68 MPa], Minimum 0,21 MPa, Maximum 5,42 MPa, Median 2,57 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	3,14	2,20	5,80	3,15	11,96	4,89
2	3,50	2,19	5,10	2,65	6,98	2,57
3	3,81	2,37	5,60	2,76	7,72	3,92
4	5,64	3,12	5,74	2,67	12,06	4,16
5	5,44	3,14	7,95	4,68	5,88	2,32
6	7,34	4,44	3,65	1,95	0,57	0,21
7	4,98	3,02	6,00	3,11	7,45	3,47
8	6,87	4,06	5,30	3,03	11,72	5,42
9	5,94	4,02	5,35	2,56	9,10	3,44
10	3,74	2,34	2,89	1,57	6,95	3,44
11	5,05	3,50	4,34	2,34	2,91	1,18
12	2,37	1,29	7,59	2,94	7,30	2,72
13	4,42	2,61	2,72	1,23	6,84	2,69
14	4,01	2,51	1,70	0,89	2,16	1,11
15	3,43	1,90	1,75	0,82	1,86	0,90
16	5,02	2,75	2,02	1,00	4,12	1,94
17	4,15	2,43	1,69	0,94	2,29	1,05
18	2,60	1,63	4,77	2,69	1,18	0,69
19	5,84	3,38	3,12	1,62	2,96	1,85
20	4,46	2,78	1,30	0,69	2,78	1,31

Tab. 11 Wertetabelle Gruppe (III) AH mit NaOCl und H₂O: Mittelwert der Push-out-Haftfestigkeit 2,96 MPa, Standardabweichung 0,64 MPa, 95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert [2,75 MPa; 3,17 MPa], Minimum 1,94 MPa, Maximum 4,28 MPa, Median 2,87 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	7,87	2,79	11,78	3,83	10,56	2,98
2	7,64	4,02	8,04	3,79	7,62	3,06
3	7,05	3,99	3,97	2,04	4,35	2,43
4	3,01	2,09	6,60	3,74	7,52	3,45
5	3,95	2,37	7,58	3,62	5,57	2,45
6	7,56	4,28	4,82	2,31	7,65	3,23
7	6,21	2,49	7,80	2,73	9,14	3,47
8	3,60	2,03	6,35	2,85	6,37	2,21
9	8,07	3,91	6,46	2,95	5,97	2,57
10	4,03	2,32	5,50	2,48	7,82	3,24
11	5,10	2,19	7,30	2,65	8,31	2,97
12	3,84	2,69	3,55	1,95	6,34	3,01
13	6,50	2,95	7,25	3,21	9,26	3,04
14	6,33	2,85	12,02	3,92	5,63	1,94
15	6,52	4,21	5,61	2,87	5,04	2,36
16	4,02	2,11	7,08	3,61	6,77	2,84
17	5,26	3,49	4,18	2,38	7,61	3,49
18	3,63	2,36	5,65	2,78	5,57	2,20
19	6,22	3,48	4,52	2,49	6,00	2,86
20	5,71	3,79	7,45	3,79	8,03	3,51

Tab. 12 Wertetabelle Gruppe (IV) AH mit EDTA und H₂O: Mittelwert der Push-out-Haftfestigkeit 2,53 MPa, Standardabweichung 0,72 MPa, 95 %-Konfidenzintervall [2,32 MPa; 2,74 MPa], Minimum der Push-out-Haftfestigkeit 1,18 MPa, Maximum 4,20 MPa, Median 2,51 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	6,92	4,20	4,57	2,94	5,39	2,58
2	6,55	3,41	5,54	2,73	4,67	2,29
3	4,96	2,76	5,18	2,08	8,82	3,10
4	7,56	3,85	4,84	2,19	7,25	2,98
5	4,63	2,69	4,11	2,07	5,34	2,54
6	4,60	2,94	3,21	1,85	5,14	2,47
7	5,23	3,41	4,09	2,09	5,24	1,79
8	3,47	2,56	5,49	2,91	2,77	1,27
9	3,53	2,26	4,58	2,37	4,82	2,41
10	6,15	3,67	6,40	3,46	4,91	2,39
11	2,65	1,64	3,51	1,94	3,04	1,39
12	3,83	2,13	2,36	1,18	6,84	3,06
13	8,59	3,69	5,67	2,15	5,49	1,79
14	5,50	3,80	4,40	2,28	3,13	1,59
15	5,81	3,13	3,95	2,16	6,35	2,65
16	3,59	2,56	5,17	2,96	5,68	2,36
17	5,70	3,39	5,57	2,94	2,78	1,34
18	6,07	3,76	5,00	2,22	7,90	2,78
19	4,29	3,09	2,68	1,42	3,88	1,92
20	4,95	2,99	2,67	1,48	3,40	1,74

Tab.13 Wertetabelle (V) AH mit CHX und H₂O: Mittelwert der Haftfestigkeit 2,13 MPa, Standardabweichung 0,63 MPa, 95 %-Konfidenzintervall [1,91 MPa; 2,34 MPa], Minimum 1,09 MPa, Maximum 3,31 MPa, Median 1,96 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	2,40	1,24	6,42	3,23	6,58	2,53
2	5,66	1,91	7,74	1,84	10,45	2,32
3	4,62	2,67	5,33	2,26	4,39	1,59
4	3,68	1,79	6,65	2,98	4,25	1,89
5	2,64	1,75	5,15	2,84	3,76	1,73
6	4,85	1,59	11,85	3,03	11,10	2,59
7	3,50	2,14	3,85	2,10	8,81	2,79
8	3,07	2,03	4,27	1,97	2,95	1,26
9	2,33	1,46	3,06	1,80	3,43	1,69
10	2,66	1,69	3,53	1,92	2,72	1,40
11	2,71	1,72	5,96	2,95	4,11	1,89
12	4,94	2,89	5,46	3,03	2,79	1,33
13	5,84	3,09	2,88	1,34	2,91	1,26
14	3,60	2,16	4,68	1,85	6,68	1,80
15	4,73	2,92	5,41	3,15	5,10	2,61
16	3,10	1,85	5,33	2,86	4,97	2,46
17	2,93	1,96	4,98	2,87	5,78	2,57
18	1,95	1,20	2,17	1,25	2,22	1,09
19	3,30	2,37	7,74	3,31	3,14	1,27
20	3,77	2,21	2,46	1,38	6,33	2,93

Tab.14 Wertetabelle Gruppe (VI) RS mit H₂O: Mittelwert 2,08 MPa, Standardabweichung 0,79 MPa, 95 %-Konfidenzintervall [1,87 MPa; 2,29 MPa], Minimum 0,66 MPa, Maximum 3,86 MPa, Median 2,04 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	2,97	1,86	5,18	3,00	2,88	1,42
2	5,05	3,10	1,46	1,01	3,02	1,61
3	2,97	1,68	4,09	1,92	7,16	3,39
4	2,74	1,04	4,06	1,72	1,79	0,72
5	3,01	1,61	4,57	2,19	3,05	1,48
6	4,43	2,24	4,16	1,72	5,14	2,41
7	2,66	1,91	5,48	2,39	7,21	2,24
8	4,85	2,43	1,55	0,66	2,48	0,79
9	6,40	3,86	5,82	3,26	5,78	2,77
10	2,31	1,52	4,66	2,60	1,78	0,85
11	3,40	2,08	3,75	1,73	3,56	1,85
12	5,55	3,06	3,20	1,60	5,97	3,06
13	1,42	0,67	5,24	1,45	8,55	2,31
14	3,57	2,32	4,67	2,61	5,35	1,86
15	5,00	2,64	4,16	2,21	2,09	0,82
16	2,63	1,54	4,68	2,39	4,90	2,09
17	4,93	2,64	4,00	1,97	4,77	2,00
18	7,10	2,89	3,07	1,09	9,92	2,96
19	4,20	2,95	6,97	3,62	7,58	3,24
20	4,44	1,92	2,75	1,13	7,54	2,71

Tab. 15 Wertetabelle Gruppe (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O: Mittelwert 1,28 MPa, Standardabweichung 0,60 MPa, 95 %-Konfidenzintervall des Mittelwerts [1,07 MPa; 1,50 MPa], Minimum 0,21 MPa, Maximum 2,75 MPa, Median 1,11 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	3,82	2,30	0,87	0,50	3,23	1,62
2	2,40	1,34	3,22	2,05	2,68	1,07
3	1,45	0,72	3,92	1,71	4,92	1,85
4	3,63	1,87	1,29	0,66	2,46	1,06
5	1,73	1,05	1,94	0,83	1,18	0,43
6	3,61	1,41	3,16	1,06	3,16	0,81
7	3,20	1,72	2,14	1,07	5,70	2,13
8	2,57	1,53	4,74	2,75	1,69	0,78
9	4,66	2,34	1,84	0,81	5,02	2,13
10	1,81	1,12	3,49	1,91	3,15	0,90
11	2,68	1,69	5,34	2,58	1,84	0,61
12	2,31	1,34	4,46	2,14	4,75	1,63
13	2,60	1,64	4,90	2,12	1,82	0,60
14	0,32	0,21	2,91	1,28	2,42	0,88
15	0,35	0,22	1,90	1,06	1,72	0,87
16	1,72	1,04	2,47	1,31	1,52	0,73
17	1,28	0,77	1,88	1,04	3,01	1,42
18	2,15	1,06	1,36	0,51	3,83	1,10
19	2,32	1,41	2,35	1,35	0,97	0,55
20	2,51	1,37	2,23	1,02	6,27	1,95

Tab. 16 Wertetabelle Gruppe (VIII) RS mit NaOCl und H₂O: Mittelwert der Haftfestigkeit 2,35 MPa, Standardabweichung 0,94 MPa, 95 %-Konfidenzintervall [2,13 MPa; 2,56 MPa], Minimum 0,68 MPa, Maximum 4,43 MPa, Median 2,33 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	4,36	2,71	3,86	1,59	6,49	1,38
2	3,77	2,42	4,36	2,15	4,69	2,15
3	8,14	3,80	3,04	0,96	3,30	0,99
4	5,50	3,26	4,94	2,61	7,21	4,16
5	2,87	1,58	4,03	1,92	1,49	0,68
6	3,90	2,34	8,24	3,86	11,22	4,43
7	3,34	2,16	1,35	0,75	7,55	3,80
8	2,50	1,85	5,22	2,75	4,42	2,09
9	3,49	2,05	7,54	3,64	2,04	0,83
10	4,56	2,36	7,00	3,03	2,91	1,16
11	3,75	1,53	5,82	2,31	3,57	1,24
12	4,55	2,74	6,79	3,72	6,83	2,99
13	5,02	2,53	6,51	3,24	8,43	2,81
14	6,01	3,07	3,59	1,44	2,60	0,75
15	3,53	2,18	1,77	0,86	5,68	2,31
16	7,19	2,85	4,52	1,96	4,35	1,46
17	5,66	3,31	5,98	3,18	3,74	1,85
18	5,79	2,74	5,62	2,61	3,30	1,34
19	3,88	2,04	9,85	3,41	14,77	3,46
20	2,82	1,74	4,75	2,57	5,14	2,97

Tab. 17 Wertetabelle (IX) RS mit EDTA und H₂O: Mittelwert der Push-out-Haftfestigkeit bei 0,91 MPa, Standardabweichung 0,64 MPa, 95 %-Konfidenzintervall [0,70 MPa; 1,13 MPa], Minimum 0,11 MPa, Maximum 2,81 MPa, Median 0,79 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	7,15	2,81	5,07	1,86	1,46	0,48
2	2,93	1,77	1,49	0,83	0,59	0,28
3	3,51	2,13	2,69	1,46	0,85	0,36
4	2,87	1,79	3,30	1,60	1,87	0,96
5	0,96	0,56	1,62	0,83	0,67	0,28
6	1,03	0,62	0,40	0,20	0,25	0,11
7	1,47	0,89	1,85	0,97	2,17	1,03
8	0,76	0,41	0,71	0,34	1,41	0,65
9	1,20	0,63	1,24	0,59	0,53	0,24
10	1,26	0,82	3,17	1,40	2,12	0,79
11	2,76	1,92	0,54	0,29	0,41	0,17
12	1,02	0,67	1,01	0,53	0,43	0,19
13	1,69	1,00	3,99	1,77	0,31	0,12
14	3,03	1,50	1,05	0,50	0,33	0,11
15	2,99	1,94	0,78	0,36	1,26	0,52
16	1,99	1,15	2,29	1,13	1,49	0,58
17	3,23	1,65	2,45	1,04	1,02	0,40
18	3,27	1,82	2,30	1,16	0,53	0,27
19	1,25	0,78	3,76	2,07	0,93	0,45
20	2,35	1,57	0,64	0,35	2,03	1,12

Tab. 18 Wertetabelle Gruppe (X) RS mit CHX und H₂O: Mittelwert 1,05 MPa, Standardabweichung 0,65 MPa, 95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert [0,84 MPa; 1,26 MPa], Minimum 0,24 MPa, Maximum 2,86 MPa, Median 1,02 MPa

Proben	apikale Scheiben		mittlere Scheiben		koronale Scheiben	
	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]	Kraft [N]	Kraft/Fläche [MPa]
1	2,52	1,39	1,89	0,86	1,54	0,58
2	1,58	2,43	1,45	1,49	0,79	0,42
3	1,15	0,71	3,27	1,61	3,61	1,72
4	0,73	0,43	3,20	1,42	1,34	0,53
5	3,05	1,69	2,66	1,34	2,52	1,22
6	2,81	2,15	2,74	1,38	4,59	1,46
7	2,23	1,15	2,64	1,23	0,72	0,30
8	3,06	1,52	1,43	0,62	0,88	0,26
9	4,88	2,49	1,34	0,63	1,68	0,69
10	1,29	0,69	0,59	0,28	1,45	0,54
11	3,69	2,13	0,41	0,24	0,87	0,41
12	2,84	1,39	4,20	1,73	1,50	0,64
13	2,80	1,13	3,58	1,18	1,16	0,34
14	8,03	2,86	1,08	0,36	3,10	0,92
15	0,59	0,30	4,02	1,76	1,01	0,39
16	3,49	1,84	0,78	0,35	0,79	0,31
17	0,92	0,51	1,05	0,56	2,23	1,07
18	1,92	1,20	2,12	1,20	0,99	0,40
19	1,94	1,12	0,84	0,49	1,05	0,56
20	2,56	1,61	3,53	1,89	2,11	0,96

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methodik

6.1.1 Push-out-Test

Seit Entwicklung der Säure-Ätz-Technik an Zahnschmelz durch Buonocore 1955 und der Möglichkeit, einen Verbund zum hydrophilen Dentin zu erreichen (Bowen, 1965), hat sich in der adhäsiven Zahnheilkunde ein rasanter Wandel vollzogen. Als Ausdruck der ständigen Bemühungen, die vorhandenen Adhäsive und Komposite zu verbessern, kann die Vielzahl der neu entwickelten Produkte in relativ kurzen Zeitabständen angesehen werden. Auf Grund der hohen Zahl an kommerziell erhältlichen Systemen werden In-vitro-Studien in der präklinischen Phase durchgeführt, um Materialeigenschaften zu testen und erste Voraussagen zum späteren Nutzen zu erstellen. So können Ergebnisse in relativ kurzer Zeit und mit vergleichsweise geringem Aufwand gewonnen werden. Bei In-vitro-Studien lassen sich wichtige experimentelle Variablen standardisieren, um verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Genauso wie die Materialien unterliegen auch die Testverfahren einer ständigen Veränderung, wodurch zahlreiche Methoden gebräuchlich wurden. Neben den häufig verwendeten Zug- („tensile bond strength test“) und Scherversuchen („shear bond strength test“) kommen zunehmend Ausstoßversuche („push-out bond strength test“) zur Anwendung. Erstmals beschrieben wurde das Push-out-Verfahren 1970 von Roydhouse, später modifiziert unter anderem von Haller et al. sowie Frankenberger et al. (Haller et al., 1993b; Frankenberger et al., 1999). In der hier angewandten Version werden aus wurzelgefüllten Zähnen durch Sägeschnitte im rechten Winkel zur Wurzellängsachse hergestellte Scheiben als Proben verwendet. Diese Scheiben werden auf einer mit einer Aussparung versehenen Auflagefläche platziert, anschließend werden die Wurzelfüllungen mit einem dem jeweiligen Kanaldurchmesser angepassten Stempel durch senkrechten und mittigen Druck in apikal-koronaler Richtung herausgedrückt. Die bei dem beschriebenen Vorgang auftretenden Kräfte werden gemessen und unter Einbeziehung der adhäsiven Wurzelkanalfläche wird die Push-out-Haftfestigkeit bestimmt. Beachtet werden muss bei diesem theoretischen Ansatz, dass die im Versuch bestimmte Push-out-Haftfestigkeit nicht allein auf den Einfluss der Scherkräfte zurückzuführen ist, sondern sich vielmehr aus den Faktoren „Friktion“, „mechanische Verankerung“ und „chemischer Bindung“ zusammensetzt (Goracci et al., 2005; Marques Melo et al., 2008). Die Haftkräfte der Wurzelfüllmaterialien sind demnach geringer als die gemessenen maximalen Kräfte beim Ausstoß (Goracci et al., 2005; Goracci et al., 2007). Durch die Verwendung von 1 mm dünnen Wurzelscheiben minimiert der hier angewandte „thin slice push-out test“ den Einfluss der mechanischen Verformung beim Pressen im Gegensatz zu dickeren Proben (Frankenberger et al., 1999; Sudsangiam und van Noort, 1999). Durch den Einsatz von Stempeln, deren Durchmesser annähernd dem der

Wurzelkanäle entspricht, kann die Druckkraft flächig auf das Wurzelfüllmaterial einwirken, die Gefahr einer mechanischen Verformung bzw. des Verkantens desselben im Kanal wird minimiert (Nagas et al., 2011). In der vorliegenden Studie kamen Stempel zum Einsatz, deren Querschnitt maximal 0,2 mm kleiner als der apikale Wurzelkanaldurchmesser war. Im Verhältnis zum Kanalquerschnitt größere Stempel wurden in Vorversuchen verworfen, da es nicht gelang, ein Berühren der Wurzelkanalwände sicher zu vermeiden.

Angesichts der zahlreichen Einzelschritte bei der Versuchsdurchführung verwundert die große Menge an beeinflussenden Faktoren nicht, die zu einer hohen Varianz der Ergebnisse führen können (Pashley et al., 1995; Leloup et al., 2001; Munck et al., 2012). Auf Grund des ausgeprägten Einflusses von Versuchsaufbau und -durchführung sowie der großen Unterschiede zwischen verschiedenen Laboratorien in Bezug auf die Haftwerte erscheint es kaum möglich, das Haftfestigkeitsvermögen als eine spezifische Materialeigenschaft zu bestimmen (van Meerbeek et al., 2010). Leider gibt es derzeit keine vollständig standardisierten Versuchsaufbauten, weshalb die Ergebnisse von In-vitro-Studien zum Thema Haftfestigkeit an Zahnhartsubstanzen sehr stark variieren (Salz und Bock, 2010). Diese große Bandbreite lässt einen direkten Vergleich der in verschiedenen Studien gewonnenen Messergebnisse als nicht sinnvoll erscheinen (Sudsangiam und van Noort, 1999; Munck et al., 2005; Salz und Bock, 2010). Vielmehr wird, unter anderem von der FDI, die Forderung vertreten, die getesteten Substanzen / Systeme nur anhand der Rangfolge ihrer Ergebnisse zu bewerten (Fédération Dentaire Internationale, 1990).

Ein weiterer wichtiger Nachteil von In-vitro-Untersuchungen ist ihre begrenzte Aussagekraft zum klinischen Erfolg einer Therapie (Sudsangiam und van Noort, 1999). So ist es zwar möglich, in Laboruntersuchungen Einflussfaktoren zu untersuchen, aber eine Nachstellung der In-vivo-Situation ist in ihrer gesamten Komplexität nicht möglich (van Meerbeek et al., 2010). Im vorliegenden Fall können Aussagen zur Haftfestigkeit des adhäsiven Materials RealSeal™ unter Verwendung verschiedener Spüllösungen und im Vergleich zu den Kontrollgruppen mit Guttapercha/AH Plus™ gemacht werden. Eine verbesserte Haftung von RealSeal™ wird günstiger Weise auch die Wurzeln versteifen. Ob dies aber klinisch signifikant ist und zu einer verringerten Zahl an Wurzelfrakturen führt, kann nicht beurteilt werden; zumal bekannt ist, dass konventionelle Wurzelfüllungen die durch Hartsubstanzverlust bedingte geringere Frakturresistenz nicht ausgleichen können (Dietschi et al., 2007; Belli et al., 2011). Stiftmaterialien mit einem deutlich höheren E-Modul als Dentin begünstigen wiederum Brüche der restlichen Zahnhartsubstanz (Fredriksson et al., 1998; Asmussen et al., 1999; Akkayan und Gülmez, 2002). Angemerkt werden muss auch, dass für den klinischen Erfolg einer Wurzelfüllung und das In-situ-Überleben der betroffenen Zähne weniger die Frakturresistenz ausschlaggebend ist als vielmehr die Dichtigkeit der endodontischen Versorgung (Hülsmann,

2008). So sind Infektionen des Wurzelkanals und damit im Zusammenhang stehende apikale Parodontitiden die häufigsten Ursachen für Misserfolge in der Endodontie (Lin et al., 1992; Siqueira, 2001). Die Herstellung einer direkten Beziehung zwischen einer guten Haftung am Zahnhartgewebe und daraus resultierender überlegener Dichtigkeit scheint daher nicht ausnahmslos möglich. So wurden sowohl bei höheren (Nagas et al., 2009) als auch bei geringeren Haftfestigkeitswerten überlegene Dichtigkeiten gefunden (Sudsangiam und van Noort, 1999; Schwartz, 2006).

6.1.2 Versuchszähne

In der vorliegenden Studie diente das Dentin von 200 Wurzeln menschlicher Zähne der zweiten Dentition als Haftungssubstrat. Einbezogen wurden sowohl Zähne mit klinisch gesunder Hartschicht als auch solche mit kariösen Läsionen der Zahnkrone, Füllungen und/oder Kronen. Nur Zähne mit ungeraden Wurzeln oder bereits begonnener endodontischer Therapie wurden ausgeschlossen sowie alle Zähne mit Karies im Wurzelbereich. Diese Auswahlkriterien bezogen Zähne in einem sehr unterschiedlichen Ausgangszustand ein, um die in der klinischen Behandlungssituation gegebene Vielfalt abzubilden.

Da von Seiten der beteiligten Zahnarztpraxen die Indikationen zur Extraktion nicht separat für jeden Zahn dokumentiert wurden, können keine Angaben zu den Extraktionsgründen gemacht werden. Allerdings werden allgemein eine fortgeschrittene Karies mit weitest gehender Zerstörung der klinischen Krone sowie mit zunehmendem Lebensalter verstärkt auftretende parodontale Erkrankungen als hauptsächliche Extraktionsgründe angesehen (Reich und Hiller, 1993; Bahrami et al., 2008). Der augenscheinliche Zustand der Präparate korrelierte mit den genannten Erkenntnissen. Ebenfalls nicht erhoben wurde das Alter der Patienten, wodurch der Sklerosierungsgrad des Wurzel Dentins unbekannt blieb. Eventuell negative Auswirkungen – wie für andere adhäsive Materialien beschrieben (Yoshiyama et al., 2002) – könnten dementsprechend zu Schwankungen innerhalb der Versuchsgruppen beigetragen haben.

Durch die Verwendung humaner Zähne konnten deren typische morphologische Eigenschaften wie mikroskopischer Aufbau und chemische Zusammensetzung direkt in die Untersuchung Eingang finden. Die für In-vitro-Studien als nachteilig angeführte Nutzung xenogener Substrate (Retief et al., 1990) entfiel somit. Die Zähne wurden zeitnah nach ihrer Extraktion von anhaftenden Geweberückständen befreit und vollständig endodontisch aufbereitet, um eine eventuell nachteilige bakterielle Besiedelung der Proben zu minimieren. Die Lagerung der Zähne und aller Proben erfolgte in 0,9 %iger isotonischer Kochsalzlösung, die als physiologisches Medium das Zahnmaterial vor adhäsiven Tests nicht beeinflusst (Haller et al., 1993a) und zur zeitlich begrenzten Lagerung geeignet ist (Jørgensen et al., 1985).

6.1.3 Probenherstellung

Das Ziel der endodontischen Aufbereitung ist es, möglichst den gesamten Wurzelkanal gleichmäßig konisch und konzentrisch zu erweitern, ohne die apikale Konstriktion zu vergrößern oder Transportationseffekte – wie Zipping, Stripping, Stufen oder Perforationen – zu verursachen (Schilder, 1974). Dabei soll nach Möglichkeit das gesamte vitale und avitale Pulpagewebe entfernt werden, genauso wie alle Mikroorganismen und potenziell pathologische Erreger, um Keimfreiheit herzustellen.

Die Aufbereitung von Wurzelkanälen kann grundsätzlich mit Handinstrumenten oder mit rotierenden Systemen erfolgen. Vorteilhaft bei Letzteren sind die flexiblen Nickel-Titan Instrumente, die in gekrümmten Kanälen die Gefahr von Kanalverlagerungen und nachfolgender Komplikationen verringern. Da in der vorliegenden Studie Zähne mit ungeraden Wurzeln aussortiert worden waren und die vorgefundenen Wurzelkanäle daher keine ausgeprägten Krümmungen aufwiesen, war dieser Punkt vernachlässigbar. Die Entscheidung, ein maschinelles System zu verwenden, beruhte vielmehr auf der Absicht, die Wurzelkanäle auf der gesamten Arbeitslänge gleichmäßig konzentrisch und mit einer konstanten Konizität aufzubereiten, damit die Push-out-Versuche möglichst nicht von Unregelmäßigkeiten entlang der Kanalwände beeinflusst wurden. Für diesen Zweck bot sich das auf Nickel-Titan basierende ProFile®-System (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) an. Seine rotierenden Instrumente besitzen eine nicht-schneidende Spitze und „radial lands“ – um das Instrument im Kanal zu positionieren – und weisen eine durchgehende Konizität von 4 % auf. Als ISO-Größe für die apikale Aufbereitung wurde eine Feile der # 40 benutzt, um die klinische Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Allerdings werden auch mit NiTi-Instrumenten nicht alle Bereiche der Wurzelkanalwände gleichmäßig und vollständig gereinigt (Peters et al., 2003; Peters, 2004). Bei der mikroskopischen Vermessung der Wurzelkanalumfänge wurden daher Proben ohne vollständig konzentrische Aufbereitung identifiziert. Da solche Abweichungen vom Ideal aber zur klinischen Realität bei der Behandlung von Patienten gehören, wurden die entsprechenden Proben trotzdem in die endgültige Auswertung einbezogen.

Während und nach der mechanischen Wurzelkanalbehandlung werden Spüllösungen eingesetzt, um angefallenen Abrieb aus den Kanälen zu entfernen und das Endodont zu desinfizieren. Die in der vorliegenden Studie verwendeten Spüllösungen sind in der zahnärztlichen Praxis verbreitet. Im Folgenden wird auf einige Aspekte speziell im Zusammenhang mit dieser Untersuchung eingegangen.

0,9 %ige **isotonische Kochsalzlösung** ist eine wässrige Lösung von Natriumchlorid. Als physiologische Lösung verändert es bei kurzfristigen Einwirkzeiten nicht die Eigenschaften der Zahnhartsubstanzen (Jørgensen et al., 1985; Haller et al., 1993a). Eine antimikrobielle Wirkung

ist nicht gegeben bzw. sie beschränkt sich auf das reine Herausspülen von Geweberesten aus den Wurzelkanälen. Isotonische Kochsalzlösung wurde in dieser Untersuchung als Lager- und Kontroll-Spülmedium eingesetzt.

Natriumhypochlorit-Lösung wird üblicherweise in Konzentrationen von 1 bis 5,5 % verwendet und besitzt sowohl gegenüber vitalem als auch avitalem Gewebe lösende Eigenschaften. Es gilt als das Mittel der Wahl zur Desinfektion von Wurzelkanälen und wird allgemein empfohlen. Jedoch zeigte sich, dass die adhäsiven Verbundkräfte nach Anwendung von Natriumhypochlorit-Lösung abnahmen. Dieser Effekt wird auf die Ausbildung einer sauerstoffreichen oberflächlichen Schicht auf der Zahnhartsubstanz zurückgeführt, in deren Folge keine vollständige Polymerisation der Adhäsive mehr gegeben ist (Schwartz, 2006; Hülsmann, 2008). Ein Ansatz der vorliegenden Studie beruhte darauf, den anhaftenden Sauerstoff durch eine abschließende Spülung mit isotonischer Kochsalzlösung zu reduzieren und so die Haftung des adhäsiven Wurzelkanal-Sealers RealSeal SE™ zu verbessern. SybronEndo, der Hersteller dieses Sealers, empfiehlt die Spülung mit Natriumhypochlorit als erstes Medium des Spülprotokolls (SybronEndo).

17 %ige **EDTA-Lösung** wird bei der Wurzelkanalaufbereitung verwendet, um die Schmierschicht zu entfernen und eventuell aufgetretene Blockaden zu lösen (Goldberg und Abramovich, 1977). Dieses Spülmedium besitzt keine ausreichenden desinfizierenden Eigenschaften (Heckendorff und Hülsmann, 2002). Man versucht vielmehr, durch Entfernung der Schmierschicht in oder unter dieser Schicht persistierende Erreger einer wirksamen Desinfektion zugänglich zu machen (Sen et al., 1995). Einer Spülung mit EDTA-Lösung werden auch Vorteile in Verbindung mit der Anwendung von Adhäsiven zugeschrieben. So soll die Entfernung der Schmierschicht eine bessere Ätzbarkeit der Zahnhartsubstanzen ermöglichen und die Penetration der Dentin-Kollagenfasern durch adhäsive Substanzen begünstigen (Marshall et al., 1997). Dieser Aspekt muss aber in Abhängigkeit vom verwendeten Adhäsiv bewertet werden. So gibt es auch Systeme, die die Schmierschicht nur modifizieren und auf diese Art den Verbund realisieren (Blunck, 2011). Ein Fehlen der Schmierschicht könnte sich dann negativ auf die Haftung auswirken. Der Hersteller von RealSeal SE™ empfiehlt den Einsatz von EDTA grundsätzlich bei allen Wurzelkanalbehandlungen zur Entfernung der Schmierschicht (SybronEndo).

Chlorhexidindigluconat-Lösung wird vor allem im Rahmen von Revisionen verwendet. So kann bei infizierten Wurzelfüllungen durch das anaerobe Milieu zum Teil ein anderes Keimspektrum nachgewiesen werden als bei initialen endodontischen Behandlungen. Eine Spülung mit CHX besitzt eine gute Wirksamkeit gegen *E. faecalis*, die bei wiederholten Wurzelkanalbehandlungen verstärkt angetroffen werden. Ein genereller und ausschließlicher

Einsatz von Chlorhexidindigluconat wird trotzdem nicht befürwortet (DGZMK und DGZ, 2006; Hülsmann, 2008). Laut dem Hersteller von RealSeal™ hat die Verwendung von CHX keinen Einfluss auf die Haftung; es wird sogar empfohlen, die Wurzelkanäle abschließend mit 2 %iger CHX-Lösung zu spülen (SybronEndo).

Abweichend vom Spülprotokoll des Herstellers wurden die aktiven Spülmedien in dieser Studie einzeln angewendet, um ihren Einfluss auf die Haftung des RealSeal™-Systems getrennt voneinander untersuchen zu können.

Nach erfolgter Desinfektion der Wurzelkanäle kamen Papierspitzen zum Einsatz, um überschüssige Spülflüssigkeit zu entfernen und die Wurzelkanäle zu trocknen. Diese Trocknungsmethode wurde mit neuen Papierspitzen so lange wiederholt, bis an der zuletzt verwendeten Papierspitze keine Restfeuchtigkeit mehr sichtbar war. Dieses Vorgehen steht zwar im Einklang mit den Herstelleranweisungen, allerdings erhöht es die Gefahr der Übertrocknung des Dentins mit anschließendem Kollabieren des oberflächlichen Kollagen-Fasergeflechts (Dal-Bianco et al., 2006). Als Folge kann sich die Hybridisierung des intertubulären Dentins verschlechtern und es kann zu geringeren Verbundhaftwerten kommen (García-Godoy et al., 2005). Berücksichtigt werden muss auch die schlechtere Zugänglichkeit zum apikalen Wurzelkanalbereich auf Grund des verringerten Kanaldurchmessers. Dieser Fakt ist zwar bei den hier verwendeten geraden Wurzeln eher zu vernachlässigen, trotzdem könnte innerhalb desselben Wurzelkanals im cervikalen Abschnitt sehr trockenes Dentin vorgelegen haben, während es weiter apikal eine gewisse Restfeuchtigkeit aufwies.

Die Füllung der Wurzelkanäle erfolgte mit Hilfe der lateralen Kondensation. Nach Beschichtung eines Mastercones mit dem jeweiligen Sealer wurde dieser erste Wurzelfüllstift unter pumpenden Bewegungen in den Kanal eingeführt und mit einem Handspreader an die Kanalwand adaptiert. Der neu entstandene Hohlraum sollte mit einem weiteren Stift, eventuell kleinerer Konizität, gefüllt werden und diese Prozedur sollte sich so lange wiederholen, bis eine dichte und randständige Wurzelfüllung erreicht war. Für die Materialkombination Guttapercha/AH Plus™ ist das beschriebene Vorgehen gut umsetzbar, weit verbreitet und gilt als Goldstandard bei der Wurzelfüllung (Ureyen Kaya et al., 2008). Eine völlig andere Beobachtung wurde beim Einsatz des Resilon™-Materials gemacht: Laut Hersteller besitzt dieser auf Polyestern basierende Werkstoff in etwa die gleichen mechanischen Eigenschaften wie Guttapercha und soll sich entsprechend ähnlich verarbeiten lassen. In der vorliegenden Studie trat jedoch bei der Wurzelfüllung die Problematik auf, dass die RealSeal™-Stifte viel zu starr waren, um lateral kondensiert zu werden. Als Konsequenz konnten die Wurzeln bei Einsatz der Materialkombination RealSeal™/RealSeal SE™ meist nur mit der Zentralstifttechnik und mit einem einzigen, mittigen Stift gefüllt werden. In diesem Fall ist

wegen der dickeren Sealer-Schicht und des niedrigeren C-Faktors mit günstigeren Bedingungen für die Polymerisation des adhäsiven Materials zu rechnen (Tay et al., 2005a).

Der dual härtende Sealer RealSeal SE™ ist laut Herstellerangaben nach einer Wartezeit von 45 Minuten oder durch Lichtapplikation nach 40 Sekunden ausgehärtet. Es wird empfohlen, die Zugänge der Wurzelkanäle mittels Lichtpolymerisation zu verschließen, um sofort einen adhäsiven und damit sowohl speichel- als auch keimdichten Verschluss zu erhalten (SybronEndo). Im apikalen und mittleren Wurzelbereich kommt es zur chemischen Härtung des Sealers, bei sehr kurzen Wurzeln kann der Einfluss einer leuchtstarken Polymerisationslampe allerdings bis in den Bereich der koronalen Wurzelscheibe reichen und dort die schnellere Lichtreaktion einleiten. Diese unterschiedlichen Polymerisationsmodi könnten zu abweichenden Haftfestigkeitswerten in Abhängigkeit vom Wurzelniveau geführt haben. So kann die schnelle Lichtreaktion starke Schrumpfkraften bei der Polymerisation hervorrufen, denen der adhäsive Verbund nur schlecht widerstehen kann. In Folge dessen kommt es zur Ablösung des Sealers von der Wurzelkanalwand (Lückenbildung) und zu lokalem Versagen der Haftung. Bei der langsameren chemischen Härtung kann das Nachfließen des niedrig-viskosen Sealers die nachteiligen Schrumpfkraften während der Polymerisation mindern und so die Haftung verbessern (Ferracane, 2005). Über die möglicherweise unterschiedlichen Härtungsmodi entsprechend den Wurzelniveaus kann in dieser Arbeit keine Auskunft gegeben werden, da in den Versuchsgruppen alle Proben unabhängig von ihrem Entnahmeniveau zusammengefasst wurden. Für den Sealer AH Plus™ gilt laut Hersteller eine Aushärtezeit von acht Stunden (Dentsply, 2008). Um beiden Wurzelfüllpasten ausreichend Gelegenheit zur vollständigen Aushärtung zu geben, wurden die gefüllten Wurzeln bis zur weiteren Verarbeitung nach sieben Tagen in isotonischer Kochsalzlösung gelagert.

In einem letzten Arbeitsschritt wurden aus den Wurzeln die Scheiben (Proben) für den Push-out-Test hergestellt. Auf den Wurzeln angezeichnete Markierungen dienten während des Schleifvorgangs als Orientierung, um möglichst $1 (\pm 0,05)$ mm dünne Proben herzustellen. Bedingt durch die manuelle Arbeitsweise kann es hier zu Schwankungen bei der Probenanfertigung gekommen sein. Eine gewisse Standardisierung aller manuellen Prozesse herrschte dahingehend, dass sie von einer Person durchgeführt wurden.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

In der vorliegenden Studie konnten Haftfestigkeitswerte für alle Kombinationen aus Wurzelfüllmaterialien und Spüllösungen ermittelt werden. Signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hatten sowohl die verwendeten Materialien als auch die genutzten Spülungen (TWO-WAY ANOVA, $p \leq 0,05$).

Beim Vergleich der beiden Wurzelfüllsysteme erzielte Guttapercha/AH Plus™ signifikant bessere Haftwerte als das Resilon™-System. Diese Beobachtung gilt für alle Versuchsgruppen, außer bei der Verwendung von isotonischer Kochsalzlösung. Aber selbst im letztgenannten Vergleich waren die Werte für das adhäsive System tendenziell schlechter als die des konventionellen Sealers (mittlere Haftfestigkeiten: 2,08 MPa gegenüber 2,58 MPa; siehe Tab. 3). Berücksichtigt werden muss an dieser Stelle, dass mit dem Kruskal-Wallis-Test und der Bonferroni-Adjustierung ein sehr konservativer Untersuchungsansatz gewählt wurde, der signifikante Unterschiede erst bei einem p-Wert von $\leq 0,0011$ anzeigt. Aus diesem Grund wurden vorhandene Unterschiede erst dann als signifikant getestet, wenn sie sehr groß waren.

In Studien, die sich mit den Haftfestigkeiten von Guttapercha/AH Plus™ und RealSeal™/RealSeal SE™ an humanem Wurzelzement befassen und dabei den Push-out-Test mit sehr dünnen Proben verwenden („thin slice push-out test“ bzw. „micro push-out test“), wird meist ein gemischtes Spülprotokoll angewendet. So wird in der Regel Natriumhypochlorit während der Aufbereitung verwendet und zum Abschluss erfolgt eine Spülung mit EDTA und/oder CHX, eventuell gefolgt von Wasser. Demzufolge existiert in der Literatur derzeit keine vergleichbare Untersuchung, die den Effekt einer einzelnen aktiven Spüllösung auf die Push-out-Haftfestigkeit der verwendeten Materialkombinationen betrachtet. (Hingewiesen wird an dieser Stelle noch einmal darauf, dass RealSeal SE™ und Epiphany SE™ verschiedene Handelsnamen des selbstätzenden Sealers Resilon™ sind und sich ansonsten nicht unterscheiden.)

Im Folgenden werden Studien vorgestellt, die die Haftfestigkeit von Guttapercha/AH Plus™ und RealSeal™/RealSeal SE™ mit Hilfe des Mikro-Ausstoßverfahrens untersuchten. Dadurch soll eine Einordnung der in der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Ergebnisse in den aktuellen Erkenntnisstand der Wissenschaft ermöglicht werden.

Haragushiku et al. untersuchten 2012 die Haftfestigkeit von Guttapercha/AH Plus™ und Resilon™/Epiphany SE™ an Wurzelzement und bei Verwendung eines zusätzlichen Adhäsivs. Zur Aufbereitung der Kontrollgruppen verwendeten sie als Spülmedien Natriumhypochlorit, EDTA und zum Abschluss destilliertes Wasser. AH Plus™ erreichte 1,24 ($\pm 0,7$) MPa, mit Resilon™ wurden 0,10 ($\pm 0,06$) MPa erzielt (Haragushiku et al., 2012). In einer Studie von

Ureyen Kaya aus dem Jahr 2008 wurde für Guttapercha/AH Plus™ eine Haftfestigkeit von $3,86 (\pm 0,64)$ MPa bestimmt und für Resilon™/Epiphany™ mit einem separaten selbstätzenden Primer ergaben sich Werte in Höhe von $1,49 (\pm 1,06)$ MPa. Zur Spülung wurden Natriumhypochlorit, EDTA und destilliertes Wasser genutzt (Ureyen Kaya et al., 2008).

Nach der Anwendung eines Spülprotokolls aus Natriumhypochlorit, EDTA und destilliertem Wasser verglichen De-Deus et al. 2009 zum einen die Haftfestigkeit von Guttapercha/AH Plus™ mit der von Resilon™ und Epiphany SE™ sowie die von Resilon™ und Epiphany™ mit separatem Primer. Die Ergebnisse wurden lediglich graphisch ausgegeben und betragen gerundet für die Gruppe mit AH Plus™ $4,75 (\pm 0,80)$ MPa, für Epiphany SE™ $2,00 (\pm 1,05)$ MPa sowie für Epiphany™ mit separatem Primer $1,95 (\pm 0,55)$ MPa. Ungor et al. verglichen die Haftfestigkeiten verschiedener Kombinationen der Wurzelfüllmaterialien Guttapercha, Resilon™, AH Plus™ und Epiphany™ mit separatem Primer. Die Proben wurden mit Natriumhypochlorit, EDTA und destilliertem Wasser vorbehandelt. Guttapercha/AH Plus™ erreichte eine Haftfestigkeit von $2,00 (\pm 0,37)$ MPa und Resilon™ mit Epiphany™ in der 2-Schritt-Variante $1,71 (\pm 0,34)$ MPa (Ungor et al., 2006).

Nagas und Kollegen studierten 2009 den Einfluss der Größe der verwendeten Wurzelfüllstifte auf die Haftfestigkeit (Nagas et al., 2009). Nach einer Spülung mit Natriumhypochlorit, EDTA und destilliertem Wasser konnten sie bei der lateralen Kondensation und Verwendung zusätzlicher Guttapercha-Stifte einen Höchstwert von $2,4 (\pm 0,6)$ MPa für AH Plus™ feststellen. In einer weiteren Studie von Nagas et al. aus dem Jahr 2011 wurde der Einfluss des Verhältnisses von Stempeldurchmesser zum Durchmesser der Wurzelkanäle auf die Ergebnisse des Push-out-Tests untersucht (Nagas et al., 2011). Nach Spülung der Wurzelkanäle lagen die höchsten Haftfestigkeiten von Guttapercha/AH Plus™ bei $1,93 (\pm 0,59)$ MPa bzw. bei $1,00 (\pm 0,26)$ MPa für Resilon™/Epiphany™ mit separatem Primer.

Sagsen et al. untersuchten 2011 die Push-out-Haftfestigkeit von Guttapercha/AH Plus™ in Abhängigkeit vom Wurzelniveau und beobachteten einen Maximalwert von $2,9 (\pm 1,1)$ MPa nach Spülung mit Natriumhypochlorit, EDTA und destilliertem Wasser (Sagsen et al., 2011). Mögliche Auswirkungen einer Revision auf die Haftfestigkeit von Resilon™/Epiphany SE™ untersuchten Shokouhinejad et al. 2010. Zur Aufbereitung der Wurzelkanäle verwendeten sie Natriumhypochlorit, gefolgt von EDTA und isotonischer Kochsalzlösung. Nach Auswertung der Versuche konnte festgestellt werden, dass sich die Werte vor der Revision mit $1,48 (\pm 0,70)$ MPa nicht signifikant ($p > 0,26$) von denen nach einer rein mechanischen Revision in Höhe von $1,16 (\pm 0,52)$ MPa unterschieden. Die unterstützende Nutzung des Lösungsmittels Chloroform während der Entfernung der ersten Wurzelfüllung führte mit $0,65 (\pm 0,36)$ MPa hingegen zu signifikant ($p < 0,02$) schlechteren Haftfestigkeiten. Die Autoren

erklärten diese Abweichung mit der Möglichkeit einer veränderten chemischen Zusammensetzung der Dentinoberfläche und einer Beeinflussung der Haftfestigkeit durch das Lösungsmittel (Shokouhinejad et al., 2010a).

In einer zweiten Studie untersuchten Shokouhinejad und Kollegen 2010 die Auswirkung eines Spülprotokolls unter Einsatz von Natriumhypochlorit, gefolgt von EDTA, auf die Haftung von Guttapercha/AH 26[®] sowie Resilon[™]/Epiphany SE[™]. Die entsprechenden Werte werden mit 3,97 (\pm 1,75) MPa für AH 26[®] bzw. 0,80 (\pm 0,62) MPa für Epiphany SE[™] angegeben (Shokouhinejad et al., 2010b). Carneiro et al. bestimmten für Guttapercha/AH Plus[™] eine Haftfestigkeit in Höhe von 2,23 (\pm 0,83) MPa und für Resilon[™]/Epiphany SE[™] 0,22 (\pm 0,10) MPa (Carneiro et al., 2012). Sie verwendeten als Spülmedien Natriumhypochlorit, EDTA und destilliertes Wasser.

Fisher et al. spülten während der Aufbereitung mit Natriumhypochlorit und vor der Wurzelfüllung einmalig mit EDTA. Das Wurzelfüllmaterial Guttapercha erreichte in Kombination mit dem Sealer AH Plus[™] eine Haftfestigkeit von 2,00 (\pm 0,65) MPa (Fisher et al., 2007). Die Haftfestigkeit von Guttapercha/AH Plus[™] im Vergleich zu MTA-Zementen wurde von Assmann et al. (2012) untersucht. Sie spülten alle Wurzelkanäle mit Natriumhypochlorit, EDTA und zum Abschluss mit isotonischer Kochsalzlösung. Bei den rund 0,68 mm dünnen horizontalen Wurzelscheiben stellten sie mittlere Push-out-Werte in Höhe von ca. 3,034 MPa fest. Babb und Kollegen zersägten extrahierte Zähne in 0,90 mm dünne Scheiben entsprechend der Zahnlängsachse und brachten an mehreren Stellen artifizielle Bohrungen im Sinne einer Aufbereitung an, die nur mit Wurzelkanal-Sealer gefüllt wurden (Babb et al., 2009). Zuvor hatten sie die Proben mit Natriumhypochlorit, EDTA und destilliertem Wasser behandelt. Die Haftfestigkeiten für RealSeal SE[™] lagen je nach Wurzelniveau zwischen 12,6 (\pm 4,3) MPa und 14,4 (\pm 8,1) MPa. Die in der letztgenannten Studie erzielten sehr hohen Werte im Vergleich zu den anderen vorgestellten Veröffentlichungen können nur eingeschränkt vergleichend herangezogen werden, da mit dem Verzicht auf Wurzelfüllstifte und der Präparation artifizieller Kavitäten ein anderes Studiendesign vorliegt. Untersuchungen, die sich bezüglich Versuchsaufbau und Durchführung unterscheiden, müssen kritisch betrachtet werden (Fowler et al., 1992).

Sofern in den vorgenannten Studien ein direkter Vergleich der Haftfestigkeitswerte von Guttapercha/AH Plus[™] gegenüber Resilon[™] in Kombination mit einem selbstätzenden Einzschritt-Sealer möglich war, erreichte die Materialkombination mit dem auf Epoxidharz basierenden Sealer AH Plus[™] grundsätzlich signifikant höhere Werte. Bei einer Mittelung der in der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Haftfestigkeitswerte über alle Spüllösungen hinweg ergibt sich das gleiche Bild. So erreichten die Versuchsgruppen mit AH Plus[™] eine

mittlere Haftfestigkeit von $2,53 (\pm 0,96)$ MPa, mit RealSeal SE™ wurden Werte von $1,53 (\pm 0,93)$ MPa erzielt (Tab. 7). Diese Unterschiede sind entsprechend der durchgeführten zweifaktoriellen ANOVA signifikant ($p < 0,001$; siehe Tab. 4). In Anbetracht der zahlreichen oben genannten Studien kann resümiert werden, dass sich die vorliegenden Ergebnisse in der Größenordnung der in anderen Laboratorien gesammelten Erkenntnisse bewegen. Somit erscheint die Durchführung des Mikro-Ausstoßversuchs in dieser Untersuchung als suffizient.

Gründe, die in der Literatur für die hohen Werte von AH Plus™ angeführt werden, sind die Bildung starker kovalenter Bindungen zu den Aminogruppen des Dentinkollagens (Fisher et al., 2007; De-Deus et al., 2009) und eine ausgeprägte Kohäsion innerhalb des Sealers (Carneiro et al., 2012; Haragushiku et al., 2012). Außerdem werden AH Plus™ ein besseres Fließverhalten und eine längere Abbindezeit zugeschrieben, wodurch dieser Sealer besser in kleinste Unregelmäßigkeiten der Wurzelkanalwand eindringen kann und sich ein stärkerer mechanischer Verbund bildet (Carneiro et al., 2012).

Allgemeiner Konsens besteht über den ungünstigen C-Faktor („configuration factor“) innerhalb von Wurzelkanälen als Hauptursache der schlechten Haftwerte von Kompositen in der Endodontie (De-Deus et al., 2009). Dieser Faktor gibt das Verhältnis von gebundenen zu freien Komposit-Oberflächen an, wobei ein hoher C-Faktor als nachteilig angesehen wird, da weniger freie Fläche zur Verfügung steht, um die Kräfte während der Polymerisationsschrumpfung zu kompensieren. Dieser Effekt kann sich sowohl in horizontaler Richtung als auch in Wurzellängsachse manifestieren und wird mit dem Einsatz von Wurzelfüllstiften und somit geringerem Sealer-Volumen noch verstärkt (Tay et al., 2005a). In Folge dessen ist eine Ablösung des von der Volumenschrumpfung besonders betroffenen Komposits von der Wurzelkanalwand möglich, woraus geringere Haftfestigkeitswerte und Undichtigkeiten resultieren (Carvalho et al., 1996; Ferracane, 2005). Als weitere mögliche Ursache für die schlechten Haftwerte von Epiphany SE™ sahen Haragushiku et al. (2012) die Verwendung des sehr hydrophilen Monomers HEMA an (van Landuyt et al., 2008), wobei auch das saure Monomer 4-META hydrophile Eigenschaften besitzt (Kim et al., 2010). Durch den gründlichen Einsatz von Papierspitzen direkt vor der Wurzelfüllung kann es zur Übertrocknung der Kanäle und damit zu schlechteren Haftungsbedingungen für den selbstätzenden Sealer gekommen sein (García-Godoy et al., 2005; Nagas et al., 2012). Des Weiteren hat es den Anschein, dass in den Resilon™-Stiften der Anteil an Dimethacrylaten zu gering ist bzw. dass die Abwesenheit von freien Radikalen auf der Stiftoberfläche einem festen Verbund mit auf Methacrylat basierenden Sealern entgegensteht. Demnach kann es während der Polymerisationsschrumpfung zum Lösen der beiden Materialien voneinander kommen (Gesi et al., 2005; Ureyen Kaya et al., 2008). Nunes et al. hielten es in ihrer 2008 veröffentlichten Studie für möglich, dass in Folge der Unzugänglichkeit der apikalen Wurzelkanalbereiche für die Lichtpolymerisation keine

vollständige Polymerisation von Komposit-Materialien erreicht wird (Nunes et al., 2008). In diesem Fall ist mit einem höheren Restanteil von freien Monomeren zu rechnen. Andererseits kann der Einsatz der Lichtpolymerisation ein mögliches Nachfließen des Sealers/Komposits verringern und so einen Ausgleich der Polymerisationsschrumpfung vor allem bei sehr kurzen Wurzeln im cervikalen Kanalbereich behindern (Carvalho et al., 1996; Ferracane, 2005; Kim et al., 2010). Durch das Vorhandensein von Sauerstoff auf der Dentinoberfläche und in den -tubuli kann es zu einer verringerten Zahl an kovalenten Bindungen und unvollständiger Polymerisation an der Grenzschicht zwischen adhäsivem Sealer und Dentin kommen, mit daraus resultierender verringerter Haftung des Kompositmaterials (Rueggeberg und Margeson, 1990; Nunes et al., 2008). So wiesen Torneck et al. (1990) eine Verringerung der Scherhaftfestigkeit von Adhäsiven am Zahnhartgewebe im Zusammenhang mit Wasserstoffperoxid nach. Nielsen et al. stellten 2006 fest, dass der ursprüngliche Resilon™-Sealer (RealSeal™, Sybron Endo, CA, USA; Mehrschritt-Technik) bei rein chemischer Härtung und unter Luftabschluss innerhalb von ca. 30 Minuten vollständig ausgehärtet war. Unter aeroben Bedingungen wurde der gleiche Polymerisationsgrad hingegen erst nach einer Woche oder mehr erreicht. Erklärt wurden diese Unterschiede durch die Inhibition der Polymerisation durch den (Luft-) Sauerstoff. Natriumhypochlorit zerfällt in Natriumchlorid und Sauerstoff und führt zu einer Anreicherung von Sauerstoff an der Dentinwand, wodurch wiederum die Inhibition der Polymerisationsreaktion verstärkt wird (Schwartz, 2006). Der beobachtete Anstieg der Haftfestigkeit von RealSeal SE™ bei Anwendung von isotonischer Kochsalzlösung nach Natriumhypochlorit-Spülung kann hingegen die Verringerung des angereicherten freien Sauerstoffs an der Dentinwand durch dessen Bindung in Wasser bis zur Löslichkeitsgrenze zurückgeführt werden. Die Kochsalzlösung übernimmt in diesem Zusammenhang die Funktion einer (Sauerstoff-) reduzierenden Spülung, vergleichbar mit der für Natriumascorbat und Ascorbinsäure (Vitamin C) nachgewiesenen Wirkung (Morris et al., 2001; Yiu et al., 2002; Nassar et al., 2011). Zusätzlich kann Natriumhypochlorit die Oxidation einiger Dentinkollagen-Bestandteile bewirken. So hielten es 2011 Farina et al. für möglich, dass die aus den Kollagenproteinen freigesetzten Radikale mit den freien Radikalen des Polymerisationsprozesses konkurrieren und es in Folge dessen zu vorzeitigem Kettenabbruch und unvollständiger Polymerisation kommt (Farina et al., 2011).

Außerdem können Reste der Natriumhypochlorit-Spülung, die über einen pH-Wert > 11 verfügt (Guida, 2006), eine Neutralisierung der sauren Monomere des adhäsiven Sealers herbeiführen. Auf diesem Weg sind die demineralisierenden Eigenschaften des „Self-etch“-Systems gehemmt. Eine Neutralisierung basischer NaOCl-Rückstände an der Kanalwand hingegen kann mit einer Spülung durch Kochsalzlösung erreicht werden. In diesem Fall ist wiederum mit steigenden Push-out-Haftfestigkeiten zu rechnen. Alle genannten Interferenzen zwischen

RealSeal SE™ und Natriumhypochlorit können sich in geringeren Push-out-Haftfestigkeitswerten bei alleiniger Spülung mit NaOCl widerspiegeln, wie in der Versuchsgruppe (VII) RS mit NaOCl ohne H₂O sichtbar wurde. Für die aufhebenden Eigenschaften der Kochsalzlösung können die hohen Haftfestigkeitswerte der Gruppe (VIII) RS mit NaOCl und H₂O angeführt werden. 0,9 %ige isotonische Kochsalzlösung ist eine wässrige Lösung des Salzes Natriumchlorid und besteht aus den Anteilen Wasser und dem genannten Salz. Die aufgeführten chemischen Prozesse – Sauerstoffreduktion und pH-Wert-Neutralisation – laufen im Wesentlichen auch bei alleiniger Anwesenheit von Wasser ab. Welcher Anteil der Wirkung von isotonischer Kochsalzlösung auf den Bestandteil Natriumchlorid zurückgeführt werden kann, ist zwar im Rahmen der vorliegenden Studie nicht eindeutig verifizierbar, er wird aber als gering eingeschätzt. Unter dieser Voraussetzung würde eine abschließende Spülung mit destilliertem Wasser nach Natriumhypochlorit-Verwendung die gleiche Wirkung entfalten wie isotonische Kochsalzlösung.

Ein guter Verbund kann dann entstehen, wenn Sealer und Wurzelkanalwand in engen Kontakt treten, woraufhin sich chemische Bindungen und mikromechanische Verankerungen ausbilden können. Buzoglu und Kollegen zeigten in ihrer Studie jedoch, dass eine Spülung mit EDTA die Benetzbarkeit des Dentins herabsetzen kann (Dogan Buzoglu et al., 2007). In Folge ist eine verringerte Adhäsion des Sealers möglich. In der hier vorliegenden Untersuchung hatte die Anwendung von EDTA im Zusammenhang mit dem eher hydrophoben Sealer AH Plus™ auf trockenem Dentin keine signifikant schlechteren Haftfestigkeitswerte zur Folge (Kruskal-Wallis-Test, Vergleich Gruppe (I) mit (IV), $p > 0,05$). Bei der Verwendung von RealSeal SE™ hingegen sank die Belastbarkeit deutlich (Kruskal-Wallis-Test, Vergleich Gruppe (VI) mit (IX), $p < 0,001$). Diese Ergebnisse können mit einer durch EDTA ausgelösten schlechteren Benetzbarkeit des getrockneten Dentins durch den eher hydrophilen Sealer AH Plus™ zusammenhängen. Als eine weitere mögliche Ursache für die unterlegenen Werte des Resilon™-Systems muss die Entfernung der Schmierschicht durch EDTA betrachtet werden. Die aus Gewebetrümmern und Schleifstaub bestehende Schicht haftet mit ungefähr 5 MPa an der Dentinwand (Pashley, 1992) und ist ein wesentliches Bindungssubstrat der selbstätzenden und selbstprimenden Adhäsive (Blunck, 2011), zu denen auch RealSeal SE™ mit einem pH-Wert von ca. 3,9 gehört (Kim et al., 2009). Neben der Entfernung der Schmierschicht bewirkt EDTA eine Demineralisation der Dentinoberfläche in Höhe von 2 bis 4 µm (García-Godoy et al., 2005) und hinterlässt eine glatte Wurzelkanalwand mit einer dünnen Schicht von freigelegtem Kollagennetzwerk. Von der Fehr fand 1963 beim Einsatz von 15 %iger EDTA-Lösung mit einem Detergenz sogar eine Demineralisationstiefe von 20 bis 30 µm am Dentin. Diese Demineralisation war allerdings auf eine Tiefe von maximal 50 µm begrenzt, auch wenn EDTA länger angewendet wurde (Fehr und Nygaard Östby, 1963). Die demineralisierende

Wirkung entsteht, weil EDTA die in Lösung gegangenen Calcium-Ionen bindet, während der Lösungsdruck von Seiten des Dentin-Calciums der Wurzelkanalwand bestehen bleibt. Sie endet, wenn alle EDTA-Bindungsstellen besetzt sind und sich ein Gleichgewicht ausbildet (Nygaard Östby, 1957; Goldberg und Abramovich, 1977). Mit Verlust der Hydroxylapatit-Kristalle im freigelegten Kollagengeflecht fehlt dem milden, selbstätzenden Präparat ein wesentlicher Bindungspartner. Zusätzlich kann das freigelegte Dentinkollagen eventuell nicht vollständig von RealSeal SE™ penetriert werden und der Haftverbund kann sich nicht regelrecht ausbilden (Blunck, 2011). Darüber hinaus öffnet EDTA die Eingänge der Dentintubuli durch Demineralisation des intratubulären Dentins (García-Godoy et al., 2005). Dieser letzte Aspekt hat zur Konsequenz, dass der Sealer besser in die Tubuli penetrieren kann und dort sogenannte Tags ausbildet (Eldeniz et al., 2005). Allerdings entfällt nach einer Studie von Gwinett (1993) nur ein Anteil von rund 15 % der gesamten Haftung auf die Komposit-Zapfen innerhalb der Tubuli. Durch die Erweiterung der Öffnungen der Dentintubuli sinkt im Gegenteil sogar der Anteil der festen intertubulären Dentinfläche und steht damit nicht mehr zur mikromechanischen Verankerung zur Verfügung, die im Gegensatz zur Tag-Bildung für den Hauptanteil der Haftung bei selbstätzenden Adhäsiven verantwortlich ist (De-Deus et al., 2008).

Die zur Haftfestigkeit von Kompositen an Dentin nach Einsatz von CHX veröffentlichten Daten sind eher spärlich, vor allem im Vergleich zur Vielzahl an Studien über die Auswirkungen von Natriumhypochlorit und EDTA. Zusätzlich zeigen sich bei Sichtung der verfügbaren Literatur widersprüchliche Ergebnisse: So konnten nach dem Einsatz von CHX entweder eine Verbesserung der Haftung (Erdemir et al., 2004), keine Veränderung (Munck et al., 2010; Mobarak, 2011; Stanislawczuk et al., 2011) oder gar schlechtere Haftwerte am Dentin festgestellt werden (Roberts et al., 2000; Hiraishi et al., 2009; Farina et al., 2011). Ein allgemeiner Konsens zur Wirkung von CHX auf Komposit-Haftungen ist nicht erkennbar. Mögliche Erklärungen für den negativen Einfluss von CHX sind die – zumindest teilweise – Entfernung der Schmierschicht durch den leicht sauren pH-Wert von 5,5 bis 7 (Castro et al., 2003) sowie die Erosion des intertubulären Dentins (Vilanova et al., 2012). Eine direkte Wechselwirkung zwischen dem adhäsiven Material und CHX hielten Hiraishi et al. (2009) für denkbar. Dieser letztgenannte Ansatz muss im Zusammenhang mit der hohen Substantivität von CHX an Dentin auf Grund der elektrostatischen Haftung betrachtet werden (Carrilho et al., 2010). Demnach kann man von einem hohen CHX-Restanteil an der Dentinwand ausgehen, selbst wenn die Proben – wie hier geschehen – gründlich mit Kochsalzlösung abgespült wurden.

Der von Teixeira et al. (2004a) mit Hilfe des Resilon™-Systems als erreichbar eingeschätzte „Monoblock“ erscheint nach Einbeziehung der gewonnenen Ergebnisse und der Literatur nicht realisierbar. So nannten Tay und Pashley (2007) den festen Verbund aller beteiligten Materialien untereinander und zum Zahnhartgewebe sowie ein Dentin-ähnliches E-Modul der

Obturationsmaterialien als Voraussetzungen für einen funktionierenden Monoblock. Wie bereits ausführlich diskutiert, ist die Haftung des RealSeal™-Sealers zum Dentin und zu den Wurzelfüllstiften als schwach einzuschätzen. Außerdem liegt das E-Modul der Resilon™-Stifte mit 87 MPa zwar über dem von Guttapercha mit 79 MPa (Williams et al., 2006) – der Grund für die problematische laterale Kondensation – aber deutlich unter dem des Dentins (ca. 16.000 MPa; Dietschi et al., 2007). Demnach ist auch die zweite Voraussetzung für einen Monoblock nach Tay und Pashley (2007) nicht erfüllt.

7 Zusammenfassung

In der hier vorliegenden In-vitro-Studie wurde die Haftfestigkeit von AH Plus™ und des adhäsiven Wurzelfüllmaterials RealSeal SE™ an den Wurzelkanalwänden extrahierter Zähne unter Verwendung verschiedener Spüllösungen (0,9 %ige isotonische Kochsalz-, 3 %ige Natriumhypochlorit-, 17 %ige EDTA- und 2 %ige CHX-Lösung) bestimmt. Ziel der Untersuchung war es, den Einfluss der Spülungen auf die Haftung der beiden Wurzelfüll-Sealer unter Einsatz des Mikro-Ausstoßverfahrens („thin-slice push-out test“) zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurden 200 Wurzeln extrahierter menschlicher Zähne standardisiert aufbereitet und gleichmäßig auf zehn Versuchsgruppen verteilt. Anschließend erfolgte die Vorbehandlung von jeweils zwei der Gruppen mit dem gleichen Spülprotokoll und daraufhin die Wurzelfüllung je einer der beiden Gruppen mit Guttapercha/AH Plus™ sowie RealSeal™/RealSeal SE™ mit Hilfe der lateralen Kondensation. Nach einer Lagerungszeit von sieben Tagen in isotonischer Kochsalzlösung wurden aus allen Wurzeln je drei horizontale Scheiben mit einer Dicke von 1 mm gewonnen. Durch den Einsatz einer Universalprüfmaschine konnte die maximal notwendige Kraft ermittelt werden, um die Wurzelfüllungen mit Stempeln aus den Kanälen herauszudrücken. Die Größe der mit der Wurzelkanalfüllung in Kontakt stehenden Dentinwand wurde für jede der 600 Proben aus den individuell gemessenen Scheibendicken und den mikroskopisch ermittelten Wurzelkanalumfängen bestimmt. Abschließend erfolgten die Berechnung eines Haftfestigkeitswerts [MPa] für jede Probe und die statistische Auswertung.

Die zweifaktorielle ANOVA zeigte signifikante Einflüsse, sowohl für die Wahl des Wurzelfüllmaterials ($p < 0,001$) als auch die verwendete Spülung ($p < 0,001$), sowie eine Interaktion zwischen den Faktoren Wurzelfüllmaterial und Spülung ($p < 0,001$). Der konventionelle Sealer AH Plus™ erreichte – gemittelt über alle Versuchsgruppen – mit $2,53 (\pm 0,96)$ MPa eine höhere durchschnittliche Haftfestigkeit als die Versuchsgruppen mit RealSeal SE™ ($1,53 \pm 0,93$ MPa). Beim paarweisen Vergleich aller Gruppen durch einen Kruskal-Wallis-Test zeigte sich, dass bei Verwendung von AH Plus™ trotz verschiedener Spülungen keine signifikanten Unterschiede in der Haftung auftraten ($p > 0,0011$). Wurde die gleiche Spülung verwendet, lagen die Haftfestigkeitswerte von AH Plus™ immer signifikant höher als beim Einsatz von RealSeal SE™ ($p < 0,001$). Als einzige Ausnahme erwies sich die alleinige Verwendung von isotonischer Kochsalzlösung. In diesem Fall waren die Haftwerte von AH Plus™ tendenziell höher, die Unterschiede zwischen den Wurzelfüllmaterialien aber nicht signifikant ($p > 0,0011$). Die Haftfestigkeiten der Gruppen mit RealSeal SE™ erwiesen sich als recht heterogen. So lagen die Werte im Fall einer Spülung mit Natriumhypochlorit (ohne Abschluss-Spülung; $1,28 \pm 0,60$ MPa), EDTA ($0,91 \pm 0,64$ MPa) und CHX

($1,05 \pm 0,65$ MPa) ungefähr um die Hälfte und damit signifikant niedriger als die der Kontrollgruppe mit isotonischer Kochsalzlösung ($2,08 \pm 0,79$ MPa; $p < 0,001$). Wurden die Wurzeln mit Natriumhypochlorit und abschließend mit Kochsalzlösung gespült, erreichte RealSeal SE™ mit $2,35 (\pm 0,94)$ MPa vergleichbare Werte wie die Kontrollgruppen für beide Wurzelfüllmaterialien ($p > 0,0011$).

Bei der Betrachtung der Versuchsgruppen mit Guttapercha und AH Plus™ erwies sich diese seit vielen Jahren bewährte Materialkombination als unbeeinflusst von den eingesetzten Spülungen. Bei Verwendung von RealSeal™/RealSeal SE™ wurden dagegen zum Teil gravierend schlechtere Ergebnisse vorgefunden. Dies legt den Schluss nahe, dass die Haftfestigkeit des adhäsiven Systems hochgradig vom Spülprotokoll abhängig ist und weder Natriumhypochlorit, noch EDTA oder CHX zu einer Verbesserung über das Niveau der Kontrolle mit Kochsalzlösung führen. Vielmehr zeigte sich, dass Natriumhypochlorit – wie bei anderen Kompositen auch – die Haftung signifikant verringerte, auch wenn sie sich durch eine abschließende Spülung mit isotonischer Kochsalzlösung wieder auf das Ausgangsniveau anheben ließ. Natriumhypochlorit erscheint also nicht als günstige Abschluss-Spülung für das RealSeal SE™-System.

Auf der anderen Seite kann isotonische Kochsalzlösung bewusst als abschließende Spülung eingesetzt werden, um die durch Natriumhypochlorit bedingten negativen Haftfestigkeiten zu korrigieren. Kochsalzlösung ist demnach als praktikable und preisgünstige Alternative für die reduzierenden Spülungen Natriumascorbat und Ascorbinsäure anzusehen. Sie wirkt zusätzlich neutralisierend auf den basischen pH-Zustand der Wurzelkanalwand. Der Einsatz von EDTA oder CHX sollte in Kombination mit RealSeal SE™ grundsätzlich vermieden werden, auch eine abschließende Spülung mit diesen Lösungen erscheint entgegen den Herstellerangaben als sehr nachteilig. Im Angesicht aller für das RealSeal™-System gewonnenen Ergebnisse benötigt dessen selbstätzender Sealer RealSeal SE™ eine sauerstoffarme Substratoberfläche (anaerobes Milieu), deren pH-Wert nach Möglichkeit nicht im basischen Bereich liegen sollte. Außerdem muss eine präparationsbedingte Schmierschicht vorhanden sein und eine vorausgegangene Demineralisation bzw. Freilegung von Dentinkollagen ist zu vermeiden. Als Spülung der Wahl sollte Natriumhypochlorit und im Anschluss reichlich Kochsalzlösung verwendet werden.

Anhand der Ergebnisse dieser Studie kann geschlussfolgert werden, dass mit RealSeal SE™ keine höheren Haftfestigkeitswerte an der Wurzelkanalwand erreicht werden können als mit AH Plus™. Vielmehr ist mit schlechteren Werten beim Einsatz des adhäsiven Wurzelfüllmaterials in Kombination mit den am häufigsten verwendeten endodontischen Spüllösungen – Natriumhypochlorit, EDTA sowie CHX – zu rechnen. Ein zusätzlicher Nutzen im Rahmen der klinischen Anwendung erscheint somit unwahrscheinlich und sollte vermieden

werden. Trotz allem könnten in weiteren Studien die Frakturanfälligkeit unter physiologischer Belastung und die Dichtigkeit dieses neuartigen Materials in Abhängigkeit vom verwendeten Spülprotokoll untersucht werden.

Teixeira et al. vertraten 2004 die Meinung, mit einem adhäsiven Wurzelkanal-Sealer wäre es möglich, einen festen und damit bakteriendichten Verbund zwischen der Wurzelkanalwand und den Resilon™-Wurzelfüllstiften herzustellen. Auf Grundlage dieser Überlegungen – und ersten positiven Studienergebnissen – sollten wurzelkanalbehandelte Zähne ihre Frakturfestigkeit zurückerlangen und die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllungen deutlich verbessert werden können (Teixeira et al., 2004a). Diese als „Monoblock-These“ in der Literatur bekannt gewordenen und kontrovers diskutierten Einschätzungen erscheinen auf Grundlage der in dieser Studie gewonnenen Ergebnisse nicht belegbar.

Mikro-Ausstoßversuche ermöglichen eine erste präklinische Beurteilung von Wurzelfüllmaterialien. In Verbindung mit der artifiziellen Alterung und/oder simulierten Kaubelastungen ist eine Vielzahl von weiteren Untersuchungsmöglichkeiten gegeben. Trotz allem erscheint eine weitere Standardisierung dieser Versuchsmethode sinnvoll. Dabei sollte insbesondere die Herstellung der transversalen Sägeschnitte berücksichtigt werden.

8 Literaturverzeichnis

- Akkayan B, Gülmez T (2002): Resistance to fracture of endodontically treated teeth restored with different post systems. *J Prosthet Dent* 87, S. 431–437.
- Alster D, Feilzer AJ, Gee AJ de, Mol A, Davidson CL (1992): The dependence of shrinkage stress reduction on porosity concentration in thin resin layers. *J. Dent. Res.* 71, S. 1619–1622.
- Andersen M, Lund A, Andreasen JO, Andreasen FM (1992): In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochlorite. *Endod Dent Traumatol* 8, S. 104–108.
- Asmussen E, Peutzfeldt A, Heitmann T (1999): Stiffness, elastic limit, and strength of newer types of endodontic posts. *J Dent* 27, S. 275–278.
- Assmann E, Scarparo RK, Böttcher DE, Grecca FS (2012): Dentin bond strength of two mineral trioxide aggregate-based and one epoxy resin-based sealers. *J Endod* 38, S. 219–221.
- Babb BR, Loushine RJ, Bryan TE, Ames JM, Causey MS, Kim J, Kim YK, Weller RN, Pashley DH, Tay FR (2009): Bonding of self-adhesive (self-etching) root canal sealers to radicular dentin. *J Endod* 35, S. 578–582.
- Bahrami G, Vaeth M, Kirkevang L, Wenzel A, Isidor F (2008): Risk factors for tooth loss in an adult population: a radiographic study. *J. Clin. Periodontol.* 35, S. 1059–1065.
- Beer R, Baumann MA, Kielbassa AM: Taschenatlas der Endodontie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2004.
- Belli S, Eraslan O, Eskitascioglu G, Karbhari V (2011): Monoblocks in root canals: a finite elemental stress analysis study. *International Endodontic Journal* 44, S. 817–826.
- Bergenholtz G (1990): Biologische Grundlagen der Endodontie. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, S. 187,191.
- Blunck U (2011): Selbststützende Adhäsivsysteme. *Wissen Kompakt* 5, S. 11–19.
- Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH (2003): Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin. *Dent Mater* 19, S. 199–205.
- Bowen RL (1965): Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues. II. Bonding to dentin promoted by a surface-active comonomer. *J. Dent. Res.* 44, S. 895–902.
- Braga RR, Meira JBC, Boaro LCC, Xavier TA (2010): Adhesion to tooth structure: a critical review of "macro" test methods. *Dent Mater* 26, S. e38-49.
- Buonocore MG (1955): A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J. Dent. Res* 34, S. 849–853.
- Camps JJ, Pertot WJ (1994): Relationship between file size and stiffness of stainless steel instruments. *Endod Dent Traumatol* 10, S. 260–263.
- Carneiro SMBS, Sousa-Neto MD, Rached-Júnior FA, Miranda CES, Silva SRC, Silva-Sousa YTC (2012): Push-out strength of root fillings with or without thermomechanical compaction. *International Endodontic Journal*, doi:10.1111/j.1365-2591.2012.02039.x.
- Carrilho MR, Carvalho RM, Sousa EN, Nicolau J, Breschi L, Mazzoni A, Tjäderhane L, Tay FR, Agee K, Pashley DH (2010): Substantivity of chlorhexidine to human dentin. *Dent Mater* 26, S. 779–785.

- Carvalho RM, Pereira JC, Yoshiyama M, Pashley DH (1996): A review of polymerization contraction: the influence of stress development versus stress relief. *Oper Dent* 21, S. 17–24.
- Castro FLA de, Andrade MF de, Duarte Júnior SLL, Vaz LG, Ahid FJM (2003): Effect of 2% chlorhexidine on microtensile bond strength of composite to dentin. *J Adhes Dent* 5, S. 129–138.
- Clark-Holke D, Drake D, Walton R, Rivera E, Guthmiller JM (2003): Bacterial penetration through canals of endodontically treated teeth in the presence or absence of the smear layer. *J Dent* 31, S. 275–281.
- Cobankara FK, Adanir N, Belli S, Pashley DH (2002): A quantitative evaluation of apical leakage of four root-canal sealers. *Int Endod J* 35, S. 979–984.
- Cujé J, Hülsmann M (2011): Endodontal-parodontale Läsionen. *DFZ (Der Freie Zahnarzt - Zeitschrift des Freien Verbandes Deutscher Zahnärzte)*, S. 74–83.
- Dal-Bianco K, Pellizzaro A, Patzlaft R, Oliveira Bauer JR de, Loguercio AD, Reis A (2006): Effects of moisture degree and rubbing action on the immediate resin-dentin bond strength. *Dent Mater* 22, S. 1150–1156.
- Davidson CL, Gee AJ de, Feilzer A (1984): The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. *J. Dent. Res.* 63, S. 1396–1399.
- De-Deus G, Di Giorgi K, Fidel S, Fidel RAS, Paciornik S (2009): Push-out bond strength of Resilon/Epiphany and Resilon/Epiphany self-etch to root dentin. *J Endod* 35, S. 1048–1050.
- De-Deus G, Namen F, Galan J, Zehnder M (2008): Soft chelating irrigation protocol optimizes bonding quality of Resilon/Epiphany root fillings. *J Endod* 34, S. 703–705.
- DeHoff PH, Anusavice KJ, Wang Z (1995): Three-dimensional finite element analysis of the shear bond test. *Dent Mater* 11, S. 126–131.
- Dentsply: Gebrauchsanweisung AH Plus®, 2008.
- DGZMK: Wissenschaftliche Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK). Wurzelkanalfüllpasten und -füllstifte, 1999.
- DGZMK, DGZ: Gemeinsame Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) und der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen, 2001.
- DGZMK, DGZ: Gemeinsame Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) und der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). Die Wurzelkanalspülung, 2006.
- Dietschi D, Duc O, Krejci I, Sadan A (2007): Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: a systematic review of the literature--Part 1. Composition and micro- and macrostructure alterations. *Quintessence Int* 38, S. 733–743.
- Dietschi D, Duc O, Krejci I, Sadan A (2008): Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: a systematic review of the literature, Part II (Evaluation of fatigue behavior, interfaces, and in vivo studies). *Quintessence Int* 39, S. 117–129.
- Dogan Buzoglu H, Calt S, Gümüsderelioglu M (2007): Evaluation of the surface free energy on root canal dentine walls treated with chelating agents and NaOCl. *Int Endod J* 40, S. 18–24.

- Drummond JL, Sakaguchi RL, Raccan DC, Wozny J, Steinberg AD (1996): Testing mode and surface treatment effects on dentin bonding. *J. Biomed. Mater. Res.* 32, S. 533–541.
- Economides N, Kokorikos I, Kolokouris I, Panagiotis B, Gogos C (2004): Comparative study of apical sealing ability of a new resin-based root canal sealer. *J Endod* 30, S. 403–405.
- 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, S. Suppl:1359-68.
- Eldeniz AU, Erdemir A, Belli S (2005): Shear bond strength of three resin based sealers to dentin with and without the smear layer. *J Endod* 31, S. 293–296.
- Erdemir A, Ari H, Güngüneş H, Belli S (2004): Effect of medications for root canal treatment on bonding to root canal dentin. *J Endod* 30, S. 113–116.
- Estrela C, Estrela CRA, Barbin EL, Spanó JCE, Marchesan MA, Pécora JD (2002): Mechanism of action of sodium hypochlorite. *Braz Dent J* 13, S. 113–117.
- European Society of Endodontology (2006): Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 39, S. 921–930.
- Farina AP, Cecchin D, Barbizam JVB, Carlini-Júnior B (2011): Influence of endodontic irrigants on bond strength of a self-etching adhesive. *Aust Endod J* 37, S. 26–30.
- Fédération Dentaire Internationale (1990): Dentine bonding. Fédération Dentaire Internationale Technical Report No. 35. *Int Dent J* 40, S. 127–128.
- Fehr FR von der, Nygaard Östby B (1963): Effect of EDTAC and sulfuric acid on root canal dentine. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol* 16, S. 199–205.
- Ferracane JL (2005): Developing a more complete understanding of stresses produced in dental composites during polymerization. *Dent Mater* 21, S. 36–42.
- Ferrari M, Mannocci F, Vichi A, Cagidiaco MC, Mjör IA (2000): Bonding to root canal: structural characteristics of the substrate. *Am J Dent* 13, S. 255–260.
- Fisher MA, Berzins DW, Bahcall JK (2007): An in vitro comparison of bond strength of various obturation materials to root canal dentin using a push-out test design. *J Endod* 33, S. 856–858.
- Fowler CS, Swartz ML, Moore BK, Rhodes BF (1992): Influence of selected variables on adhesion testing. *Dent Mater* 8, S. 265–269.
- Frankenberger R, Sindel J, Krämer N, Petschelt A (1999): Dentin bond strength and marginal adaptation: direct composite resins vs ceramic inlays. *Oper Dent* 24, S. 147–155.
- Fredriksson M, Astbäck J, Pamenius M, Arvidson K (1998): A retrospective study of 236 patients with teeth restored by carbon fiber-reinforced epoxy resin posts. *J Prosthet Dent* 80, S. 151–157.
- Gängler P, Hoffmann T, Willershausen B: *Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde. Lehrbuchreihe zur Aus- und Weiterbildung.* Thieme, 2010.
- García-Godoy F, Loushine RJ, Itthagarun A, Weller RN, Murray PE, Feilzer AJ, Pashley DH, Tay FR (2005): Application of biologically-oriented dentin bonding principles to the use of endodontic irrigants. *Am J Dent* 18, S. 281–290.
- Gee AF de, Feilzer AJ, Davidson CL (1993): True linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dent Mater* 9, S. 11–14.

- Gesi A, Raffaelli O, Goracci C, Pashley DH, Tay FR, Ferrari M (2005): Interfacial strength of Resilon and gutta-percha to intraradicular dentin. *J Endod* 31, S. 809–813.
- Goldberg F, Abramovich A (1977): Analysis of the effect of EDTAC on the dentinal walls of the root canal. *J Endod* 3, S. 101–105.
- Goracci C, Grandini S, Bossu M, Bertelli E, Ferrari M (2007): Laboratory assessment of the retentive potential of adhesive posts: a review. *Journal of dentistry* 35, S. 827–835.
- Goracci C, Sadek FT, Fabianelli A, Tay FR, Ferrari M (2005): Evaluation of the adhesion of fiber posts to intraradicular dentin. *Oper Dent* 30, S. 627–635.
- 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, S. 353–361.
- Grande NM, Plotino G, Lavorgna L, Ioppolo P, Bedini R, Pameijer CH, Somma F (2007): Influence of different root canal-filling materials on the mechanical properties of root canal dentin. *J Endod* 33, S. 859–863.
- Grossman LI: *Endodontic Practice*. Lippincott Williams and Wilkins, 1988.
- Guertsen W, Heidemann D, Ketterl W: *Endodontie - Grundlagen und Therapie*: In: Ketterl W (Hrsg): *Praxis der Zahnheilkunde* 3. Urban & Schwarzenberg, München, Wien, Baltimore, 1993, S. 111–212.
- Guida A (2006): Mechanism of action of sodium hypochlorite and its effects on dentin. *Minerva Stomatol* 55, S. 471–482.
- Gwinnett AJ (1993): Quantitative contribution of resin infiltration/hybridization to dentin bonding. *Am J Dent* 6, S. 7–9.
- Haller B, Hofmann N, Klaiber B, Bloching U (1993a): Effect of storage media on microleakage of five dentin bonding agents. *Dent Mater* 9, S. 191–197.
- Haller B, Hofmann N, Klaiber B, Pfannkuch A (1993b): Beständigkeit des Komposit-Dentinverbundes bei künstlicher Alterung. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 48, S. 100–1004.
- Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2007): Effect of new obturating materials on vertical root fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Endod* 33, S. 732–736.
- Hand RE, Smith ML, Harrison JW (1978): Analysis of the effect of dilution on the necrotic tissue dissolution property of sodium hypochlorite. *J Endod* 4, S. 60–64.
- Haragushiku GA, Teixeira CS, Furuse AY, Sousa YTS, Sousa Neto MD de, Silva RG (2012): Analysis of the interface and bond strength of resin-based endodontic cements to root dentin. *Microsc. Res. Tech.* 75, S. 655–661.
- Hebling J, Pashley DH, Tjäderhane L, Tay FR (2005): Chlorhexidine arrests subclinical degradation of dentin hybrid layers in vivo. *J. Dent. Res.* 84, S. 741–746.
- Heckendorff M, Hülsmann M: *Chelatoren*: In: Hülsmann M (Hrsg): *Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten*. Quintessenz Verl.-GmbH, Berlin, 2002, S. 161–180.
- Hellwig E, Klimek J, Attin T: *Einführung in die Zahnerhaltung*. 3 Aufl. Urban & Fischer, München, 2003.
- Helvey GA (2011): Adhesive dentistry: the development of immediate dentin sealing/selective etching bonding technique. *Compend Contin Educ Dent* 32, S. 22, 24–32, 34–5; quiz 36, 38.

- Hiraishi N, Papacchini F, Loushine RJ, Weller RN, Ferrari M, Pashley DH, Tay FR (2005): Shear bond strength of Resilon to a methacrylate-based root canal sealer. *Int Endod J* 38, S. 753–763.
- Hiraishi N, Yiu CKY, King NM, Tay FR (2009): Effect of 2% chlorhexidine on dentin microtensile bond strengths and nanoleakage of luting cements. *J Dent* 37, S. 440–448.
- Hülsmann M: Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten - eine vorläufige Bilanz: In: Hülsmann M (Hrsg): Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten. Quintessenz Verl.-GmbH, Berlin, 2002, S. 11–34.
- Hülsmann M (2002b): Die Wurzelkanalpräparation - manuell oder maschinell? *Hessisches Zahnärzte Magazin*, S. 18–27.
- Hülsmann M: Spülung: In: Hülsmann M (Hrsg): Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten. Quintessenz Verl.-GmbH, Berlin, 2002, S. 181–196.
- Hülsmann M: Endodontie. Checklisten der Zahnmedizin. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2008.
- Jørgensen KD, Itoh K, Munksgaard EC, Asmussen E (1985): Composite wall-to-wall polymerization contraction in dentin cavities treated with various bonding agents. *Scand J Dent Res* 93, S. 276–279.
- Takehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ (1965): The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol* 20, S. 340–349.
- Karagöz-Küçükay I, Bayirli G (1994): An apical leakage study in the presence and absence of the smear layer. *Int Endod J* 27, S. 87–93.
- Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung: Jahrbuch 2011. Statistische Basisdaten zur vertragszahnärztlichen Versorgung, einschließlich GOZ-Analyse, Köln, 2012.
- Ketterl W (Hrsg): Praxis der Zahnheilkunde 3. Zahnerhaltung II. 3. Aufl. Urban & Schwarzenberg, München, Wien, Baltimore, 1993.
- Khayat A, Jahanbin A (2005): The influence of smear layer on coronal leakage of Roth 801 and AH26 root canal sealers. *Aust Endod J* 31, S. 66–68.
- Kim YK, Grandini S, Ames JM, Gu L, Kim SK, Pashley DH, Gutmann JL, Tay FR (2010): Critical review on methacrylate resin-based root canal sealers. *J Endod* 36, S. 383–399.
- Kim YK, Mai S, Haycock JR, Kim SK, Loushine RJ, Pashley DH, Tay FR (2009): The self-etching potential of RealSeal versus RealSeal SE. *J Endod* 35, S. 1264–1269.
- Lehmann KM, Hellwig E: Zahnärztliche Propädeutik. 9. Aufl. Urban & Fischer, München, 2004.
- Leloup G, D'Hoore W, Bouter D, Degrange M, Vreven J (2001): Meta-analytical review of factors involved in dentin adherence. *J. Dent. Res.* 80, S. 1605–1614.
- Lin LM, Skribner JE, Gaengler P (1992): Factors associated with endodontic treatment failures. *J Endod* 18, S. 625–627.
- Marques Melo R de, Galhano G, Barbosa SH, Valandro LF, Pavanelli CA, Bottino MA (2008): Effect of adhesive system type and tooth region on the bond strength to dentin. *J Adhes Dent* 10, S. 127–133.

- Marshall GW, Marshall SJ, Kinney JH, Balooch M (1997): The dentin substrate: structure and properties related to bonding. *J Dent* 25, S. 441–458.
- Mills JC (1999): The endodontic autopsy: a valid learning tool. *J Endod* 25, S. 451–452.
- Mjör IA, Smith MR, Ferrari M, Mannocci F (2001a): The structure of dentine in the apical region of human teeth. *Int Endod J* 34, S. 346–353.
- Mjör IA, Sveen OB, Heyeraas KJ (2001b): Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 1: normal structure and physiology. *Quintessence Int* 32, S. 427–446.
- Mobarak EH (2011): Effect of chlorhexidine pretreatment on bond strength durability of caries-affected dentin over 2-year aging in artificial saliva and under simulated intrapulpal pressure. *Oper Dent* 36, S. 649–660.
- Morris MD, Lee KW, Agee KA, Bouillaguet S, Pashley DH (2001): Effects of sodium hypochlorite and RC-prep on bond strengths of resin cement to endodontic surfaces. *J Endod* 27, S. 753–757.
- Munck J de, Mine A, Poitevin A, van Ende A, Cardoso MV, van Landuyt KL, Peumans M, van Meerbeek B (2012): Meta-analytical review of parameters involved in dentin bonding. *J. Dent. Res.* 91, S. 351–357.
- Munck J de, Mine A, van den Steen PE, van Landuyt KL, Poitevin A, Opdenakker G, van Meerbeek B (2010): Enzymatic degradation of adhesive-dentin interfaces produced by mild self-etch adhesives. *Eur. J. Oral Sci.* 118, S. 494–501.
- Munck J de, van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, van Meerbeek B (2005): A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *J. Dent. Res.* 84, S. 118–132.
- Nagas E, Altundasar E, Serper A (2009): The effect of master point taper on bond strength and apical sealing ability of different root canal sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Radiol Endod* 107, S. e61-4.
- Nagas E, Uyanik MO, Eymirli A, Cehreli ZC, Vallittu PK, Lassila LVJ, Durmaz V (2012): Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers. *J Endod* 38, S. 240–244.
- Nagas E, Uyanik O, Durmaz V, Cehreli ZC (2011): Effect of plunger diameter on the push-out bond values of different root filling materials. *Int Endod J* 44, S. 950–955.
- Nakabayashi N (1992): The hybrid layer: a resin-dentin composite. *Proc Finn Dent Soc* 88 Suppl 1, S. 321–329.
- Nakabayashi N, Kojima K, Masuhara E (1982): The promotion of adhesion by the infiltration of monomers into tooth substrates. *J. Biomed. Mater. Res.* 16, S. 265–273.
- Nassar M, Awawdeh L, Jamleh A, Sadr A, Tagami J (2011): Adhesion of Epiphany self-etch sealer to dentin treated with intracanal irrigating solutions. *J Endod* 37, S. 228–230.
- Nielsen BA, Beeler WJ, Vy C, Baumgartner JC (2006): Setting times of Resilon and other sealers in aerobic and anaerobic environments. *J Endod* 32, S. 130–132.
- Nunes VH, Silva RG, Alfredo E, Sousa-Neto MD, Silva-Sousa YTC (2008): Adhesion of Epiphany and AH Plus sealers to human root dentin treated with different solutions. *Braz Dent J* 19, S. 46–50.

- Nygaard Östby B (1957): Chelation in root canal therapy: ethylenediaminetetraacetic acid for cleansing and widening of root canals. *Odontologisk Tidskrift* 65, S. 3–11.
- Pashley DH (1992): Smear layer: overview of structure and function. *Proc Finn Dent Soc* 88 Suppl 1, S. 215–224.
- Pashley DH, Carvalho RM, Sano H, Nakajima M, Yoshiyama M, Shono Y, Fernandes CA, Tay F (1999): The microtensile bond test: a review. *J Adhes Dent* 1, S. 299–309.
- Pashley DH, Depew DD, Galloway SE (1989): Microleakage channels: scanning electron microscopic observation. *Oper Dent* 14, S. 68–72.
- Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM (1995): Adhesion testing of dentin bonding agents: a review. *Dent Mater* 11, S. 117–125.
- Peters OA (2004): Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod* 30, S. 559–567.
- Peters OA, Peters CI, Schönenberger K, Barbakow F (2003): ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT. *Int Endod J* 36, S. 86–92.
- Phrukkanon S, Burrow MF, Tyas MJ (1998): Effect of cross-sectional surface area on bond strengths between resin and dentin. *Dent Mater* 14, S. 120–128.
- Reich E, Hiller KA (1993): Reasons for tooth extraction in the western states of Germany. *Community Dent Oral Epidemiol* 21, S. 379–383.
- Retief DH, Mandras RS, Russell CM, Denys FR (1990): Extracted human versus bovine teeth in laboratory studies. *Am J Dent* 3, S. 253–258.
- Roberts HW, Karpay RI, Mills SE (2000): Dental unit waterline antimicrobial agents' effect on dentin bond strength. *J Am Dent Assoc* 131, S. 179–183.
- Roydhouse RH (1970): Punch-shear test for dental purposes. *J. Dent. Res.* 49, S. 131–136.
- Rueggeberg FA, Margeson DH (1990): The effect of oxygen inhibition on an unfilled/filled composite system. *J. Dent. Res.* 69, S. 1652–1658.
- Ryan S (2010): Chlorhexidine as a canal irrigant: a review. *Compend Contin Educ Dent* 31, S. 338-42; quiz 343, 364.
- Sagsen B, Ustün Y, Demirbuga S, Pala K (2011): Push-out bond strength of two new calcium silicate-based endodontic sealers to root canal dentine. *Int Endod J* 44, S. 1088–1091.
- Sakaguchi RL, Wiltbank BD, Murchison CF (2004): Prediction of composite elastic modulus and polymerization shrinkage by computational micromechanics. *Dent Mater* 20, S. 397–401.
- Salz U, Bock T (2010): Testing adhesion of direct restoratives to dental hard tissue - a review. *J Adhes Dent* 12, S. 343–371.
- Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho R, Pashley DH (1994): Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength--evaluation of a micro-tensile bond test. *Dent Mater* 10, S. 236–240.
- Schäfer E, Lohmann D (2002): Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile--Part 2. Cleaning effectiveness and instrumentation results in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 35, S. 514–521.

- Schilder H (1974): Cleaning and shaping the root canal. *Dent. Clin. North Am.* 18, S. 269–296.
- Schmalz G (1990): Die Wurzelkanalbehandlung - Klinische Erfolge. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, S. 251–256.
- Schwartz RS (2006): Adhesive dentistry and endodontics. Part 2: bonding in the root canal system-the promise and the problems: a review. *J Endod* 32, S. 1125–1134.
- Sedgley CM, Messer HH (1992): Are endodontically treated teeth more brittle? *J Endod* 18, S. 332–335.
- Sen BH, Wesselink PR, Türkün M (1995): The smear layer: a phenomenon in root canal therapy. *Int Endod J* 28, S. 141–148.
- Shahravan A, Haghdoost A, Adl A, Rahimi H, Shadifar F (2007): Effect of smear layer on sealing ability of canal obturation: a systematic review and meta-analysis. *J Endod* 33, S. 96–105.
- Shanahan DJ, Duncan HF (2011): Root canal filling using Resilon: a review. *Br Dent J* 211, S. 81–88.
- Shipper G, Ørstavik D, Teixeira FB, Trope M (2004): An evaluation of microbial leakage in roots filled with a thermoplastic synthetic polymer-based root canal filling material (Resilon). *J Endod* 30, S. 342–347.
- Shokouhinejad N, Sabeti MA, Hasheminasab M, Shafiei F, Shamshiri AR (2010a): Push-out bond strength of Resilon/Epiphany self-etch to intraradicular dentin after retreatment: a preliminary study. *J Endod* 36, S. 493–496.
- Shokouhinejad N, Sharifian MR, Jafari M, Sabeti MA (2010b): Push-out bond strength of Resilon/Epiphany self-etch and gutta-percha/AH26 after different irrigation protocols. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 110, S. e88-92.
- Siqueira JF (2001): Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail. *Int Endod J* 34, S. 1–10.
- Siqueira JF, Rôças IN, Favieri A, Abad EC, Castro AJ, Gahyva SM (2000): Bacterial leakage in coronally unsealed root canals obturated with 3 different techniques. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 90, S. 647–650.
- Spratt DA, Pratten J, Wilson M, Gulabivala K (2001): An in vitro evaluation of the antimicrobial efficacy of irrigants on biofilms of root canal isolates. *Int Endod J* 34, S. 300–307.
- Stanislawczuk R, Reis A, Loguercio AD (2011): A 2-year in vitro evaluation of a chlorhexidine-containing acid on the durability of resin-dentin interfaces. *J Dent* 39, S. 40–47.
- Stansbury JW, Trujillo-Lemon M, Lu H, Ding X, Lin Y, Ge J (2005): Conversion-dependent shrinkage stress and strain in dental resins and composites. *Dent Mater* 21, S. 56–67.
- Sudsangiam S, van Noort R (1999): Do dentin bond strength tests serve a useful purpose? *J Adhes Dent* 1, S. 57–67.
- SybronEndo: Anwendungshinweis RealSeal Self-Etch™ System.
- Tang W, Wu Y, Smales RJ (2010): Identifying and reducing risks for potential fractures in endodontically treated teeth. *J Endod* 36, S. 609–617.
- Tay FR, Hiraishi N, Pashley DH, Loushine RJ, Weller RN, Gillespie WT, Doyle MD (2006): Bondability of Resilon to a methacrylate-based root canal sealer. *J Endod* 32, S. 133–137.

- Tay FR, Loushine RJ, Lambrechts P, Weller RN, Pashley DH (2005a): Geometric factors affecting dentin bonding in root canals: a theoretical modeling approach. *J Endod* 31, S. 584–589.
- Tay FR, Pashley DH (2007): Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod* 33, S. 391–398.
- Tay FR, Pashley DH, Suh BI, Carvalho RM, Itthagarun A (1992): Single-step adhesives are permeable membranes. *J Dent* 30, S. 371–382.
- Tay FR, Pashley DH, Williams MC, Raina R, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, King NM (2005b): Susceptibility of a polycaprolactone-based root canal filling material to degradation. I. Alkaline hydrolysis. *J Endod* 31, S. 593–598.
- Tay FR, Pashley DH, Yiu CKY, Yau JYY, Yiu-fai M, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, King NM (2005c): Susceptibility of a polycaprolactone-based root canal filling material to degradation. II. Gravimetric evaluation of enzymatic hydrolysis. *J Endod* 31, S. 737–741.
- Teixeira FB, Teixeira ECN, Thompson J, Leinfelder KF, Trope M (2004a): Dentinal bonding reaches the root canal system. *J Esthet Restor Dent* 16, S. 348-54; discussion 354.
- Teixeira FB, Teixeira ECN, Thompson JY, Trope M (2004b): Fracture resistance of roots endodontically treated with a new resin filling material. *J Am Dent Assoc* 135, S. 646–652.
- Torneck CD, Titley KC, Smith DC, Adibfar A (1990): The influence of time of hydrogen peroxide exposure on the adhesion of composite resin to bleached bovine enamel. *J Endod* 16, S. 123–128.
- Ungor M, Onay EO, Orucoglu H (2006): Push-out bond strengths: the Epiphany–Resilon endodontic obturation system compared with different pairings of Epiphany, Resilon, AH Plus and gutta-percha. *International Endodontic Journal* 39, S. 643–647.
- Ureyen Kaya B, Keçeci AD, Orhan H, Belli S (2008): Micropush-out bond strengths of gutta-percha versus thermoplastic synthetic polymer-based systems - an ex vivo study. *Int Endod J* 41, S. 211–218.
- van Landuyt KL, Snauwaert J, Peumans M, Munck J de, Lambrechts P, van Meerbeek B (2008): The role of HEMA in one-step self-etch adhesives. *Dent Mater* 24, S. 1412–1419.
- van Meerbeek B, Munck J de, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Vijay P, van Landuyt K, Lambrechts P, Vanherle G (2003): Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent* 28, S. 215–235.
- van Meerbeek B, Peumans M, Poitevin A, Mine A, van Ende A, Neves A, Munck J de (2010): Relationship between bond-strength tests and clinical outcomes. *Dent Mater* 26, S. e100-21.
- van Noort R, Cardew GE, Howard IC, Noroozi S (1991): The effect of local interfacial geometry on the measurement of the tensile bond strength to dentin. *J. Dent. Res.* 70, S. 889–893.
- van Noort R, Noroozi S, Howard IC, Cardew G (1989): A critique of bond strength measurements. *J Dent* 17, S. 61–67.
- Versluis A, Tantbirojn D, Douglas WH (1997): Why do shear bond tests pull out dentin? *J. Dent. Res.* 76, S. 1298–1307.

Vilanova WV, Carvalho-Junior JR, Alfredo E, Sousa-Neto MD, Silva-Sousa YTC (2012): Effect of intracanal irrigants on the bond strength of epoxy resin-based and methacrylate resin-based sealers to root canal walls. *Int Endod J* 45, S. 42–48.

Weine FS: *Endodontic Therapy*. Elsevier Health Sciences, 1989.

Welsch U: *Sobotta: Lehrbuch Histologie*. Elsevier Urban & Fischer, 2005.

White RR, Hays GL, Janer LR (1997): Residual antimicrobial activity after canal irrigation with chlorhexidine. *J Endod* 23, S. 229–231.

Williams C, Loushine RJ, Weller RN, Pashley DH, Tay FR (2006): A comparison of cohesive strength and stiffness of Resilon and gutta-percha. *J Endod* 32, S. 553–555.

Yiu CKY, García-Godoy F, Tay FR, Pashley DH, Imazato S, King NM, Lai SCN (2002): A nanoleakage perspective on bonding to oxidized dentin. *J. Dent. Res.* 81, S. 628–632.

Yoshikawa T, Sano H, Burrow MF, Tagami J, Pashley DH (1999): Effects of dentin depth and cavity configuration on bond strength. *J. Dent. Res.* 78, S. 898–905.

Yoshiyama M, Tay FR, Doi J, Nishitani Y, Yamada T, Itou K, Carvalho RM, Nakajima M, Pashley DH (2002): Bonding of self-etch and total-etch adhesives to carious dentin. *J. Dent. Res.* 81, S. 556–560.

Zirkel C (2012): *Aufbereitung des Wurzelkanalsystems mit einem einzelnen Instrument*. *Der Freie Zahnarzt*, S. 64–74.

9 Thesen

1. Die Wurzelkanalbehandlung stellt bei einer irreversiblen Erkrankung der Pulpa die Therapie der Wahl dar, um den betroffenen Zahn in situ zu erhalten. Ihr Gelingen ist an die Schaffung und die dauerhafte Sicherstellung eines keimfreien Milieus gebunden.
2. Zur Obturation der aufbereiteten Wurzelkanäle wird üblicherweise Guttapercha zusammen mit dem Sealer AH Plus™ verwendet. Seit relativ kurzer Zeit wird versucht, durch den Einsatz von adhäsiven Techniken einen dichteren und festeren Verbund zur Wurzelkanalwand herzustellen. Zu diesem Zweck kann Resilon™ (RealSeal™) in Verbindung mit einem selbstadhäsiven Sealer (RealSeal SE™) verwendet werden.
3. Als Spülung während der Aufbereitung stehen verschiedene Lösungen zur Verfügung. Dazu gehören isotonische Kochsalzlösung, Natriumhypochlorit, CHX und EDTA. Diese Agenzien können – neben ihrem unterschiedlichen antibakteriellen Potenzial – unterschiedlich auf die Ausbildung eines Verbundes zwischen Wurzeldentin und Wurzelfüllmaterial wirken.
4. Ziel dieser In-vitro-Studie war die Bestimmung der Haftfestigkeit [MPa] der beiden Sealer AH Plus™ und RealSeal SE™ an der Wurzelkanalwand unter dem Einfluss der aufgeführten Spüllösungen. Zu diesem Zweck wurden 200 menschliche Wurzelkanäle standardisiert aufbereitet und gleichmäßig auf zehn Versuchsgruppen verteilt. In jeder Gruppe wurde eine andere Kombination aus Wurzelfüllmaterial und Spülung angewendet.
5. Nach erfolgter Obturation wurden aus jeder Wurzel drei 1 mm dünne, transversale Sägeschnitte entnommen und die maximale Belastbarkeit der insgesamt 600 Proben [N] wurde bei Druck entlang der Verbundschicht ermittelt. Dies erfolgte unter Einsatz des (thin-slice) Push-out-Tests in einer Universalprüfmaschine.
6. Die Größe der Verbundfläche konnte individuell für jede Probe aus den Scheibendicken sowie aus den mit Hilfe eines Lichtmikroskops gemessenen Wurzelkanalumfängen bestimmt werden – sie floss in die Berechnung der Haftfestigkeitswerte ein.
7. Der Sealer AH Plus™ erzielte beim Einsatz der verschiedenen Spüllösungen gleichbleibende Haftfestigkeiten, die zudem grundsätzlich über denen von RealSeal SE™ lagen.
8. Die Haftfestigkeitswerte von RealSeal SE™ schwankten stark in Abhängigkeit von der verwendeten Spüllösung. So führte der Einsatz von EDTA, CHX und Natriumhypochlorit allein zu einer näherungsweise Halbierung der Verbundfestigkeit. Mit dem abschließenden Einsatz von Kochsalzlösung konnte der negative Einfluss von Natriumhypochlorit auf die Haftung des Resilon™-Systems allerdings aufgehoben werden.

9. Im Ergebnis dieser Arbeit kann geschlussfolgert werden, dass der Verbund zur Wurzelkanalwand sowohl vom verwendeten Material als auch vom Spülprotokoll beeinflusst wird. Es konnte konkret gezeigt werden, dass das adhäsive Wurzelfüllmaterial RealSeal™/RealSeal SE™ der klinisch bewährten Kombination mit Guttapercha/AH Plus™ in Bezug auf die Verbundfestigkeit zur Wurzelkanalwand unterlegen ist.

10. Der Einsatz des Mikro-Ausstoßverfahrens stellt eine sinnvolle Möglichkeit dar, um die Haftfestigkeit von Wurzelfüllmaterialien an Kanalwänden zu bestimmen. Zusammen mit der artifiziellen Alterung der Proben bzw. einer Simulation der Kaubelastung ergeben sich zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten, sowohl was die Lokalisation entlang des Wurzel-niveaus anbelangt als auch mögliche Vergleichen zwischen diesen.

Tabellarischer Lebenslauf

Angaben zur Person:

Name	Stelzer, Reimund
Geburtsdatum	22.08.1983
Geburtsort	Halle (Saale)
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig
Eltern	Dr. Stelzer, Hans-Dieter Dr. Schneider-Hartan, Doris; geb. Buselmeier

Schulbesuch:

1990 – 1994	Hans Christian Andersen Grundschule Halle
1994 – 2003	Gymnasium „Georg Cantor“ Halle
07 / 2003	Allgemeine Hochschulreife

Wehrdienst:

07 / 2003 – 03 / 2004	Grundwehrdienst
-----------------------	-----------------

Hochschulbesuch:

04 / 2004 – 03 / 2007	Ludwig-Maximilians-Universität München - Studium der Zahnmedizin -
04 / 2007 – 11 / 2009	Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg - Fortsetzung des Studiums -
11 / 2009	Approbation als Zahnarzt

Beruflicher Werdegang:

01 / 2010 – 12 / 2011	Vorbereitungsassistent in einer Praxis in Magdedurg
seit 01 / 2012	angestellter Zahnarzt in einer Praxis in Magdeburg

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Reimund Stelzer, geboren am 22.08.1983, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Reimund Stelzer

Halle, 25.01.2013

Erklärung über frühere Promotionsversuche

Hiermit erkläre ich, Reimund Stelzer, dass ich bisher keine Promotionsversuche unternommen habe. Die vorliegende Dissertation wurde weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form veröffentlicht.

Reimund Stelzer

Halle, 25.01.2013

Publikation von Ergebnissen der Arbeit

1. Stelzer R, Schaller HG, Gernhardt CR: Push-out bond strength of RealSeal SE and AH Plus after using different irrigation solutions.
am 10.05.2014 vom Journal of Endodontics (J Endod) zur Veröffentlichung akzeptiert

Danksagung

Herrn PD Dr. med. dent. Christian R. Gernhardt (Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie) danke ich für das interessante Thema und die Unterstützung sowie Motivation bei der Anfertigung der Arbeit.

Mein Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. med. dent. Hans-Günter Schaller (Direktor der Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie) für die Unterstützung und die Zulassung zur Promotion an seiner Klinik.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie möchte ich für die Unterweisung und Betreuung an den Versuchsständen danken.

Danken möchte ich ebenfalls den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie an den Universitäten Halle und Magdeburg für die freundliche Unterstützung beim Sammeln der Proben, genauso wie den helfenden niedergelassenen Zahnärztinnen und Zahnärzten.

Meiner Familie und meinen Freunden möchte ich herzlich danken für den Rückhalt und die konstruktive Kritik während der vielen Arbeitsstunden.