

Aus der Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin
des CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Einfluss der Reinigungsmethode, des Befestigungskomposites
und der Stiftbettpräparation auf die Retention faserverstärkter
Wurzelkanalstifte**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Wladimir Eirich
aus Koktschetaw

Gutachter: 1. Priv. Doz. Dr. Kerstin Bitter
2. Prof. Dr. Michael Naumann
3. Priv. Doz. Dr. Till Dammaschke

Datum der Promotion: 30.11.2012

**Die Ergebnisse der vorliegenden Studie wurden auf dem Deutschen
Zahnärztetag (2010) präsentiert:**

Bitter K*, Eirich W, Neumann K, Kielbassa AM, Weiger R, Krastl G
Retention faserverstärkter Stifte *in vitro*.

** ausgezeichnet mit dem Jahresbestpreis der DGZ für den zweitbesten Kurzvortrag*

**Die Ergebnisse der vorliegenden Studie wurden zur Publikation
angenommen:**

Bitter K, Eirich W, Neumann K, Weiger R, Krastl G
Effect of cleaning method, luting agent and preparation procedure on the
retention of fibre posts. Int Endod J 2012 (im Druck).

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Anzeige einer Publikation/eines Preises	III
Widmung	IV
1 Einleitung.....	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Frakturanfälligkeit endodontisch behandelter Zähne	3
2.2 Einsatz intrakanalärer Stifte	4
2.3 Faserstifte	5
2.3.1 Vorteile faserverstärkter Stiftsysteme.....	5
2.3.2 Zusammensetzung, Formen und mechanische Eigenschaften faserverstärkter Stifte.....	6
2.3.3 Präparation der Stiftbettkavität	7
2.4 Reinigung der Stiftbettkavität.....	9
2.5 Adhäsive Befestigung faserverstärkter Wurzelkanalstifte.....	10
2.5.1 Die Befestigungskomposite.....	10
2.5.2 Die Polymerisationsschrumpfung.....	11
2.5.3 Der Konfigurationsfaktor (C-Faktor) und die Zementfugenbreite	11
2.5.4 Die Adhäsivsysteme.....	13
2.5.5 Die Adhäsivtechnik im Wurzelkanal	14
2.5.6 Der Verbund zur Stiftoberfläche	15
2.6 Klinische Evaluation faserverstärkter Wurzelkanalstifte	16
3 Ziel der Arbeit und Arbeitshypothese.....	19
4 Material und Methoden	20
4.1 Materialien	20
4.1.1 Das Stiftsystem	20
4.1.2 Die Befestigungsmaterialien	21
4.1.3 Die Hilfsmaterialien	24
4.1.3.1 Farbstoffe	24
4.1.3.2 Sonstige Hilfsmaterialien.....	24
4.2 Methode	25
4.2.1 Flussdiagramm der Studie	25
4.2.2 Übersicht.....	26
4.2.3 Vorbereitung der Proben	26

4.2.4	Aufbereitung und Füllung der Wurzelkanäle	27
4.2.5	Stiftbettpräparationen	28
4.2.6	Reinigungsmethoden	30
4.2.7	Ermittlung des Sauberkeitsgrades mit einem OP-Mikroskop	32
4.2.8	Einsetzen der Wurzelstifte	33
4.2.8.1	Verarbeitung von SmartCem2	34
4.2.8.2	Verarbeitung von CoreX Flow	34
4.2.9	Vorbereitung der Proben für die Auszugsversuche	35
4.2.10	Herstellung der Abzugshaken	37
4.2.11	Auszugsversuche	38
4.2.12	Bruchmodus-Bestimmung.....	40
4.2.13	Qualitative Analyse mit REM.....	41
4.2.14	Qualitative Analyse mit CLSM.....	42
4.2.14.1	Verarbeitung von SmartCem2	42
4.2.14.2	Verarbeitung von CoreX Flow	42
4.2.14.3	Vorbereitung der Proben	42
4.2.14.4	Anfertigung und Bewertung der Bilder.....	43
4.2.15	Statistische Auswertung	43
5	Ergebnisse.....	45
5.1	Ergebnisse zur Stiftretention	45
5.1.1	Einfluss der Reinigungsmethode auf die Stiftretention	45
5.1.2	Einfluss der Präparationsart auf die Stiftretention	46
5.1.3	Einfluss des Befestigungskomposites auf die Stiftretention	46
5.2	Ergebnisse zu den Versagensmodi	47
5.3	Ergebnisse zum Einfluss der Reinigungsmethoden auf die Sauberkeit der Stiftbettkavität	50
5.4	Ergebnisse der qualitativen Analyse mit REM.....	52
5.4.1	Der Vergleich zwischen den Reinigungsmethoden	52
5.4.2	Der Vergleich zwischen den Präparationsarten	53
5.5	Ergebnisse der CLSM-Untersuchung.....	54
6	Diskussion	57
6.1	Diskussion der Methode.....	57
6.1.1	Probenzähne.....	57

6.1.2 Endodontische Behandlung der Zahnwurzeln.....	58
6.1.3 Stiftbettpräparationen und Reinigungen der Stiftbettkavität.....	58
6.1.4 Die Observation der verunreinigten Wurzelkanalwände	60
6.1.5 Adhäsive Befestigung der Faserstifte.....	61
6.1.6 Die Anwendung des Zugversuches zur Ermittlung der Retention faserverstärkter Wurzelkanalstifte	62
6.1.7 Die Bestimmung der Versagensmodi.....	64
6.2 Diskussion der Ergebnisse	65
6.2.1 Der Einfluss der Reinigungsmethode auf die Sauberkeit des Wurzelkanals und die Retention faserverstärkter Kompositstifte.....	65
6.2.2 Der Einfluss des Befestigungskomposites auf die Retention faserverstärkter Kompositstifte	67
6.2.3 Der Einfluss der Präparationsmethode auf die Retention faserverstärkter Kompositstifte	68
6.2.4 Diskussion der Versagensmodi.....	73
7 Schlussfolgerungen.....	74
8 Zusammenfassung.....	75
9 Abstract.....	77
10 Literaturverzeichnis	79
11 Anhang.....	97
11.1 Abkürzungsverzeichnis.....	97
11.2 Abbildungsverzeichnis.....	98
11.3 Tabellenverzeichnis	100
11.4 Liste der verwendeten Materialien	100
11.5 Liste der verwendeten Hilfsmaterialien	101
11.6 Geräteliste	102
11.7 Bearbeitungsprogramme	104
11.8 Danksagung	105
11.9 Lebenslauf.....	106
11.10 Eidesstattliche Erklärung.....	108

1 Einleitung

Wurzelkanalbehandelte Zähne zeigen in Langzeituntersuchungen ein mehr als dreimal so hohes Misserfolgsrisiko im Vergleich zu gleichartig versorgten vitalen Zähnen [Van Nieuwenhuysen *et al.* 2003]. Um diesen Zustand zu verbessern, ist es unumgänglich sich neben den Problemen und Schwierigkeiten der endodontischen Behandlung auch mit denen der postendodontischen Versorgung auseinanderzusetzen und die notwendigen Behandlungsschritte zu optimieren.

Stark zerstörte, devitale Zähne werden nach einer suffizient durchgeführten endodontischen Behandlung aufgebaut, um eine Verankerung für die definitive Restauration zu schaffen. In Situationen, in denen die übrig gebliebene Zahnhartsubstanz einen nur ungenügenden Halt für das plastische Aufbaumaterial bietet, kommen immer öfter adhäsiv befestigte, faserverstärkte Wurzelkanalstifte aus Komposit zum Einsatz. Bei der Präparation einer Stiftbettkavität für solche Konfektionsstifte wird oft Zahnhartsubstanz entfernt. Daher erscheint es sinnvoll, auf diese zu verzichten und einen am besten in den Kanal passenden Stift zu wählen. Erfolgen die Wurzelfüllung und die Stiftsetzung nicht in derselben Behandlungssitzung, wird eine Zahnhartsubstanz schonende Entfernung der Guttapercha mit überlangen Rosenbohrern empfohlen [Krastl 2007; Krastl *et al.* 2008; Bitter *et al.* 2010]. Bei diesem Vorgehen ist durch die Formkongruenz zwischen der Stiftbettkavität und dem Stift mit variierenden Zementfugenbreiten zu rechnen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt herrscht noch Unklarheit darüber, ob bei adhäsiv zu befestigenden Konfektionsstiften formkongruente Stiftbettpräparationen angestrebt werden sollten. Darüber hinaus ist noch nicht abschließend geklärt, welche Befestigungssysteme eine bessere Haftung zum Wurzelkanalentin liefern. In-vitro-Untersuchungen zu Passformen von Faserstiften zeigen zwar keine Auswirkungen auf die Frakturresistenz wurzelkanalbehandelter Zähne [Buettel *et al.* 2009], die Ergebnisse hinsichtlich der Haftkraft zum Wurzelkanalentin variieren jedoch in Abhängigkeit vom Studiendesign [Perdigao *et al.* 2007; Schmage *et al.* 2009a].

Des Weiteren können Überreste der Kanalaufbereitung und -konditionierung [Serafino *et al.* 2004] sowie Sealer- und Guttapercharesten [Goracci *et al.* 2005c; Perdigao *et al.* 2007; Zhang *et al.* 2008] an den Wurzelkanalwänden verbleiben und den Dentin-Komposit-Verbund schwächen. Zur Reinigung der Stiftbettkavität wurden u.a. die Anwendung von rotierenden Wurzelkanalbürstchen mit feuchtem Bimsmehl [Krastl 2007; Krastl *et al.* 2008; Bitter *et al.* 2010] und das Abstrahlen mit Aluminiumoxidpartikeln [Zappini und Seitner 2005; Kianusch 2009; Etienne und Schoeffler 2010] empfohlen.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, die Effektivität der vorgenannten Reinigungsmethoden beim Einsatz in der Stiftbettkavität zu untersuchen. Darüber hinaus sollte geklärt werden, inwieweit der Sauberkeitsgrad der Wurzelkanalwände sowie das Befestigungssystem die Retention faserverstärkter Kompositstifte beeinflussen. Auch sollte überprüft werden, ob die gezielte Wurzelfüllmaterialentfernung mit überlangen Rosenbohrern eine bessere Stiftretention liefert als eine formkongruente Stiftbettpräparation mit den auf das Stiftsystem abgestimmten Vorbohrern.

2 Literaturübersicht

2.1 Frakturanfälligkeit endodontisch behandelter Zähne

Endodontisch versorgte Zähne frakturieren im Vergleich zu vitalen Zähnen häufiger [Fennis *et al.* 2002; Adolphi *et al.* 2007; Chen *et al.* 2008]. Bei der Wurzelkanalbehandlung wird durch die Präparation der Zugangskavität und die Aufbereitung der Wurzelkanäle Zahnhartsubstanz entfernt, wodurch der Zahn eine Schwächung gegenüber funktionellen Beanspruchungen erfährt [Fernandes und Dessai 2001; Tang *et al.* 2010]. Reeh *et al.* untersuchten die einzelnen substanzfordernden Arbeitsschritte einer endodontischen Behandlung auf ihre Auswirkung auf die mechanische Belastbarkeit des betroffenen Zahnes. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Präparation einer MOD-Kavität (zwei fehlende Seitenwände zusätzlich zur zentralen Zugangskavität) den Zahn um 63 % destabilisiert und damit im Vergleich zu der Wurzelkanalaufbereitung und der Trepanation den größten Beitrag zur Frakturanfälligkeit leistet [Reeh *et al.* 1989]. Als eine weitere Ursache wird der Verlust pulpaler Mechanorezeptoren diskutiert, der zu einer höheren Belastung devitaler Zähne führen soll [Randow und Glantz 1986]. Zunehmende Versprödung [Sedgley und Messer 1992] sowie Dehydrierung des Dentins wurzelkanalbehandelter Zähne [Papa *et al.* 1994] konnten nicht nachgewiesen werden und erklären zum jetzigen Zeitpunkt nicht die erhöhten Frakturraten.

Ist für den adhäsiven Aufbau nur wenig Restzahnhartsubstanz vorhanden, kommt ein Wurzelkanalstift zur Anwendung. Intrakanaläre Stifte bieten dem Aufbau lediglich eine zusätzliche Retentions- bzw. Adhäsionsfläche [Christensen 1996; Heydecke *et al.* 1999]. Eine Stabilisierung der Zahnwurzel wird durch den Einsatz eines Stiftes nicht erreicht [Guzy und Nicholls 1979; Sorensen und Engelman 1990; Heydecke *et al.* 1999]. Die Stiftbettpräparation bewirkt zudem einen weiteren Substanzverlust, der zu einer zusätzlichen Schwächung des devitalen Zahnes führt [Trope *et al.* 1985; Sidoli *et al.* 1997; Schwartz und Robbins 2004]. Eine besondere Rolle spielt hierbei der Abtrag des an den Wurzelkanal grenzenden inneren Dentins, dem eine große Bedeutung für die Frakturresistenz endodontisch behandelter Zähne zugesprochen wird [Kishen *et al.* 2004]. Erfolgt die Präparation nicht formkongruent zum Wurzelkanal, so kommt es zu einem größeren Verlust dieser wichtigen Dentinschicht und einer Zerstörung der natürlichen Wurzelkanalgeometrie, wodurch die Destabilisierung des Zahnes deutlich stärker ausfällt [Lang *et al.* 2006].

Vor der prothetischen Rehabilitation erfolgt die Präparation der aufgebauten koronalen Restzahnhartsubstanz. Hierbei sollte ein bandartiger, mindestens 1,5 bis 2 mm starker zervikaler Dentinsaum apikal des Aufbaus präpariert werden (Ferrule-

Präparation), der durch die prothetische Krone umfasst wird [Sorensen und Martinoff 1984; Sorensen und Engelman 1990]. Dieses Fassreifendesign übt nach der Eingliederung der Restauration einen wichtigen frakturprophylaktischen Effekt aus [Bolhuis *et al.* 2001; Stankiewicz und Wilson 2002]. Durch eine gleichmäßigere Verteilung der Kaukräfte über die Außenflächen der Zahnwurzeln trägt diese Präparationsweise zum klinischen Langzeiterfolg bei [Torbjørner *et al.* 1995]. Ist die Wurzelwandstärke jedoch auf 0,5 bis 0,75 mm durch Aufweitung des Kanaleinganges reduziert, kann keine Ferrule-Präparation mehr durchgeführt werden [Naumann *et al.* 2006]. In solchen Situationen wird die Belastbarkeit der Gesamtversorgung als kritisch angesehen [Yoldas *et al.* 2005].

2.2 Einsatz intrakanalärer Stifte

Noch ist nicht abschließend geklärt, wieviel an koronaler Restzahnhartsubstanz vorhanden sein sollte, um einen adhäsiven Aufbau auch ohne die intrakanaläre Verankerung sicher zu befestigen. Edelhoff *et al.* schlagen in der Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) eine Einteilung wurzelkanalbehandelter Zähne in einen geringen, mittleren und hohen Zerstörungsgrad vor [Edelhoff *et al.* 2003]. Lediglich bei einem starken Destruktionsgrad der klinischen Krone (ein Dentinsaum von weniger als 2 mm Höhe) wird die Wurzelkanalstiftinsertion empfohlen [Creugers *et al.* 1993; Bitter *et al.* 2009a].

Bei der Entscheidungsfindung über den Einsatz eines Wurzelkanalstiftes ist darüber hinaus der Zahntyp von großer Bedeutung. Während bei oberen Frontzähnen die Wurzelstiftinsertion den Bruchwiderstand *in vitro* erhöht [Naumann *et al.* 2007], kann bei Molaren, die in der Mundhöhle überwiegend axialen Kräften ausgesetzt sind, dieser Effekt nicht beobachtet werden [Salameh *et al.* 2006]. Da darüber hinaus die postendodontische Kavität von Molaren dem Aufbau eine große Adhäsionsfläche bietet, wurde vermutet, dass auf die Befestigung eines intrakanalären Stiftes bei einem hohen Zerstörungsgrad verzichtet werden kann [Butz *et al.* 2007; Krastl *et al.* 2008]. In einer klinischen Studie zeigten jedoch Molaren mit einem großen Zahnhartsubstanzverlust ohne zusätzliche Stiftverankerung bereits nach 32 Monaten erhöhte Versagensraten [Bitter *et al.* 2009a]. Versuche zur Bestimmung der Bruchlast von endodontisch behandelten und mit verschiedenen Restaurationen versorgten oberen Prämolaren zeigen, dass die Befestigung eines Faserstiftes sich bereits bei zwei übrig gebliebenen Zahnwänden oberhalb von 2 mm positiv auf die Frakturresistenz auswirkt [Sorrentino *et al.* 2007]. Diese Ergebnisse scheinen sich auch klinisch zu bestätigen [Ferrari *et al.* 2007b; Signore *et al.* 2011]. Auch Unterkiefer-Prämolaren könnten ein ähnliches Bruchverhalten aufweisen [Nam *et al.* 2010].

Sind demnach Anteile der klinischen Krone vorhanden, ist die Notwendigkeit einer intrakanalären Verankerung kritisch zu hinterfragen und Rücksicht auf den Zahntyp zu nehmen.

2.3 Faserstifte

2.3.1 Vorteile faserverstärkter Stiftsysteme

Die klassische Einteilung der Wurzelkanalstifte kann nach dem Material (Metall, Keramik, faserverstärktes Komposit), dem Herstellungsverfahren (individuell, halbkonfektioniert, vollkonfektioniert), der Form (konisch, zylindrisch, zylindrokonisch) oder der Oberflächenbeschaffenheit (glatt, aufgeraut, mit Gewinde) erfolgen [Lauer *et al.* 1996]. Inzwischen werden auch anatomisch geformte [Grandini *et al.* 2005a] und industriell vorkonditionierte Faserstifte [Edelhoff *et al.* 2006] eingesetzt. Immer öfter erfolgt die intrakanaläre Verankerung mit faserverstärkten Kompositstiften [Bitter und Kielbassa 2007a; Naumann 2009], obwohl diese eine geringere Belastbarkeit gegenüber metallischen Stiftsystemen aufweisen [Torbjörner und Fransson 2004]. Die Vorteile gegenüber den bewährten metallischen Wurzelkanalstiften werden nicht nur in einem besseren ästhetischen Ergebnis und der Biokompatibilität gesehen [Wirz und Christ 1982; Wataha 2000], sondern auch im dentinähnlichen Elastizitätsmodul (E-Modul Faserstift = 20-40 GPa; E-Modul Dentin = 18 GPa) [Duret *et al.* 1990a; Duret *et al.* 1990b; Ottl *et al.* 2002; Galhano *et al.* 2005]. In einer retrospektiven Studie von Sorensen und Martinoff mit 420 wurzelkanalbehandelten Zähnen, die mit gegossenen Stumpfaufbauten versorgt waren, versagten 36 Rekonstruktionen durch Retentionsverlust, Wurzelfraktur oder -perforation [Sorensen und Martinoff 1984]. In einer weiteren groß angelegten klinischen Studie von Axelsson *et al.*, mit einem Beobachtungszeitraum von 30 Jahren, stellten Wurzelfrakturen von endodontisch behandelten Zähnen, die mit einem metallischen Aufbaustift versorgt waren, den Hauptgrund für Zahnverlust dar [Axelsson *et al.* 2004]. Als Erklärung für solche Misserfolge wird u. a. der extreme Unterschied zwischen der Rigidität des metallischen Aufbaustiftes und des Dentins angenommen, der zu Stresskonzentrationen innerhalb der Zahnwurzel führen soll [Assif *et al.* 1993; Assif 1994; Bolhuis *et al.* 2004; Lanza *et al.* 2005]. Im Gegensatz dazu lassen Faserstifte eine gewisse Biegung beim Kauen zu. Sie könnten somit eine gleichmäßigere Spannungsverteilung zwischen Dentin und Konfektionsstift ermöglichen [Bateman *et al.* 2003; Lanza *et al.* 2005; Barjau-Escribano *et al.* 2006]. Darüber hinaus tragen in Finite-Element-Analysen (FE-Analysen) Befestigungskomposite auf Bis-GMA Basis, die einen dentinähnlichen E-Modul aufweisen, zu einer besseren Stressverteilung entlang der Kanalwände bei [Li *et al.* 2006; Tay und Pashley 2007]. Aktuelle Studien zeigen jedoch bei adhäsiv befestigten

Metall- und Faserstiften nahezu identische Spannungsverteilungsmuster in der Zahnwurzel [Santos *et al.* 2010] oder sogar höhere Spannungswerte bei Zähnen mit Faserstiften [Meira *et al.* 2009; Santos *et al.* 2009]. Dennoch kann die Frakturgefahr der Zahnwurzel *in vitro* [Isidor *et al.* 1996; Mannocci *et al.* 1999a] und *in vivo* [Ferrari *et al.* 2000b] durch die Wahl eines faserverstärkten Wurzelkanalstiftes reduziert werden. Außerdem erweisen sich die Frakturmodi oft als restaurierbar [Mannocci *et al.* 1999a; Akkayan und Gulmez 2002; Fokkinga *et al.* 2004; Salameh *et al.* 2008; Naumann *et al.* 2008b; Beer *et al.* 2010]. Der biomechanische Vorteil faserverstärkter Kompositstifte wird folgendermaßen erklärt: Je niedriger der E-Modul des intrakanalären Stiftes, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Überbeanspruchung eher der Stift-Stumpf-Aufbau versagt, als dass es zu einer Wurzelfraktur kommt [Naumann 2009; Santos *et al.* 2010]. Weitere Faktoren, die das Frakturverhalten beeinflussen, sind der Durchmesser des Konfektionsstiftes, die koronale Restzahnhartsubstanz, die Haftkraft an verschiedenen Verbundflächen in der Dentin-Stift-Zement-Einheit, die Festigkeit und Rigidität des Aufbaumaterials, die Präparation eines Fassreifens und die Belastungsrichtung der Kaukräfte [Sorensen *et al.* 2001; Naumann *et al.* 2007]. In einer klinischen Studie von Naumann *et al.* wurde darüber hinaus gezeigt, dass der Zahntyp, das Vorhandensein von Approximalkontakten sowie die Art der definitiven Versorgung Einfluss auf den Erfolg postendodontischer Restaurationen nehmen [Naumann *et al.* 2005b].

Ein weiterer Vorteil faserverstärkter Kompositstifte gegenüber starren Materialien wie Metall oder Keramik liegt in ihrer leichten Entfernbarkeit im Falle einer notwendigen Wurzelfüllungsrevision oder Stiftfraktur [Sirimai *et al.* 1999; de Rijk 2000]. Bei der Entfernung werden rotierende Instrumente durch den parallelen Faserverlauf geführt, wodurch das Risiko einer Wurzelf perforation herabgesetzt werden soll [de Rijk 2000; Anderson *et al.* 2007]. Darüber hinaus wird im Vergleich zur Versorgung mit indirekten Stiftaufbauten ein verringertes Reinfektionsrisiko durch eine zeitsparende Chairside-Behandlung diskutiert [Bateman *et al.* 2003; Schwartz und Robbins 2004].

2.3.2 Zusammensetzung, Formen und mechanische Eigenschaften faserverstärkter Stifte

Faserstifte setzen sich aus einer Kompositmatrix zusammen, in die vorbehandelte Fasern eingebettet sind [Bateman *et al.* 2003], welche die stressaufnehmende und widerstandsfähige Komponente darstellen. Je nach Faserart lassen sich Karbon-, Glas- oder Quarzfaserstifte unterscheiden.

Druck-, Biege-, Zug- und Scherfestigkeit der Wurzelstifte werden durch Faserqualität, Faservolumengehalt und die Verbundeigenschaften der Fasern zur

Matrix beeinflusst [Lassila *et al.* 2004]. Die Beanspruchbarkeit der Stifte ist abhängig von der Faserart, dem Kraftangriffswinkel und der Faserausrichtung [Dyer *et al.* 2004]. Fasern, die entlang der Stiftlängsachse ausgerichtet sind, verleihen dem Wurzelstift die Eigenschaft, Belastungen zu absorbieren [Duret *et al.* 1990a; Duret *et al.* 1990b]; eine abweichende Faserausrichtung führt zur Übertragung von Belastungen auf die Matrix, wodurch diese zerstört werden kann. Darüber hinaus setzen Luftblasen und Hohlräume innerhalb des Wurzelkanalstiftes seine Festigkeit herab [Mannocci *et al.* 2001; Grandini *et al.* 2005b]. In Ermüdungstests zeigen Quarzfaserstifte im Vergleich zu Karbon- und Glasfaserstiften die besten Ergebnisse [Baldissara *et al.* 2001; Grandini *et al.* 2005b].

Bei modernen Stiftsystemen ist kein direkter Kontakt zwischen Wurzelstift und Dentin vorhanden. Es existiert ein Zwischenraum, der mit Befestigungsmaterialien ausgefüllt wird. Die Retention solcher Wurzelkanalstifte hängt neben den klinischen Gegebenheiten von der Form, der Oberflächenbeschaffenheit, der Länge des Stiftes sowie den Eigenschaften des Zementes ab [Standlee *et al.* 1978]. Konfektionsstifte dieser Systeme besitzen folgende Geometrien: konisch, zylindrisch und zylindrokonisch. Eine Weiterentwicklung erfolgte im Jahr 1999 mit der Einführung faserverstärkter zylindrokonischer Konfektionsstifte, die eine zweifache Konizität besaßen. Durch eine breit angelegte radiologische Untersuchung, in der nach verschiedenen Techniken aufbereitete Wurzelkanalanatomien studiert wurden, erschien eine Stiftform mit einem Doppelkonus als vorteilhaft, um der Kanalgeometrie gerecht zu werden und eine substanzschonende Stiftbettpräparation zu ermöglichen [Shadman *et al.* 1998; Petrova 1999; Boudrias *et al.* 2001]. Der Durchmesser der Double-Taper-Stifte (DT-Stifte) ist auf Wurzelhöhe relativ dünn und ermöglicht eine gute Biegsamkeit. Oberhalb des Kanaleinganges ist der Durchmesser größer und bietet hier eine höhere Festigkeit sowie eine größere Adhäsionsfläche für den plastischen Aufbau [Baldissara 2002].

2.3.3 Präparation der Stiftbettkavität

1982 fassten Shillingburg und Kessler Anforderungen an Zahnwurzel dimensionen und Maße des Stift-Stumpf-Aufbaus zusammen [Shillingburg und Kessler 1982a; Shillingburg *et al.* 1982b]. Vielfach fanden diese Darstellungen, die sich auf konventionell zementierte Metallstifte bezogen, in verschiedenen Artikeln Erwähnung. Für die Präparationstiefe der Stiftbettkavität sind zwei Drittel der Zahnwurzellänge vorgeschlagen worden [Stockton 1999]. Längere Metallstifte zeigten eine gleichmäßigere Verteilung der Kaukräfte entlang der Zahnwurzel, sodass die empfohlenen Insertionstiefen neben der besseren Retention auch der Frakturprophylaxe dienen sollten [Standlee *et al.* 1972; Davy *et al.* 1981]. Zur

ausreichenden Abdichtung des apikalen Anteils der Wurzel wurden 3 mm [Kvist *et al.* 1989], oder sogar 4–6 mm [Peroz *et al.* 2005] Restwurzelfüllung gefordert. Das Eindringen von Flüssigkeiten und Bakterien (apikales Mikroleakage) aufgrund von Undichtigkeiten in der Wurzelfüllung sollte dadurch auf ein Minimum reduziert werden [Abramovitz *et al.* 2001]. Des Weiteren wurde ein optimaler Stiftdurchmesser von einem Drittel des Wurzeldurchmessers postuliert [Stern und Hirshfeld 1973].

Faserstifte werden adhäsiv im Wurzelkanal verankert. Außerdem weisen sie im Vergleich zu Metallstiften ein anderes elastisches Verhalten auf. Mit der Anwendung der Adhäsivtechnik wird die geringere Retention kurzer Konfektionsstifte kompensiert und dadurch eine verringerte Insertionstiefe ermöglicht [Nissan *et al.* 2001]. Gleichzeitig fällt jedoch die Frakturresistenz des Stift-Stumpf-Aufbaus ab [Buettel *et al.* 2009; Giovani *et al.* 2009]. Die Länge eines Faserstiftes sollte daher mindestens der Höhe der klinischen Krone entsprechen [Adanir und Belli 2008]. Dabei wird es als ausreichend angesehen, die Hälfte der Wurzellänge zu erreichen [Buettel *et al.* 2009; Bitter *et al.* 2010]. Der Zahnhartsubstanzabtrag während der Stiftbettpräparation, der in diversen Studien aufgrund der Frakturgefahr des devitalen Zahnes kritisch bewertet wird [Katz *et al.* 2006; Pilo *et al.* 2008], kann somit reduziert werden.

Auch die Forderung nach dem Erhalt einer bestimmten Wurzelkanalfüllungslänge ist bei der Verwendung von faserverstärkten Kompositstiften kritisch zu hinterfragen. Es wird vermutet, dass die adhäsive Befestigung ein apikales Leakage kompensieren kann [Wu *et al.* 1998]. Des Weiteren muss durch die Chairside-Behandlung die präparierte Stiftbettkavität nicht mehr provisorisch versorgt werden. Der Nachteil von provisorischen Stiftkronen liegt darin, dass sie eine Reinfektion des Wurzelkanals von koronal ermöglichen [Fox und Gutteridge 1997]. Ein sofortiger bakteriendichter Verschluss des Kanalsystems unter Anwendung der Adhäsivtechnik ist nach einer erfolgten Wurzelkanalbehandlung von enormer Wichtigkeit. Koronales Leakage wird als der Hauptgrund für das Versagen einer endodontischen Therapie angesehen [Saunders und Saunders 1994]. Wird eine Wurzelfüllung direkt dem Mundhöhlenmilieu ausgesetzt, ist sie nach 13–37 Tagen vollständig mit Bakterien und Endotoxinen rekontaminiert [Carratu *et al.* 2002].

Nach heutiger Auffassung sollte die Stiftbettpräparation direkt im Anschluss an die Obturation des Wurzelkanals erfolgen [Ricketts *et al.* 2005; Bitter *et al.* 2010]. Als Vorteile dieses Vorgehens werden nicht nur ein geringeres koronales [Fan *et al.* 1999] und apikales Leakage [Karapanou *et al.* 1996], sondern auch eine bessere Vertrautheit des Behandlers mit der Kanalanatomie und leichtere Entfernung des Wurzelfüllmaterials angegeben [Ricketts *et al.* 2005]. Erfolgt die Obturation des Wurzelkanals mit einer thermoplastischen Füllmethode (vertikale Kondensation),

besteht die Möglichkeit, nur den apikalen Kanalabschnitt abzufüllen und in derselben Behandlungssitzung die Stiftinsertion vorzunehmen. Bei diesem Vorgehen kann auf eine Stiftbettpräparation eventuell ganz verzichtet werden [Bitter *et al.* 2010]. Der Stiftdurchmesser sollte so klein wie möglich gewählt werden, um den Zahnhartsubstanzabtrag bei der Stiftbettpräparation zu reduzieren [Robbins 1990; Cheung 2005] oder mit der thermischen Guttaperchaentfernung gar völlig zu vermeiden [Ricketts *et al.* 2005].

Die mechanische Entfernung der Wurzelfüllung wird zwar am häufigsten angewendet, kann jedoch die Zahnhartsubstanz massiv schädigen [Kuttler *et al.* 2004; Ricketts *et al.* 2005]. Um diese Gefahr zu reduzieren, werden rotierende Instrumente mit einem nicht schneidenden Ende wie z.B. die Gates-Glidden-Bohrer oder Peeso-Reamer empfohlen [Khatavkar und Hegde 2010]. Darüber hinaus kann eine substanzschonende Präparation der Stiftbettkavität auch mit überlangen Rosenbohrern erfolgen [Krastl 2007; Krastl *et al.* 2008; Bitter *et al.* 2010]. Die gebräuchlichste Methode ist wohl die Stiftbettpräparation mit normierten Vorbohrersystemen. Mit diesem Vorgehen lässt sich jedoch nur schwer ein minimal-invasiver Zahnhartsubstanzabtrag erzielen. Bei der mechanischen Guttaperchaentfernung sollte generell auf eine ausreichende Wasserkühlung geachtet werden, um nicht die Zellen des parodontalen Ligamentes zu schädigen [Saunders und Saunders 1989; Lipski *et al.* 2010].

2.4 Reinigung der Stiftbettkavität

Die Oberfläche von Wurzelkanälen ist nach der mechanischen Aufbereitung mit einer zwischen 0,5–2 µm breiten endodontischen Schmierschicht (*endodontic smear layer*) bedeckt. Diese besteht aus Zell- und Zahnhartgewebetrümmern, die u. a. Fragmente von Odontoblastenfortsätzen und Mikroorganismen sowie Reste des Pulpagewebes enthalten [Pashley 1992]. Zusätzlich finden sich in den Dentintubuli bis zu einer Tiefe von 40 µm hineingepresste Schmierpfropfen (*smear plugs*) [McComb und Smith 1975; Pashley 1992].

Die Stiftbettpräparation kann zu einer sekundären, dickeren Schmierschicht führen, die zusätzlich zu den Überresten der Kanalaufbereitung auch Sealer- und Guttapercharesten enthält [Serafino *et al.* 2004; Goracci *et al.* 2005c]. Man vermutet, dass sowohl die Dicke dieser Schmierschicht [Goracci *et al.* 2005c] als auch die Beimischung von Wurzelfüllmaterialrückständen zu dieser [Breschi *et al.* 2009] sich auf die Effektivität adhäsiver Befestigungsmaterialien auswirken. Gu *et al.* zeigten, dass nach der Entfernung des *smear layer* selbstkonditionierende Befestigungssysteme bessere Haftwerte im Wurzelkanal erreichen können [Gu *et al.* 2009]. Selbst bei Anwendung der Etch-and-Rinse-Adhäsivsysteme kann durch das Ätzen mit einer

Phosphorsäure nicht der gesamte Smear layer von den Wurzelkanalwänden entfernt werden [Serafino *et al.* 2004]. Des Weiteren verbleiben Überreste von der Kanalaufbereitung und -konditionierung [Serafino *et al.* 2004] sowie Sealer- und Guttapercharückstände in der Stiftbettkavität [Perdigao *et al.* 2007], die den adhäsiven Verbund zum Dentin beeinträchtigen [Demiryurek *et al.* 2010]. Saubere Kavitätenwände stellen aber eine wichtige Voraussetzung für die Schaffung einer optimalen Wurzelstiftretention bei der Zementierung mit Befestigungskompositen dar [Boone *et al.* 2001]. Die Kombination von Ethylendiamintetraacetat(EDTA)-Spülungen mit einer Ultraschallanwendung könnte eine effektive Reinigung gewährleisten [Serafino *et al.* 2006; Zhang *et al.* 2008]. Zur Säuberung der Stiftbettkavität wurden außerdem die Anwendung von rotierenden Wurzelkanalbürstchen mit feuchtem Bimsmehl [Kraßl 2007; Kraßl *et al.* 2008; Bitter *et al.* 2010] und das Abstrahlen mit Aluminiumoxid [Zappini und Seitner 2005; Kianusch 2009; Etienne und Schoeffler 2010] vorgestellt. Die Effektivität dieser Reinigungsmethoden ist für die Anwendung im Wurzelkanal zum jetzigen Zeitpunkt nur unzureichend untersucht worden.

2.5 Adhäsive Befestigung faserverstärkter Wurzelkanalstifte

Mit der adhäsiven Befestigung faserverstärkter Wurzelkanalstifte wird das Ziel verfolgt, eine funktionelle Einheit aus Wurzelkanaldentin, Befestigungskomposit und Faserstift zu erreichen, die nach Tay und Pashley als sekundärer Monoblock bezeichnet wird. Die Unterscheidung der insgesamt drei Monoblocksysteme erfolgt nach Anzahl der adhäsiven Grenzflächen. Neben den dentinähnlichen E-Moduln der Materialien rückt die Qualität des Verbundes zwischen Dentin und Befestigungskomposit sowie Befestigungskomposit und Stift in den Vordergrund [Tay und Pashley 2007]. An diesen Grenzflächen konzentrieren sich bei Belastungen des Monoblocks wegen der Biegsamkeit faserverstärkter Kompositstifte die einwirkenden Kräfte [Pegoretti *et al.* 2002].

In diversen Studien konnte gezeigt werden, dass mit der adhäsiven Befestigung von Wurzelstiften im Vergleich zur konventionellen Zementierung (mit Zinkoxid-Phosphat- oder Glasionomierzement) weniger Undichtigkeiten [Bachicha *et al.* 1998], eine höhere Frakturstabilität [Paul und Schärer 1996; Naumann *et al.* 2008b] und größere Retentionswerte [Mendoza und Eakle 1994; Utter *et al.* 1997; Duncan und Pameijer 1998] erzielt werden können.

2.5.1 Die Befestigungskomposite

Befestigungskomposite sind in ihrer Zusammensetzung mit den Füllungskompositen vergleichbar [Eichner und Kappert 2000]. Anhand des Aushärtungsmodus lassen sich lichthärtende, dunkelhärtende und dualhärtende Systeme unterscheiden [Blunck 2009]. Lichthärtende Komposite besitzen Photoinitiatoren, die durch Halogenlicht im Wellenlängenbereich von 400–480 nm aktiviert werden. Da die Faserstifte sich untereinander in ihrer Lichtleitfähigkeit sehr unterscheiden, kann die Aushärtung solcher Befestigungskomposite in den apikalen Bereichen nicht garantiert werden [Zappini und Seitner 2005; Goracci *et al.* 2008]. Bei dunkelhärtenden Kompositen beginnt die Polymerisation durch die Vermischung zweier Komponenten, von denen die eine den Initiator (Benzoylperoxid) und die andere den Akzelerator (tertiäres Amin) enthält. Dualhärtende Befestigungskomposite enthalten Photoinitiatoren und chemisch aktivierbare Initiatoren, wobei sie auch ohne Lichtzufuhr vollständig aushärten [Blunck 2009]. Bei zusätzlicher Lichthärtung zeigen diese Zemente jedoch im Vergleich zur alleinigen chemisch aktivierten Polymerisation höhere Haftwerte [Piwowarczyk *et al.* 2007].

2.5.2 Die Polymerisationsschrumpfung

Das Hauptproblem der Komposite ist die Polymerisationskontraktion. Diese konnte durch Variationen in der Zusammensetzung der organischen Matrix [Ellakwa *et al.* 2007] sowie durch Veränderungen in der Füllstoffphase verringert [Kleverlaan und Feilzer 2005], aber nicht beseitigt werden [Giachetti *et al.* 2006]. Bei modernen Kompositen beträgt das Schrumpfungsvolumen 0,2–4,7 Volumenprozent [Walter *et al.* 2009].

Beim Polymerisationsbeginn ist das Material noch in der Lage die eintretende Kontraktionsspannungen durch innere Fließvorgänge auszugleichen. Das Polymer befindet sich hier in einem Prä-Gel-Zustand. Als Gel-Punkt wird der Moment definiert, an dem der Kunststoff nicht mehr nachfließen kann. Bei voranschreitender Polymerisation entsteht in der nachfolgenden Post-Gel-Phase eine Stresssituation für den Zahn-Komposit-Verbund, in der es u. a. zu Randspaltbildungen kommen kann [Davidson *et al.* 1984]. Wichtig hierbei ist, dass die Zahnstrukturen nachgiebig sind [Suliman *et al.* 1994] und das Komposit nicht zu starr ist, um die Volumenverringerung auszugleichen [Feilzer *et al.* 1990]. Außerdem ist das Fließverhalten bei der Photopolymerisation ungünstiger als bei chemischer Härtung zu bewerten, was zu einem erhöhten Schrumpfstress führt [Kemp-Scholte und Davidson 1990; Feilzer *et al.* 1993]. Dies sollte bei der Auswahl des Befestigungskomposites Berücksichtigung finden.

2.5.3 Der Konfigurationsfaktor (C-Faktor) und die Zementfugenbreite

Der C-Faktor ist als Quotient aus gebundener zu freier Oberfläche definiert. Unter einer gebundenen Oberfläche versteht man die adhäsiv vorbehandelte Zahnhartsubstanzfläche, unter der ungebundenen Oberfläche im Regelfall die Grenzfläche zur Luft. Es besteht eine Beziehung zwischen der Spannungsentwicklung an den Kavitätswänden und dem C-Faktor [Nikolaenko *et al.* 2004]: Je kleiner der Konfigurationsfaktor, desto geringer sind die auftretenden Kontraktionsspannungen [Davidson *et al.* 1984; Feilzer *et al.* 1987], weil mehr ungebundene Oberfläche während der Prä-Gel-Phase zum Nachfließen des Komposites zur Verfügung steht [Feilzer *et al.* 1987]. Darüber hinaus sind Polymerisationsspannungen auch von der Zementfugenbreite abhängig. Dünnere Fugen zeigen einen größeren Anteil an gebundener Oberfläche und erzeugen somit größere Spannungen [Alster *et al.* 1997; Tay *et al.* 2005].

Feilzer *et al.* sowie Bouillaguet *et al.* berichteten über einen extrem hohen C-Faktor im Wurzelkanal [Feilzer *et al.* 1987; Bouillaguet *et al.* 2003]. Auch eine aktuellere Untersuchung kam zu dem gleichen Ergebnis [Tay *et al.* 2005]. Es ist also zu befürchten, dass das Nachfließen des Materials während der Abbindephase von den ungebundenen Flächen nur schwer möglich ist und der dadurch auf Zahnhartsubstanzen erzeugte Zugstress zum Ablösen des Komposites von den Wurzelkanalwänden führen könnte. Erst ab einer Erhöhung der Schichtstärke bis zu 500 µm sinkt der C-Faktor laut Berechnungen relevant ab, wobei jedoch gleichzeitig die Volumenkontraktion zunimmt und somit der Schrumpfstress (S-Faktor) steigt. Entscheidend in diesem Zusammenhang ist jedoch der Einfluss des Konfigurationsfaktors, denn dieser übertrifft die Auswirkungen der Volumenkontraktion [Tay *et al.* 2005]. In diversen Untersuchungen findet man tatsächlich regelmäßige Spaltbildungen in der Verbundzone zwischen Komposit und Wurzelkanalentin [Pirani *et al.* 2005; Tay *et al.* 2005]. Des Weiteren verursachen konventionelle Applikationsmethoden eine Vielzahl von Hohlräumen innerhalb der Zementfuge. Spezielle Applikationshilfen für den Wurzelkanal erleichtern eine homogene Verteilung des Befestigungskomposites [Watzke *et al.* 2008]. Eine Autorengruppe stellte jedoch die Vermutung an, dass die in den Kompositfugen vorhandenen Blasen zusätzliche ungebundene Flächen zum Nachfließen des Materials während der Polymerisation zur Verfügung stellen und damit einer Randspaltbildung entgegenwirken [Perdigao *et al.* 2007].

Der Einfluss der Zementfugenbreite auf die Haftkraft faserverstärkter Wurzelkanalstifte wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Die Ergebnisse variieren in Abhängigkeit vom Studiendesign [Perdigao *et al.* 2007; Schmage *et al.* 2009a]. Ein

Zusammenhang zwischen der Frakturstabilität des Faserstift-Stumpf-Aufbaus und der Dicke der Kompositfuge scheint nicht zu bestehen [Buettel *et al.* 2009]. Darüber hinaus konnte in einer Finite-Element-Analyse nur ein geringer Einfluss der Zementfugenbreite auf die Spannungsverteilung in der Zahnwurzel gezeigt werden [Santos *et al.* 2009].

2.5.4 Die Adhäsivsysteme

Die Adhäsivtechnik ist eine Klebetechnik zur Verankerung des Komposites an der Zahnhartsubstanz. Die Haftung des hydrophoben Kunststoffes am hydrophilen Dentin ist nicht leicht zu realisieren [Hellwig *et al.* 2006]. Zusätzlich muss der Smear layer, der mit einer geringen Kraft von ca. 2–6 MPa am Dentin haftet, überwunden werden.

Adhäsivsysteme der Etch-and-Rinse-Technik arbeiten mit Säuren, die bei der Dentinkonditionierung die Schmierschicht auflösen und eine demineralisierte Oberfläche im Dentin hinterlassen [Van Meerbeek 1997]. Dabei wird das peritubuläre Dentin stärker demineralisiert, weil es einen höheren Mineralisationsgrad aufweist als das intertubuläre Dentin [Schröder 1992]. Die Tubulieingänge werden trichterförmig eröffnet [Van Meerbeek *et al.* 1992]. Im inter- und peritubulären Dentin entstehen durch herausgelöste Hydroxylapatitkristalle Hohlräume, in denen sich freigelegte Kollagenfasern befinden [Pashley *et al.* 1993]. Es wird eine Demineralisationstiefe von 10–30 µm erreicht, wobei diese stark von der Ätzdauer, der Säureart und ihrer Konzentration abhängig ist [Uno und Finger 1996]. Für die Konditionierung des Wurzelkanals erwies sich eine 32%ige Phosphorsäure als sehr effektiv [Ferrari *et al.* 2000a]. Nach der Applikation eines Adhäsivs bildet sich eine Mischzone aus Kunststoff und demineralisierter Kollagenstruktur, die als Hybridschicht (*hybrid layer*) bezeichnet wird. Daneben entstehen durch die Penetration des Bondings in die Dentinkanälchen Kunststoffzapfen, die sogenannten Tags [Nakabayashi *et al.* 1982]. Für die Haftung eines Komposites am koronalen Dentin wird vor allem die Hybridschicht verantwortlich gemacht [Nakabayashi *et al.* 1991].

Zur adhäsiven Befestigung der Wurzelstifte stehen neben den phosphorsäurekonditionierenden auch selbstkonditionierende Systeme zur Verfügung, wobei selbstkonditionierende Systeme in selbstadhäsive Befestigungszemente und solche, bei denen ein selbstkonditionierender Primer vorher angewendet wird, unterteilt werden [Bitter *et al.* 2010]. Selbstadhäsive Zemente besitzen saure Monomere, die zuerst die Zahnhartsubstanz konditionieren und anschließend in der Abbindereaktion mit den basischen Füllkörpern reagieren, wobei langzeitstabile Salze gebildet werden. Zu Beginn des Abbindeprozesses wird Wasser frei, wodurch eine gewisse Feuchtigkeitstoleranz entstehen soll. Diese kann dem selbstadhäsiven Zement zu einer besseren Adaptation an der Dentinoberfläche verhelfen. Die Haftung solcher Befestigungszemente beruht auf mikromechanischer Retention und chemischer

Interaktion zwischen den sauren Gruppen der Monomere und dem Hydroxylapatit [Radovic *et al.* 2008b]. Eine Konditionierung der Dentinoberfläche mit Phosphorsäure vor der Zementapplikation verschlechtert die Haftung [Hikita *et al.* 2007].

2.5.5 Die Adhäsivtechnik im Wurzelkanal

Die Bedingungen für die Anwendung der Adhäsivtechnik im Wurzelkanal sind sehr ungünstig. Die techniksensitive Applikation der Adhäsivsysteme [Van Meerbeek *et al.* 2005] und die Kontrolle der Feuchtigkeit [Chersoni *et al.* 2005] sind aufgrund der eingeschränkten Sicht in Wurzelkanälen erschwert. Verbliebenes Wasser im Wurzelkanal kann die Adhäsivschicht durchdringen und sich in Form von Tröpfchen an den gebondeten Kanalwänden darstellen. Solche Wassereinschlüsse zwischen dem Komposit und Adhäsiv könnten Auslöser für Risse in der Verbundschicht sein [Tay und Pashley 2007]. Hinzu kommen die Verunreinigungen der Stiftbettkavität durch Wurzelfüllmaterialien [Perdigao *et al.* 2007] und medikamentöse Einlagen [Lambrianidis *et al.* 1999], Beeinflussung des adhäsiven Verbundes durch Anwendung endodontischer Spüllösungen während der Wurzelkanalbehandlung [Morris *et al.* 2001; Ozturk und Ozer 2004] und der hohe C-Faktor im Wurzelkanal [Tay *et al.* 2005]. Des Weiteren weist das Wurzelkanaldentin Besonderheiten in der Anatomie auf, die Einfluss auf die Haftkraft von adhäsiven Befestigungsmaterialien nehmen können. Im apikalen Drittel des Wurzelkanals befinden sich irreguläres Sekundärdentin, Pulpasteine und zementähnliches Gewebe, die die Penetrationsfähigkeit und damit die Haftung von Dentinadhäsiven verringern können [Mjör *et al.* 2001]. In Pulpanähe nehmen die Dentintubuli 45–80 %, in der Peripherie 1–4 % der Gesamtquerschnittsfläche des Dentins ein [Pashley 1991]. Apikalwärts ist außerdem eine Verringerung der Dentintubulidichte zu beobachten [Mjör und Nordahl 1996]. Zusätzlich nimmt der Tubulidurchmesser ab [Camargo *et al.* 2007].

In-vitro-Versuche zu Haftwerten von adhäsiven Befestigungsmaterialien am Dentin in verschiedenen Wurzelkanalregionen zeigen kontroverse Ergebnisse [Gaston *et al.* 2001; Mannocci *et al.* 2004; Kalkan *et al.* 2006; Perdigao *et al.* 2007]. Darüber hinaus liegen die Haftwerte zum Wurzelkanaldentin unter denen, die am koronalen Dentin erzielt werden können [Goracci *et al.* 2004; Goracci *et al.* 2005c; Zicari *et al.* 2008]. Pirani *et al.* konnten mit rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen viele Spalten in der Hybridschicht darstellen. Deshalb wurde vermutet, dass die Hybridschicht nur einen geringen Beitrag zur Haftung am Wurzelkanaldentin leistet [Pirani *et al.* 2005]. Diese und andere Studienergebnisse weisen darauf hin, dass vorrangig die Haftreibung und Friktion an der Wurzelstiftretention beteiligt sein könnten [Pirani *et al.* 2005; Goracci

et al. 2005a; Cury *et al.* 2006]. Das Prinzip des Haftmechanismus im Wurzelkanal scheint somit noch unzureichend geklärt zu sein.

Unklar ist auch, ob selbstkonditionierende Befestigungssysteme in der Haftung am Wurzelkollagen den Etch-and-Rinse-Systemen unterlegen sind, so wie das in einer Untersuchung von Goracci *et al.* festgestellt worden ist [Goracci *et al.* 2005c]. Einige In-vitro-Versuche zeigen aber für Systeme mit einem selbstkonditionierenden Primer [Zicari *et al.* 2008] sowie für das selbstadhäsive Befestigungszement RelyX Unicem (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) höhere Haftwerte bei Ausstoßversuchen (Push-out-Versuche) als für Vertreter der Etch-and-Rinse-Systeme [Bitter *et al.* 2006a; Bitter *et al.* 2008b; Bitter *et al.* 2009c]. Somit ist es fraglich, ob die Entfernung des Smear layers durch die Phosphorsäureätzung grundsätzlich eine bessere Haftkraft ergibt. Trotz dieser guten Ergebnisse in den Push-out-Tests zeigen konfokalmikroskopische Untersuchungen für selbstadhäsive Befestigungskomposite lediglich eine sporadische Ausbildung der Hybridschicht und nur vereinzelte Kunststoffzapfen [Bitter *et al.* 2009c]. Es wird ein stärkerer Einfluss der chemischen Interaktionen zwischen Hydroxylapatit und dem selbstadhäsiven Zement angenommen [Piwowarczyk *et al.* 2005; Bitter *et al.* 2009c]. Auch die gute Feuchtigkeitstoleranz des Zementes könnte die höheren Haftwerte erklären [Chersoni *et al.* 2004; Bitter *et al.* 2006a]. Darüber hinaus beobachteten Chersoni *et al.* einen vermehrten Flüssigkeitsaustritt nach der Applikation von hydrophilen Etch-and-Rinse-Adhäsivsystemen [Chersoni *et al.* 2005], der den Verbund zum Wurzelkanalkollagen beeinträchtigen könnte.

Eine langfristige Stabilität der Hybridschicht im Wurzelkanal kann zur Zeit nicht garantiert werden. In der Literatur sind Beobachtungen über eine Veränderung der Kollagenstruktur im Wurzelkanal bei endodontisch behandelten Zähnen, die mit konventionell zementierten metallischen Wurzelkanalstiften versorgt worden waren, beschrieben [Ferrari *et al.* 2004]. Die Degradation des Kollagengeflechtes wird vermutlich durch die proteolytische Aktivität von *host-derived* Matrix-Metalloproteinasen (MMPs) ausgelöst [Ferrari *et al.* 2004; Pashley *et al.* 2004], deren Aktivierung durch die Applikation von milden selbstätzenden Adhäsiven erfolgen könnte [Tay *et al.* 2006]. Für das koronale Dentin ist eine Aktivierung dieser Enzyme auch durch einfache Etch-and-Rinse-Adhäsive gezeigt worden [Mazzoni *et al.* 2006].

2.5.6 Der Verbund zur Stiftoberfläche

Faserverstärkte Kompositstifte weisen eine aufgeraute, mikroretentive Oberfläche auf, die der mikromechanischen Haftung am Befestigungskomposit dient. Darüber hinaus enthält die Kompositmatrix der Stifte freie aminische Radikale, die einen chemischen Verbund zum Bisphenol A-Glycidyl-Methacrylat (Bis-GMA) des

Befestigungskomposites herstellen können [MalFerrari und Monaco 2002]. Aufgrund des hohen Vernetzungsgrades der Polymermatrix ist die Anzahl solcher offener Doppelbindungen jedoch sehr gering [Mannocci *et al.* 2005] und die Penetrationsfähigkeit des applizierten Adhäsivsystems behindert [Bell *et al.* 2004]. Einige Laboruntersuchungen zeigen in Abhängigkeit vom verwendeten Befestigungssystem vermehrt Versagen des Verbundes zwischen Stiftoberfläche und Befestigungsmaterial bei Belastung der Stift-Zement-Dentin-Einheit [Drummond 2000; Bell *et al.* 2005; Perdigao *et al.* 2006; Bitter *et al.* 2006a], wodurch der Langzeiterfolg der postendodontischen Versorgung gefährdet werden könnte. In Finite-Element-Analysen ist das Risiko der Dezementierung des Faserstiftes in der Stift-Zement-Verbundzone am größten, weil hier die höchsten Zug- und Scherspannungen gefunden werden [De Santis *et al.* 2000; Santos *et al.* 2010]. Um den Haftverbund zwischen Faserstift und Befestigungsmaterial zu steigern, wurde u. a. die Silanisierung der Stiftoberfläche vorgeschlagen [Goracci *et al.* 2005b; Monticelli *et al.* 2008b]. Untersuchungen zur Haftung nach Silanapplikation zeigten widersprüchliche Ergebnisse [Goracci *et al.* 2005b; Perdigao *et al.* 2006; Bitter *et al.* 2006b; Bitter *et al.* 2007b; Bitter *et al.* 2008a]. Eine Anlösung der Stiftoberfläche mit chemischen Vorbehandlungen vor der Silanapplikation konnte hingegen eindeutig zu einer Haftwertsteigerung beitragen [Vano *et al.* 2006]. Die Wirkungsweise der Silanisierung wird in der Erhöhung der Benetzbarkeit der Faserstifte vermutet [Bitter *et al.* 2010]. Ein chemischer Verbund zum Befestigungskomposit kann mittels eines 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilans (MPS) nur an Stellen der Stiftoberfläche erreicht werden, wo exponierte Fasern oder Füllkörper vorzufinden sind [Matinlinna *et al.* 2004]. Es befinden sich bereits vorkonditionierte Faserstifte auf dem Markt, die eine industriell hergestellte Silikat- und Silanbeschichtung aufweisen. Edelhoff *et al.* konnten in Auszugsversuchen (Pull-out-Tests) höhere Haftwerte für Stifte mit solcher Beschichtung gegenüber einer Vorbehandlung mit einem All-in-one-Adhäsiv ermitteln [Edelhoff *et al.* 2006]. Unbeschichtete Faserstifte mit Retentionsrillen zeigen in Pull-out-Tests wiederum höhere Retentionswerte als herstellerseits vorkonditionierte Wurzelstifte [Eisenburger 2008; Babenhauserheide *et al.* 2009]. Die klinische Relevanz der in den Laboruntersuchungen gemessenen erhöhten Haftwerte erscheint jedoch zum jetzigen Zeitpunkt fraglich [Bitter *et al.* 2010].

2.6 Klinische Evaluation faserverstärkter Wurzelkanalstifte

Aus einer Übersichtsarbeit von Bolla *et al.* geht hervor, dass die Anzahl prospektiv, randomisiert und kontrolliert angelegter Studien (*Randomized Controlled Trial* RCT) zur klinischen Evaluation von Faserstiften bislang noch unzureichend ist [Bolla *et al.* 2007].

Zur Zeit existiert nur ein RCT mit einem Beobachtungszeitraum von vier Jahren, in dem wurzelkanalbehandelte Zähne, die mit einem Faserstift versorgt wurden, bessere Überlebensraten zeigen als solche, die mit einem metallischen Stifftaufbau rekonstruiert worden sind [Ferrari *et al.* 2000b]. Im aktuellen RCT von Zicari *et al.* mit einem Beobachtungszeitraum von drei Jahren konnte hingegen kein Unterschied zwischen den Misserfolgsraten postendodontischer Versorgungen mit Faserstiften und metallischen Stifftaufbauten festgestellt werden [Zicari *et al.* 2011]. In einem weiteren RCT aus dem Jahre 2009 wurde die Auswirkung von Faserstiftinsertionen auf die Versagensraten von Zähnen mit unterschiedlichem Zerstörungsgrad untersucht. Nur bei Zähnen, die keine koronale Wand mehr aufwiesen, konnte durch einen Stifteinsatz die Versagensquote signifikant verringert werden. Der Untersuchungszeitraum der Studie beträgt jedoch nur 32 Monate [Bitter *et al.* 2009a]. Cagidiaco *et al.* untersuchten in ihrem RCT über drei Jahre dieselbe Fragestellung – jedoch ausschließlich an Prämolaren. Hier zeigten Zähne ohne eingesetzten Wurzelstift eine deutlich höhere Misserfolgsrate (37 %) im Vergleich zu solchen, die mit einem Faserstift restauriert wurden (9 %). Der koronale Zahnhartsubstanzverlust beeinflusste signifikant den Misserfolg [Cagidiaco *et al.* 2008a].

Bei Durchsicht der klinischen Studien über die Versorgung endodontisch behandelter Zähne mit Faserstiften fällt auf, dass die Misserfolgsraten stark variieren: von 1,7 % nach 30 Monaten [Malferrari *et al.* 2003] bis zu 40 % nach 87 Monaten [King *et al.* 2003]. Die Ursachen für hohe Versagensraten in einigen Studien sind verschieden und nicht immer eindeutig erkennbar. King *et al.* untersuchten lediglich zehn Faserstifte, von denen vier versagten. Des Weiteren finden sich keine Angaben über den Zerstörungsgrad der versorgten oberen Schneidezähne [King *et al.* 2003]. Generell weisen die Oberkiefer-Inzisivi, im Vergleich zu einem anderen Zahntyp, die höchsten Versagensraten auf [Naumann *et al.* 2008a; Mancebo *et al.* 2010]. In der retrospektiven Studie von Segerstrom *et al.* mit einer Misserfolgsrate von 32,2 % konnten nur 25 von 99 Patienten im Zeitraum von 6,7 Jahren nachuntersucht werden. Die Informationen über die restlichen Probanden wurden den Akteneinträgen von unterschiedlichen Behandlern entnommen. Eine Kontrollgruppe mit Metallstiften fehlte genauso wie Angaben zum Zerstörungsgrad der behandelten Zähne [Segerstrom *et al.* 2006]. Gleiches trifft auch für eine prospektive Studie von Naumann *et al.* zu mit einem Beobachtungszeitraum von fünf Jahren, in der 32,5 % der Zähne versagten. Weiterhin hatten 59 % der Zähne dieser Studie weniger als zwei Approximalkontakte und 42 % waren obere, vielfach stark zerstörte Schneidezähne; beides Risikofaktoren für den Langzeiterfolg postendodontischer Versorgungen [Naumann *et al.* 2008a]. Eine prospektive randomisierte Studie von Monticelli *et al.*, in der 225 Prämolaren mit drei unterschiedlichen Faserstiften und Vollkeramikronen restauriert wurden, zeigt

hingegen eine deutlich bessere Misserfolgsrate von 6,2 %. Auffällig ist hier, dass keine Zähne mit einem Zahnhartsubstanzverlust bis zum Gingivaniveau einbezogen worden sind [Monticelli *et al.* 2003]. In einer retrospektiven Studie von Ferrari *et al.* ergaben sich nach sieben bis elf Jahren Misserfolgsraten von 8 %. Sowohl der Untersuchungszeitraum als auch die Faserstiftanzahl (985 Stifte) der Studie sind vergleichsweise groß, jedoch fehlen Angaben zur Ausdehnung des koronalen Zahnhartsubstanzverlustes. Interessanterweise versagte der größte Teil der postendodontischen Versorgungen in dieser Untersuchung durch eine misslungene endodontische Therapie [Ferrari *et al.* 2007a]. Im Gegensatz dazu sind in anderen Studien Faserstiftfrakturen [Naumann *et al.* 2005a; Naumann *et al.* 2008a] und Stiftdezementierungen [Fredriksson *et al.* 1998; Ferrari *et al.* 2000b; Ferrari *et al.* 2000c; Ferrari *et al.* 2007a] die häufigsten Misserfolge, wobei sehr oft eine erneute Versorgung der betroffenen Zähne möglich war [Cagidiaco *et al.* 2008b].

3 Ziel der Arbeit und Arbeitshypothese

Aus der Übersicht der aktuellen wissenschaftlichen Literatur wird ersichtlich, dass bereits verschiedene, die Faserstiftretention beeinflussende Faktoren identifiziert und untersucht wurden. Der Einfluss von Wurzelfüllmaterialrückständen nach der Stiftbettpräparation sowie der Formkongruenz der Stiftbettkavität auf die Stiftretention ist jedoch gegenwärtig nur unzureichend erforscht. Auch wurde die Überlegenheit von phosphorsäurekonditionierenden Systemen beim Einsatz im Wurzelkanal gegenüber selbstadhäsiven Befestigungszementen in Frage gestellt.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, zum einen den Einfluss der Reinigung der Stiftbettkavität mit feuchtem Bimsmehl und rotierenden Wurzelkanalbürstchen und zum anderen durch das Abstrahlen mit Al_2O_3 -Partikeln auf die Retention faserverstärkter Wurzelkanalstifte zu untersuchen. Dabei sollte die Effektivität der Reinigungsmethoden im Vergleich zur alleinigen Spülung mit einer NaOCl-Lösung festgestellt und ein Zusammenhang zwischen dem Sauberkeitsgrad der Stiftbettkavität und der Haftkraft überprüft werden. Des Weiteren sollte die Auswirkung der Formkongruenz zwischen Faserstift und Stiftbettkavität auf die Wurzelstiftretention untersucht werden. Verglichen worden sind hierbei die konventionelle Stiftbettpräparation mit der gezielten Wurzelfüllmaterialentfernung mittels überlanger Rosenbohrer. Um darüber hinaus den Einfluss der Art des Befestigungssystems auf die Stiftretention zu untersuchen, wurden die Auszugshaftwerte eines selbstadhäsiven Zementes und eines phosphorsäurekonditionierenden Systems miteinander verglichen.

Auf der Basis der ausgewerteten Literatur sind folgende Nullhypothesen aufgestellt worden:

1. Die zu untersuchenden Reinigungsmethoden haben keinen Einfluss auf die Sauberkeit der Kanalwände.
2. Die Präparationsart der Stiftbettkavität hat keinen Einfluss auf die Retentionswerte der Faserstifte.
3. Die Anwendung verschiedener Befestigungssysteme beeinflusst die Retention der Wurzelkanalstifte nicht.

4 Material und Methoden

4.1 Materialien

4.1.1 Das Siftsystem



Abb. 1 Das DT Light Post SL System. Entnommen aus [VDW 2008].

Der *DT Light Post SL* ist ein transluzenter, quarzfaserverstärkter, röntgenopaker Kompositwurzelsstift der Firma VDW, München, Deutschland. Er besitzt mit 15 GPa einen E-Modul, welcher sehr nahe bei dem des Dentins ($E = 18 \text{ GPa}$ [Duret *et al.* 1990a]) liegt und eine Biegefestigkeit von 1600 MPa. Um die Retention zum Befestigungskomposit zu erhöhen, ist die Stiftoberfläche mittels PVD-Beschichtungstechnologie (Physical-Vapour-Deposition) mit Silikat (SiO_4) und Silan (SiH_4) vorkonditioniert. Eine weitere Schicht aus Methylmethacrylat (MMA) bedeckt die Beschichtung und soll so die vorbehandelte Oberfläche schützen. Der *DT Light Post SL* setzt sich zu 75 Gew.-% aus vorgespannten Quarzfasern (Durchmesser: $12 \mu\text{m}$) zusammen, die parallel zur Stift-Längsachse verlaufen und einen Spannungswiderstand von über 3500 MPa aufweisen. Somit wird diesem Wurzelstift die Eigenschaft, größere Belastungen zu absorbieren, zugesprochen. Die Fasern sind in eine Epoxidharzmatrix (25 Gew.-%) eingebettet (Verbundstoff: Silan). Die Wurzelstifte sind in vier verschiedenen Größen erhältlich [VDW 2008].

Das Vorbohrersystem setzt sich aus einem Universalbohrer (DT Universal Drill) und einem Erweiterungsbohrer (DT Finishing Drill) für die jeweilige Stiftgröße zusammen. Sie sind durch Farbmarkierungen den Stiftgrößen zugeordnet (Abb. 1). Der in der Studie verwendete Faserstift besitzt die Größe drei und ist blau markiert. Seine zervikale Konizität beträgt 10 %, die apikale 2 %. Er weist einen Durchmesser von 1,20 mm bei der Länge von 0,6 mm und 2,20 mm ab der Länge von 13,6 mm auf (Abb. 2).

Die Gesamtlänge des Wurzelstiftes beträgt 20 mm. Der zervikale zylindrische Anteil hat eine Länge von 6,4 mm und die Stiftspitze von 0,6 mm (Herstellerangaben).

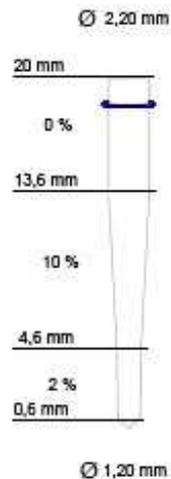


Abb. 2 Abmessungen des DT Light Post SL (Größe 3). Modifiziert nach [VDW 2008].

4.1.2 Die Befestigungsmaterialien

SmartCem2



Abb. 3 SmartCem2 mit aufgesetzter Applikationskanüle. Entnommen aus [Dentsply 2011].

SmartCem2 ist ein aus zwei Komponenten bestehender, dualhärtender selbstadhäsiver Zement der Firma Dentsply, Konstanz, Deutschland (Abb. 3). Aus fünf verfügbaren Farbvarianten wurde für die Versuche die transluzente Farbe gewählt. Die Applikation in den Wurzelkanal kann über eine auf die Doppelkammerspritze aufgesetzte Mischkanüle erfolgen.

CoreX Flow

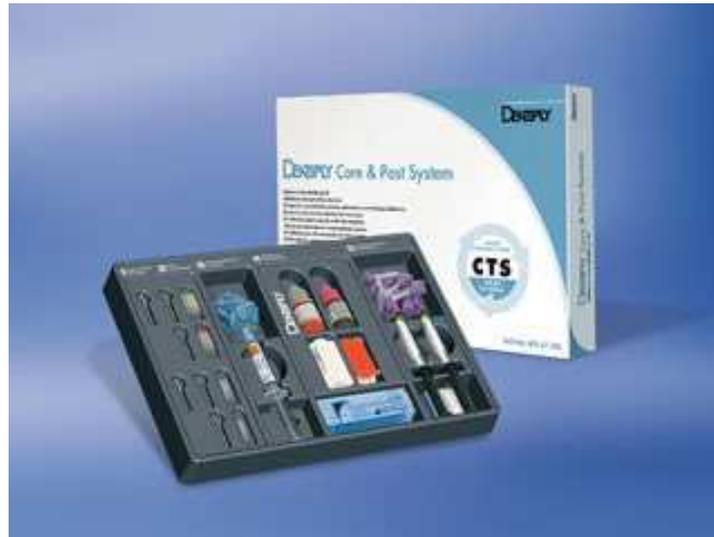


Abb. 4 CoreX Flow mit dem Konditionierungssystem. Entnommen aus [Dentsply 2011].

CoreX Flow ist ein aus zwei Komponenten bestehendes, dualhärtendes, hoch gefülltes (Fülleranteil: 70 Gew.-%) Kompositmaterial der Firma Dentsply (Abb. 4). Es ist sowohl für die Wurzelstiftzementierung als auch für den Stumpfaufbau geeignet. Die Applikation in den Wurzelkanal kann auch hier über eine aufgesetzte Kanüle vorgenommen werden. Vor der Anwendung von CoreX Flow muss ein geeignetes Schmelz- und Dentin-Adhäsiv appliziert werden. Für die Konditionierung des Wurzel dentins werden vom Hersteller De Trey Conditioner 36, XP Bond und der Self-Cure Activator (Dentsply) empfohlen.

De Trey Conditioner 36

De Trey Conditioner 36 ist ein blau gefärbtes Gel mit 36 % Phosphorsäure, das dem Ätzen von Schmelz und der Dentinkonditionierung vor der Adhäsivapplikation dient.

XP Bond und Self-Cure Activator

XP Bond ist ein universeller, selbstprimender Haftvermittler, der mit dem Self-Cure Activator angemischt ein dualhärtendes Adhäsivsystem der Total-Etch-Technik ergibt.

Die genaue Zusammensetzung der Materialien laut Herstellerangaben ist der Tabelle I zu entnehmen.

Tabelle I: Zusammensetzung der Materialien

Produktname	Zusammensetzung
SmartCem2	Urethan-Dimethacrylat, di- und tri-Methacrylate, Phosphorsäure modifizierte Acrylate, Barium-Boron-Fluoroaluminosilikat-Glas, organischer Peroxid Initiator, Campherchinon Fotoinitiator, Phosphenoxid Fotoinitiator, Akzeleratoren, butylierte Hydroxy-Toluene, UV Stabilisatoren, Titandioxid, Eisenoxide, hydrophobes amorphes Silikondioxid
CoreX Flow	Urethan-Dimethacrylat, di- und tri-Methacrylate, Barium-Boron-Fluoroaluminosilikat-Glas, Campherchinon Fotoinitiator, Fotoakzeleratoren, Siliziumdioxid, Benzoyl-Peroxid
De Trey Conditioner 36	Phosphorsäure, hochdisperses Siliziumdioxid, Benetzer, Pigmente, Wasser
XP Bond	Carbonsäure-modifiziertes Dimethacrylat (TCB-Harz), Phosphorsäure modifiziertes Acrylatharz (PENTA), Urethan-Dimethacrylat (UDMA), Triethylenglycol-Dimethacrylat (TEGDMA), 2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA), butyliertes Benzendiol (Stabilisator), Ethyl-4-Dimethylaminobenzoat, Kampferchinon, funktionalisiertes amorphes Siliziumdioxid, t-Butanol
Self-Cure Activator	Urethan-Dimethacrylat (UDMA), Hydroxyethylmethacrylat (HEMA), Katalysator, Photoinitiatoren, Stabilisatoren, Aceton, Wasser

4.1.3 Die Hilfsmaterialien

4.1.3.1 Farbstoffe

Rhodamin B Isothiocyanat

Rhodamin B Isothiocyanat (Sigma Aldrich; Steinheim, Deutschland) ist ein roter Farbstoff, der zum Anfärben des Befestigungskomposites dient. Der Farbstoff wird mit 96%igen Alkohol zu einer 1%igen Lösung angemischt.

Fluoreszein Isothiocyanat

Fluoreszein Isothiocyanat (Sigma Aldrich) ist ein grüner Farbstoff, der zum Anfärben des Adhäsivsystems dient. Mit 96%igen Alkohol wird dieser ebenfalls zu einer 1%igen Lösung zusammengemischt.

4.1.3.2 Sonstige Hilfsmaterialien

Technovit 4071

Technovit 4071 (Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) ist ein schnellhärtender, kaltpolymerisierender Kunststoff auf Basis von MMA in Form von Pulver und Flüssigkeit. Er wurde speziell für Schliff- und Materialeinbettungen entwickelt. Seine Druckfestigkeit beträgt 1920 kg/cm².

Excite

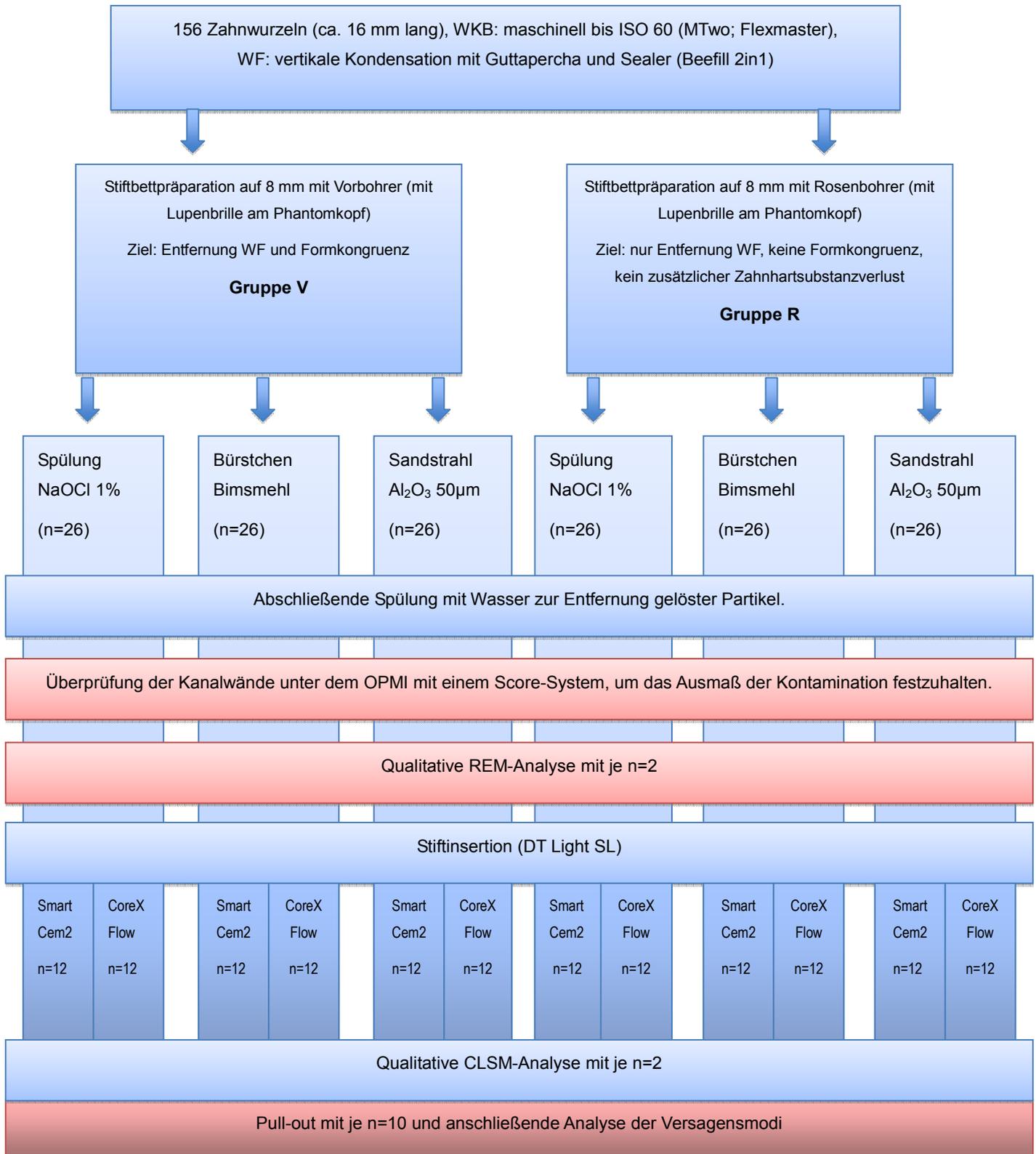
Excite (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) ist ein lichthärtender, selbstprimender Haftvermittler mit extrem feinen Nanofüllern. Die genaue Zusammensetzung ist in der Tabelle II beschrieben.

Tabelle II: Zusammensetzung von Excite

Produktname	Zusammensetzung
Excite	Hydroxyethylmethacrylat, Bis-GMA, Phosphorsäureacrylat, Dimethacrylat, Ethanol, hochdisperses Siliziumdioxid, Katalysatoren, Stabilisatoren

4.2 Methode

4.2.1 Flussdiagramm der Studie



4.2.2 Übersicht

Für die vorliegende In-vitro-Studie wurden insgesamt 156 Eckzähne auf sechs Gruppen (n = 26) aufgeteilt. Nach dem Dekapitieren der Kronen, der Aufbereitung und Füllung der Wurzelkanäle erfolgten am Phantomkopf die Stiftbettpräparationen auf zwei unterschiedliche Arten: In den ersten drei Gruppen fanden die Präparationen mit den Vorbohrern des Stiftsystems statt. Hierbei wurde versucht, eine Formkongruenz zwischen den Stiftbettkavitäten und den konfektionierten Faserstiften herzustellen. In den letzten drei Gruppen erfolgte die Entfernung der Wurzelfüllung mit überlangen Rosenbohrern, ohne einen zusätzlichen Zahnhartsubstanzverlust zu verursachen. Es folgte die Reinigung der präparierten Kavitäten mit drei unterschiedlichen Methoden: Spülung mit Natriumhypochloritlösung (NaOCl 1%ig), Abstrahlen mit 50 µm Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Säuberung mit rotierenden Wurzelkanalbürstchen und feuchtem Bimsmehl. Unter einem OP-Mikroskop wurde der jeweilige Sauberkeitsgrad mit einem Score-System beurteilt. Mit je zwei Zähnen aus jeder Gruppe erfolgte eine qualitative Analyse mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM). Bei der Zementierung der Wurzelstifte kamen zwei verschiedene Befestigungskomposite zum Einsatz: SmartCem2 (n = 10), ein dualhärtender selbstadhäsiver Zement, und CoreX Flow (n = 10), ein dualhärtendes Kompositmaterial, welches mit einem Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem (XP Bond/Self-Cure Activator) angewendet wird. Nach den darauf folgenden Auszugsversuchen erfolgte die Analyse der Versagensmodi mit einem Stereomikroskop.

An den restlichen 24 Zahnwurzeln fand das Einsetzen der Faserstifte mit beigemischten Fluoreszenzfarbstoffen (Rhodamin B Isothiocyanat/RITC und Natrium Fluoreszein/FNA) zum jeweiligen Befestigungssystem statt. Diese Proben dienten der qualitativen Analyse mit einem Konfokalen Laser-Raster-Mikroskop (CLSM) bei zwei Proben je Gruppe (n = 2).

4.2.3 Vorbereitung der Proben

Es wurden humane, obere Eckzähne der zweiten Dentition nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- ähnliche Form und Größe der Wurzeln
- Kariesfreiheit
- keine bereits vorhandenen Wurzelfüllungen
- gerade Wurzeln
- keine Resorptionen oder Frakturen.

Die Zähne wurden mit Ultraschall (Sirosonic; Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland) und Scaler (HuFriedy, Chicago, USA) gesäubert, einzelne übrig gebliebene Gewebereste mit einem Occlubrush-Polierbürstchen (Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co., Lemgo, Deutschland) entfernt. Die Lagerung bis zur Weiterverarbeitung erfolgte bei Zimmertemperatur in 0,5%iger Chloramin-T-Lösung (Apotheke, Charité - Universitätsmedizin Berlin, Deutschland). Nach der Durchnummerierung der Proben fand die Aufteilung von 26 Zähnen in je eine Gruppe (insgesamt sechs Gruppen) mit dem Programm „True Random Number Generator“ (<http://www.random.org>) nach dem Zufallsprinzip statt.

1 mm oberhalb der Schmelzzementgrenze in mesial-distaler Betrachtung wurden die Zahnwurzeln mit einer diamantierten Trennscheibe (Komet) dekapitiert. Das anschließende Trimmen der Proben mit Nassschleifpapier der Körnung 1000 bis zur Schmelzzementgrenze diente der Herstellung planer Schnittflächen, die senkrecht zur Längsachse der Zahnwurzeln verliefen.

Die Vermessung der Proben erfolgte mit einer Mikrometerschraube (Mitutoyo Messgeräte GmbH, Neuss, Deutschland; Messgenauigkeit 0,001 mm), wobei stets eine Mindestwurzellänge von 16,0 mm zu gewährleisten war. Somit konnte im weiteren Verlauf der Versuche die geforderte Restwurzelfüllung von 4,0–6,0 mm Länge sichergestellt werden.

4.2.4 Aufbereitung und Füllung der Wurzelkanäle

Durch das Einführen eines Reamers der ISO-Größe 15 (VDW) bis zum Sichtbarwerden am Foramen apicale wurde die genaue Länge des Wurzelkanals mit einem Silikon-Stopper an der zervikalen Schnittfläche der Zahnwurzel festgehalten. An einer Minifix Messlehre (VDW) konnte die ermittelte Länge abgelesen werden. Die Arbeitslänge ist auf 1 mm vor dem anatomischen Apex festgelegt worden. Im Anschluss erfolgte eine maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit dem Mtwo-System (VDW) bis zur ISO-Größe 40:

- Kanalerweiterung mit Gates-Glidden-Bohrern der Größen drei bis eins in absteigender Reihenfolge und der Introfeile
- 1.Feile: ISO 10/.04
- 2.Feile: ISO 15/.05
- 3.Feile: ISO 20/.06
- 4.Feile: ISO 25/.06
- 5.Feile: ISO 30/.05

- 6.Feile: ISO 35/.04

- 7.Feile: ISO 40/.04.

Die Fortsetzung der Aufbereitung fand mit dem Flex-Master-System (VDW) bis zur ISO-Größe 60 statt:

- 8.Feile: ISO 45/.02

- 9.Feile: ISO 50/.02

- 10.Feile: ISO 60/.02.

Nach jedem Aufbereitungsschritt erfolgte eine gründliche Spülung mit 5 ml 1%iger Natriumhypochloritlösung (Aug. Hedinger, Stuttgart, Deutschland). Als abschließende Spüllösung kam eine 0,9%ige Kochsalzlösung (NaCl 0,9%; Fresenius Kabi GmbH, Bad Homburg, Deutschland) zum Einsatz.

Nach der Trocknung der Wurzelkanäle mit Papierspitzen (VDW) wurden diese mit Guttapercha (VDW) und einem Kunstharz-Sealer (2Seal; VDW) im Verfahren der vertikalen Kondensation mit dem BeeFill-System (VDW) gefüllt.

Ein Beta-Guttapercha-Masterpoint (VDW) der ISO-Größe 60/.02 wurde angepasst, mit dem Sealer bestrichen und mit pumpenden Bewegungen in den Wurzelkanal eingebracht. Mit einem auf 250°C erwärmten Plugger fand die erste Kondensation bis auf 5 mm vor der Aufbereitungslänge statt. Nach zehnhundertiger Wartezeit und kurzzeitiger Erwärmung (ca. eine Sekunde) wurde dieser zügig aus dem Wurzelkanal entfernt. Die zweite Kondensation erfolgte mit Handpluggern der Größen zwei und drei. Die Downpack-Phase war somit abgeschlossen. In der Backfill-Phase folgte das Auffüllen des restlichen Kanallumens mit Alpha-Guttapercha in je zwei Schritten, wobei nach jedem Schritt mit Handpluggern kondensiert wurde. Die Kanaleingänge wurden für die siebentägige Lagerung in Wasser mit Cavit W (3M ESPE) verschlossen.

4.2.5 Stiftbettpräparationen

Um klinische Bedingungen nachzuahmen, fanden die Stiftbettpräparationen an einer Phantomkopfeinheit (Abb. 5) (Simulationseinheit Premium; Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland) unter Verwendung einer Lupenbrille der 2,5-fachen Vergrößerung (Heine C 2.3 K Kopfbandlupe; Herrsching, Deutschland) statt. Gipsmodelle mit menschlichen Zähnen standen für diesen Teil des Versuches zur Verfügung. Aus dem Oberkiefermodell wurden die vier vorderen Schneidezähne entfernt und die übrig gebliebenen Alveolen mit einer Fräse erweitert, sodass stets genug Platz zum Einbringen der vorbereiteten Zahnwurzeln vorhanden war. Diese sind

mit einem knetbaren kondensationsvernetzenden Silikon (K-Silikon) (Silaplast; Pearson Dental Supply Co, USA) in die Alveolen der Zähne 12 bis 22 fixiert worden.

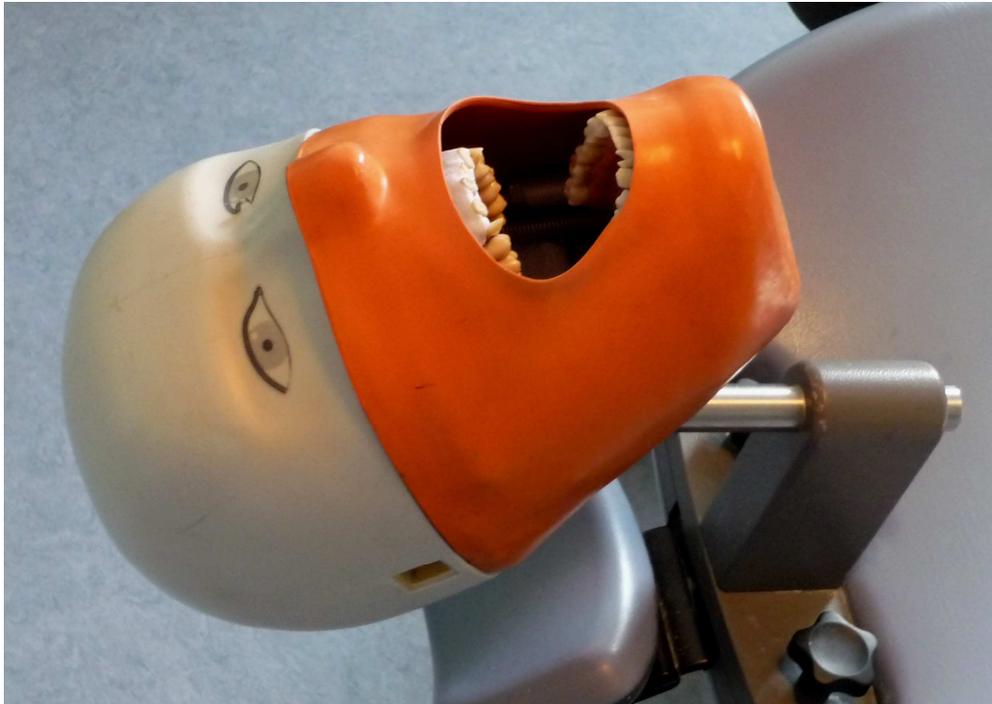


Abb. 5 Der Phantomkopf mit eingesetzten Modellen.

Mit der Minifix Messlehre wurden 8 mm an überlangen Rosenbohrern (H1SEM.204.012, H1SEM.205.010, Komet) sowie den Vorbohrern des DT-Light-Post-Wurzelstiftsystems (V040935000, V040935003, VDW) abgemessen und mit einem Silikon-Stopper markiert. In der Gruppe Vorbohrer (V) erfolgten die Vorbohrungen mit dem DT Universal Drill, die Erweiterungen der Kavitäten mit dem DT Finishing Drill. In der Gruppe Rosenbohrer (R) sind die Präparationen mit den Rosenbohrern der Größen 10 und 12 vorgenommen worden (Abb. 6). Es wurde stets auf ausreichende Wasserkühlung und geringen Dentinabtrag geachtet. Die eingestellte Umlaufgeschwindigkeit des KaVo Intramatic LUX2-Reduzierstückes (KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland) betrug 5200 U/min.

Übrig gebliebene grobe Verunreinigungen in den Stiftbettkavitäten wurden mit einer PA-Sonde (HuFriedy) und Wasserspray entfernt.

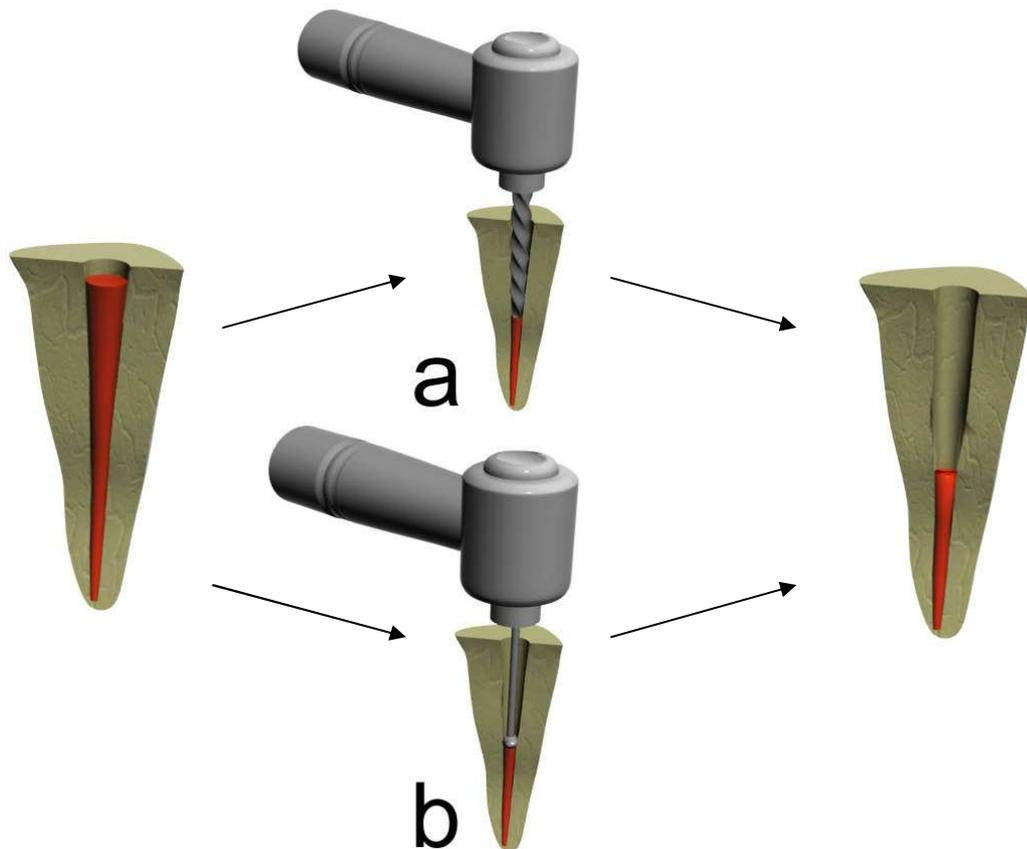


Abb. 6 Die Stiftbettpräparationsarten. Die Entfernung der Wurzelfüllung erfolgte entweder mit den auf das Stiftsystem abgestimmten Vorbohrern (a) oder mit überlangen Rosenbohrern (b).

4.2.6 Reinigungsmethoden

Für den weiteren Versuchsablauf fand eine Unterteilung der Zahnwurzeln der Gruppen V und R in drei Untergruppen ($n = 26$) nach dem Zufallsprinzip statt. In jeder Untergruppe kam eine Reinigungsmethode zum Einsatz, die zum Ziel hatte, übrig gebliebene Sealer- und Guttapercharesten von den Dentinwänden der Stiftbettkavitäten zu entfernen. In den Kontrollgruppen V-NaOCl und R-NaOCl erfolgte nur eine Spülung mit 5 ml einer 1%igen Natriumhypochloritlösung aus einer Einwegspritze (Vedefar, Dilbeek, Belgien) mit aufgesetzter Endo-Kanüle nach Dr. J. Buquet (Durchmesser: 0,35 mm, Vedefar). In den Gruppen V-Sand und R-Sand wurden die Proben mit 50 μm Aluminiumoxid (Korox; BEGO, Bremen, Deutschland) bei 40 psi für zehn Sekunden mithilfe des Airsonic Mini-Sandstrahlers (Hager & Werken GmbH, Duisburg, Deutschland) abgestrahlt (Abb. 7). Dabei wurde der Strahlansatz nahe an die Stiftbettöffnung (ca. 5 mm Abstand) positioniert und geringfügig in seiner Ausrichtung verändert, um möglichst alle Bereiche der Wurzelkanalwände mit dem Strahl zu erreichen.



Abb. 7 Der Airsonic Mini-Sandstrahler.

Als weitere Behandlungsmethode ist in den Gruppen V-Bims und R-Bims die Reinigung mit feuchtem Bimsmehl und Wurzelkanalbürstchen für das Winkelstück durchgeführt worden. Bimsmehl und Wasser wurden dafür zu einer cremigen Konsistenz angemischt und mit Spiral-Bürsten der Größe 12 (Curaprox, Curaden, Schweiz) in die Stiftbettkavitäten eingebracht. Bei 10000 Umdrehungen pro Minute erfolgten die Säuberungen durch Auf- und Abbewegungen für 20 Sekunden (Abb. 8).



Abb. 8 Die Reinigung mit feuchtem Bimsmehl und Curaprox-Bürstchen.

In allen Gruppen (Abb. 9) konnten die gelösten Partikel durch eine abschließende Spülung mit 5 ml 0,9%iger Kochsalzlösung aus einer Einwegspritze mit aufgesetzter

Endo-Kanüle entfernt werden. Die anschließende Trocknung der Kavitäten erfolgte mit Papierspitzen der Größe 60.

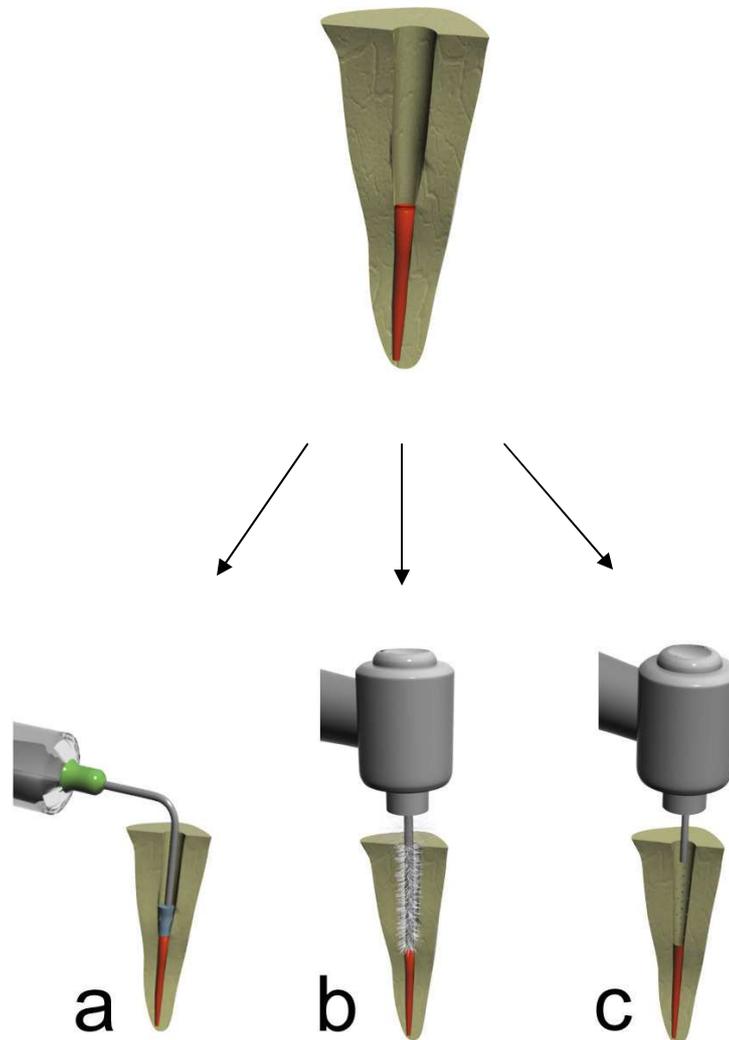


Abb. 9 Die Reinigungsmethoden im Überblick. Dargestellt sind die Spülung mit 1%iger NaOCl-Lösung (a), die Reinigung mit Bimsmehl und Bürstchen (b) sowie das Abstrahlen der Stiftbettkavität mit Al_2O_3 -Partikeln (c).

4.2.7 Ermittlung des Sauberkeitsgrades mit einem OP-Mikroskop

Um eine Aussage über den Sauberkeitsgrad der jeweiligen Stiftbettkavität nach der durchgeführten Reinigungsmethode machen zu können, wurden die Zahnwurzeln bei einer 23-fachen Vergrößerung mit dem Zeiss-OP-Mikroskop (OPMI pico; Carl Zeiss Jena GmbH, Jena, Deutschland) untersucht. Nach einem Score-System erfolgte die Einteilung der Proben in weitere Untergruppen:

- I – Stiftbettkavität ist ganz sauber

- II – vereinzelt kleine Sealerrückstände
- III – größere Sealerrückstände (z.B. in tiefen Rillen von Aufbereitungsinstrumenten) oder vereinzelt kleine apikale Guttapercharückstände in Kombination mit wenigen kleinen Sealerresten
- IV – größere Sealerrückstände in Kombination mit apikalen Guttapercharesten.

4.2.8 Einsetzen der Wurzelstifte

Das anschließende Zementieren der *DT Light Posts SL* der Größe 3 erfolgte jeweils mit SmartCem2 oder CoreX Flow nach Herstellerangaben. Auf die Doppelkammerspritzen der Befestigungskomposite wurden, nach Entfernung der ersten Materialmengen, Applikationshilfen für den Wurzelkanal (Dentsply) aufgeschraubt (Abb. 10). Die Spitzen der Applikationskanülen sind in die Wurzelkanäle bis zum Ende der Stiftbettpräparationen eingeführt worden. Das Ausfließen des Materials fand beim leichten Druck auf die Spritzenkolben statt, wobei zeitgleich die Kanülen langsam aus den Wurzelkanälen herausgezogen wurden. Das Einsetzen der Faserstifte erfolgte mit Fingerdruck. Alle Zementüberschüsse konnten mit Schaumstoffpellets und einer zahnärztlichen Sonde entfernt werden. Um die Passung der Wurzelkanalstifte bei der gewünschten Insertionstiefe zu kontrollieren, wurde bei jeder Zahnwurzel ein vorbereiteter DT-Light-SL-Stift, der bei 8 mm eine Markierung aufwies, einprobiert. Die Faserstifte verblieben in den Originalverpackungen bis zu dem Moment des Einsetzens und wurden mithilfe einer Pinzette in die Proben platziert.



Abb. 10 Die Applikationskanülen für den Wurzelkanal. Entnommen aus [Dentsply 2011].

4.2.8.1 Verarbeitung von SmartCem2

Die Applikation von SmartCem2 in die mit Papierspitzen getrockneten Stiftbettkavitäten fand innerhalb von 20 Sekunden statt. Nach dem Einsetzen der Wurzelstifte und der Entfernung der Zementüberschüsse erfolgte die Lichthärtung für 40 Sekunden mit einer LED-Polymerisationslampe (Elipar Freelight 2, 3M ESPE; gemessene Lichtleistung mit *bluephase meter* [Ivoclar Vivadent]: 890 mW/cm²), die direkt an den Kopf der Faserstifte angesetzt wurde.

4.2.8.2 Verarbeitung von CoreX Flow

Mithilfe einer Applikationsnadel (Dentsply) ist der DeTrey Conditioner in die Zahnwurzeln eingebracht und nach 15 Sekunden mit einem Wasserspray bei 20-sekündiger Abspülzeit entfernt worden. Es folgte die Trocknung aller Kavitäten mit Papierspitzen der ISO-Größe 60. Anschließend wurden XP Bond und der Self-Cure Activator in gleichen Mengenverhältnissen vier Sekunden angemischt und mit Wurzelkanal-Applikator-Tips (Dentsply) an Dentinwänden der Stiftbettpräparationen verteilt. Nach 20 Sekunden konnten die Überschüsse mit einer für fünf Sekunden eingebrachten Papierspitze (ISO 60) entfernt werden. Anschließendes fünfsekündiges Verblasen mit leichtem Luftstrom diente dem Verdunsten des Lösungsmittels t-Butanol. Nach der Konditionierung erfolgte die Applikation von CoreX Flow, wobei die Verarbeitung der von SmartCem2 entsprach (Abb. 11 und 12). Die fünftägige Zwischenlagerung der Zahnwurzeln fand in Aqua dest. statt.

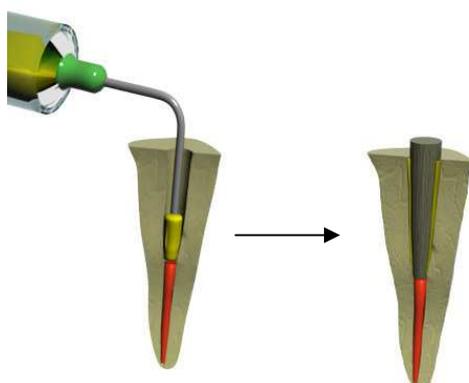


Abb. 11 Das Einsetzen der Wurzelkanalstifte nach der Applikation des Befestigungskomposites mithilfe der Applikatorkanülen.

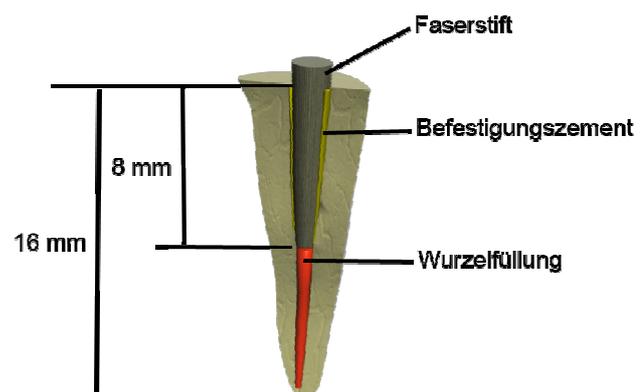


Abb. 12 Darstellung der Insertionstiefe der Faserstifte. Die Stiftbettpräparation erfolgte bis zur Hälfte der Wurzellänge.

4.2.9 Vorbereitung der Proben für die Auszugsversuche

Um die Proben bei der späteren Durchführung der Auszugsversuche in die Zwick-Universalprüfmaschine (Zwick, Roell, Ulm, Deutschland) einspannen zu können, wurden sie mit Technovit 4071 (Heraeus Kulzer) in angefertigte Teflonformen (Technische Abteilung, Charité - Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland) eingebettet. Diese Einbettformen bestanden aus zylindrischen Schächten (Tiefe: 25 mm, Durchmesser: 10 mm) in Teflonblöcken mit verschiebbaren Stempeln an den Böden der Schächte, die von der Außenseite der Einbettformen aus ihrer Position herausgedrückt werden konnten.

Vor dem Einbetten mit einem Parallelometer (Degussa Dental, Düsseldorf, Deutschland) wurden die Formen mit Vaseline (Winthrop Arzneimittel GmbH, Mülheim-Kärlich, Deutschland) isoliert und die Zahnwurzeln nach folgendem Schema vorbereitet:

- Ätzen mit 37%igem Phosphorsäuregel (Total Etch; Ivoclar Vivadent) für 20 Sekunden
- Reinigung mit Wasserspray für 15 Sekunden und anschließendes Trockenpusten mit Luftstrom
- Rewetting mit angefeuchtetem Schaumstoffpellet
- Auftragen des Bondings (Excite DSC; Ivoclar Vivadent) und leichtes Verpusten für zehn Sekunden
- Lichthärtung des Bondings für 15 Sekunden von jeder Seite mit der LED-Polymerisationslampe.

Mittels einer 2D-Wasserwaage (STABILA Messgeräte Gustav Ullrich GmbH, Annweiler am Trifels, Deutschland) wurde sichergestellt, dass die horizontale Gerätebasis des Parallelometers plan auf der Tischebene stand. Die vorgekühlten Einbettformen (3°C) wurden auf dem Modelltisch mit einer Spannvorrichtung fixiert und entsprechend der Tischebene mithilfe der 2D-Wasserwaage ausgerichtet.

Die Proben wurden in das Dreibackenfutter des Kreuzarmes des Parallelometers am zylindrischen Anteil des Wurzelstiftes eingespannt. Durch dieses Vorgehen war stets eine Parallelität zwischen den Stiftlängsachsen und den Wänden der Schächte in den Teflonblöcken gewährleistet. Die Auszugsrichtung bei den Pull-out-Tests stimmte dadurch mit der Ausrichtung der Faserstifte überein (Abb. 13).

Das Technovit wurde nach den Herstellerangaben angerührt und in die Einbettformen eingefüllt. Danach folgte das Herablassen der Proben in den Kunststoff und die Fixierung dieser neuen Position am Schraubrad des Kreuzarmes (Abb. 14).

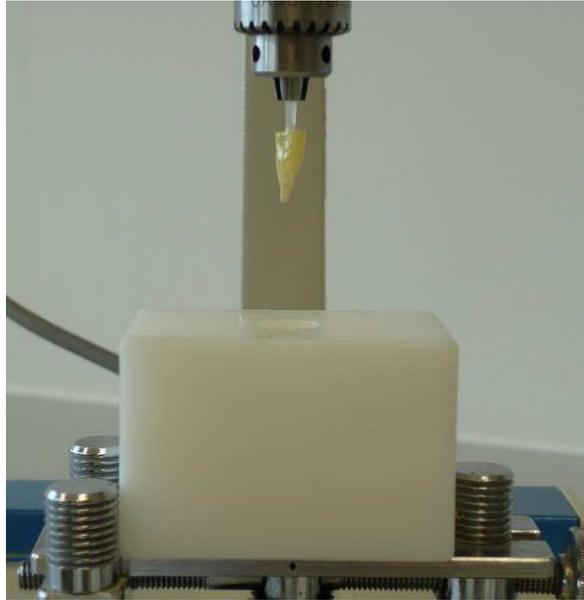


Abb. 13 Eingespannte Zahnwurzel, zum Einbetten vorbereitet.

Als die Konsistenz des Kunststoffes beim Abbinden keine Verschiebung der Zahnwurzeln in den Einbettformen mehr zuließ, wurde die fixierte Position gelöst (Abb. 15). Die Proben wurden in ein Wasserbad in den Kühlschrank (3°C) gestellt. Nach 15 Minuten war die Abbindephase des Kunststoffes vorbei und das Ausbetten durch das Herausdrücken des Stempels auf der Unterseite des Teflonblockes konnte erfolgen.

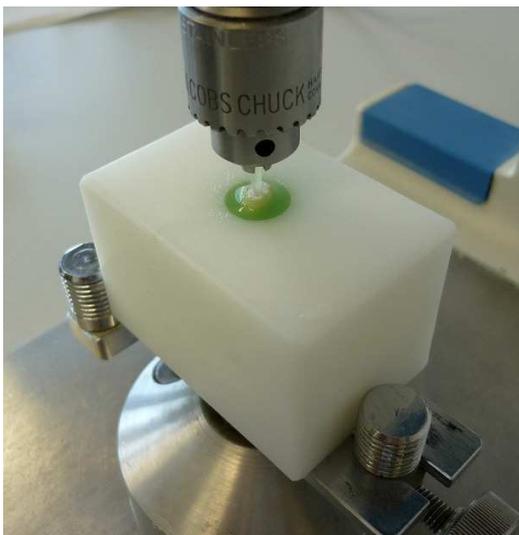


Abb. 14 In das Technovit herabgelassene Zahnwurzel.

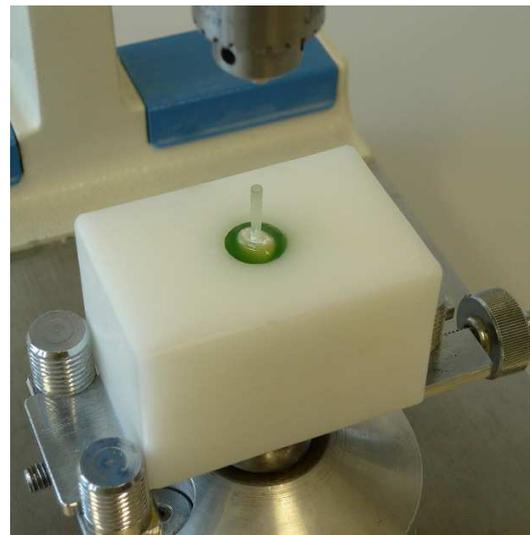


Abb. 15 Gelöste Position des Kreuzarmes beim Beginn des Aushärtens des Einbettkunststoffes.

4.2.10 Herstellung der Abzugshaken

Damit die Stifte mit der Auszugsvorrichtung der Zwick-Universalprüfmaschine aus den Zahnwurzeln herausgezogen werden konnten, mussten sie mit einem Abzugshaken versehen werden.

Ein Hakenschlüssel bildete den oberen Anteil der Auszugsvorrichtung; dieser wurde an einer Kette in der Zwick-Maschine befestigt. Sein unteres Ende bestand aus einem viereckigen Rahmen mit einer halbrunden Aussparung und diente als Negativform für die Anfertigung der Abzugshaken (Abb. 16).



Abb. 16 Der Hakenschlüssel.

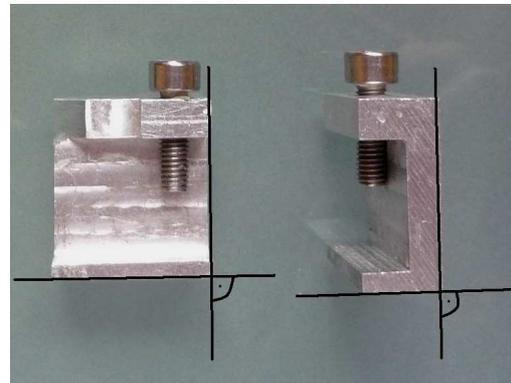


Abb. 17 Das Klemmstück.

Das aus der Probe herausragende Stiftende wurde mit einer Diamantenscheibe unter Wasserkühlung angeraut, wodurch ein sicherer Halt des Wurzelstiftes am Einbettkunststoff gewährleistet war. Der Übergang von Stiftende zur Zahnwurzel wurde mit K-Silikon ausgeblockt, damit das Technovit nicht in diesen Bereich hinfließen konnte. Um eine exakte Platzierung beim weiteren Vorgehen zu gewährleisten, wurde der Zylinderanteil der Probe in ein Klemmstück eingespannt (Abb. 17). Ein sicherer Halt der Probe im Klemmstück wurde durch das Festziehen einer sich an der Seite des Klemmstückes befindlichen Schraube sichergestellt. Der Hakenschlüssel und der Prüfkörper konnten nun auf einer planen Tischebene mithilfe einer 90°-Winkelform senkrecht zueinander positioniert werden.

Technovit wurde nach Herstellerangaben angemischt und in den Rahmen des Hakenschlüssels eingefüllt (Abb. 18). Nach dem Aushärten konnte der Abzugshaken mit leichtem Fingerdruck aus der Form ausgebettet werden. Die zweitägige Zwischenlagerung der Prüfkörper fand in Aqua dest. statt.

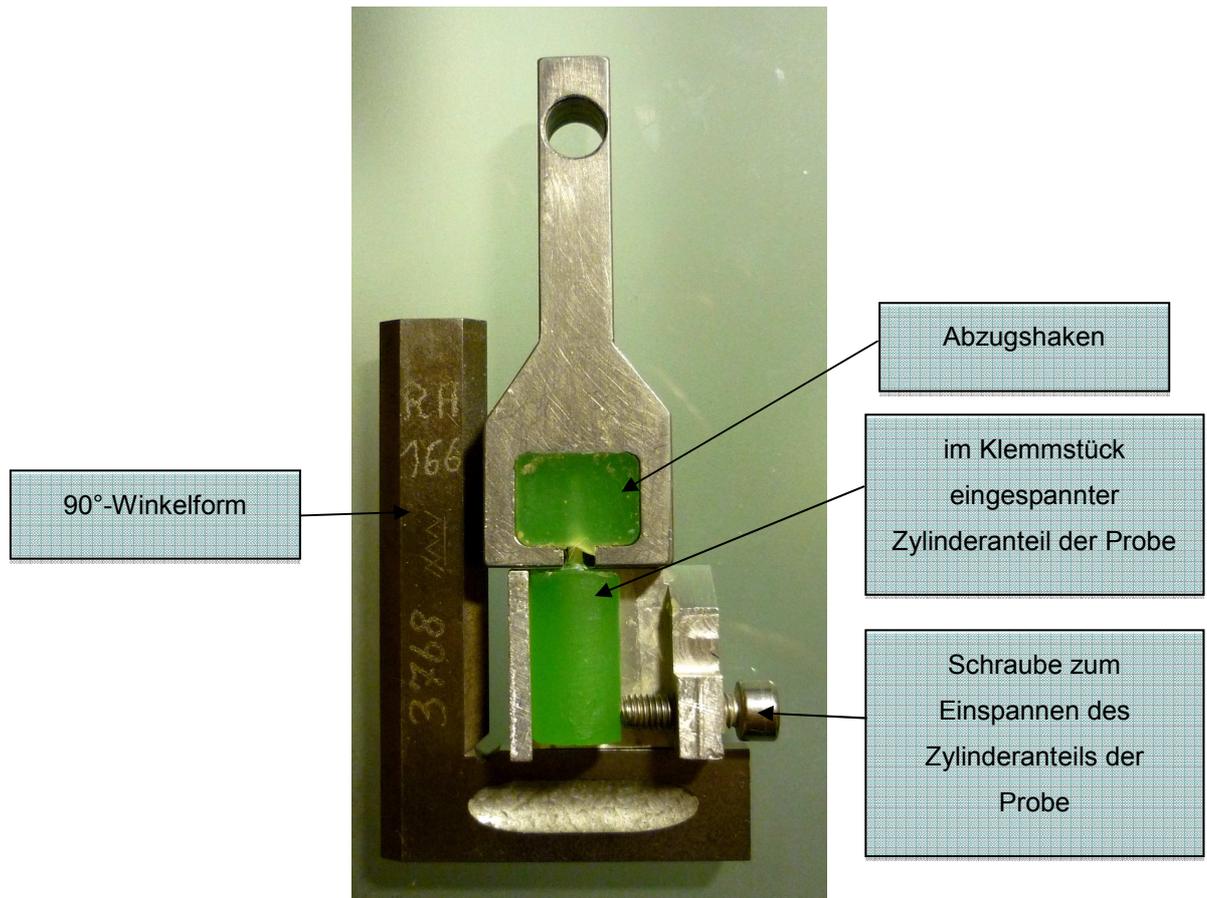


Abb. 18 Die Herstellung der Abzugshaken. Zu erkennen ist der Abzugshaken nach dem Aushärten des Einbettkunststoffes. Der Zylinderanteil der Probe ist im Klemmstück eingespannt und durch die 90°-Winkelform senkrecht zum Hakenschlüssel ausgerichtet.

4.2.11 Auszugsversuche

Zur Durchführung der Auszugsversuche dienten eine computergestützte Zwick-Universalprüfmaschine und eine 2,5 kN Messdose (Abb. 19). Die Proben wurden mittig mit zwei Spannflächen einer 1 kN Befestigungsbacke im unteren Teil der Maschine fixiert. Die nach oben senkrecht ausgerichteten Abzugshaken wurden spannungsfrei in den Hakenschlüssel positioniert. Dieser hing an einer 12 cm langen Kette, die an der Messdose befestigt war. Die Faserstifte wurden senkrecht zur Tischebene mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm pro Minute aus den Zahnwurzeln herausgezogen (Abb. 20). Die Versagenslast wurde bei Überschreitung eines 10%igen Kraftabfalls in N gemessen.

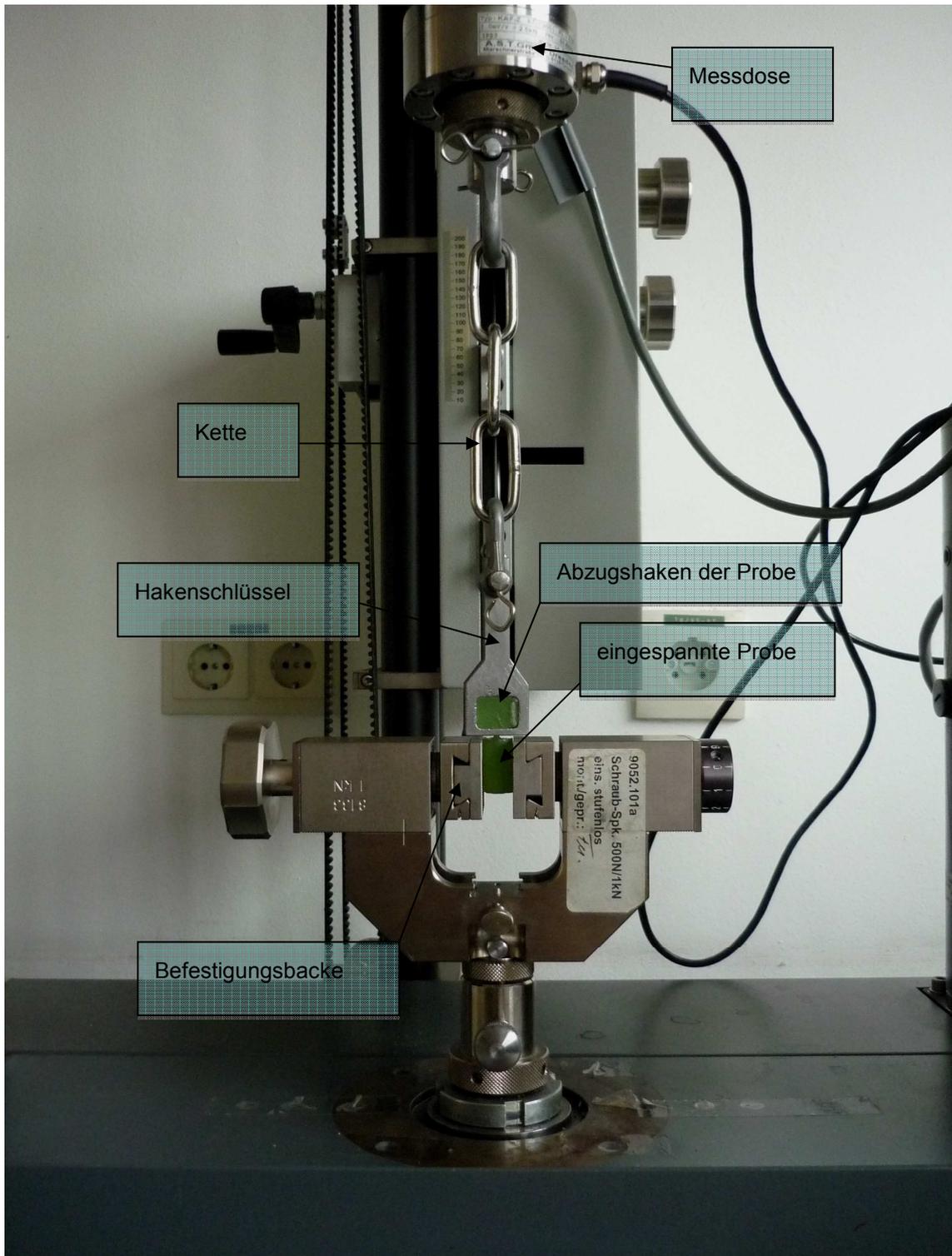


Abb. 19 Darstellung des Versuchsaufbaus. Im unteren Teil der Abbildung ist die in der Zwick-Maschine eingespannte Probe zu erkennen. Der Abzugshaken befindet sich im Hakenschlüssel, der an einer Metallkette hängt. Im oberen Teil der Abbildung ist die Messdose zu sehen, an der die Metallkette befestigt ist.

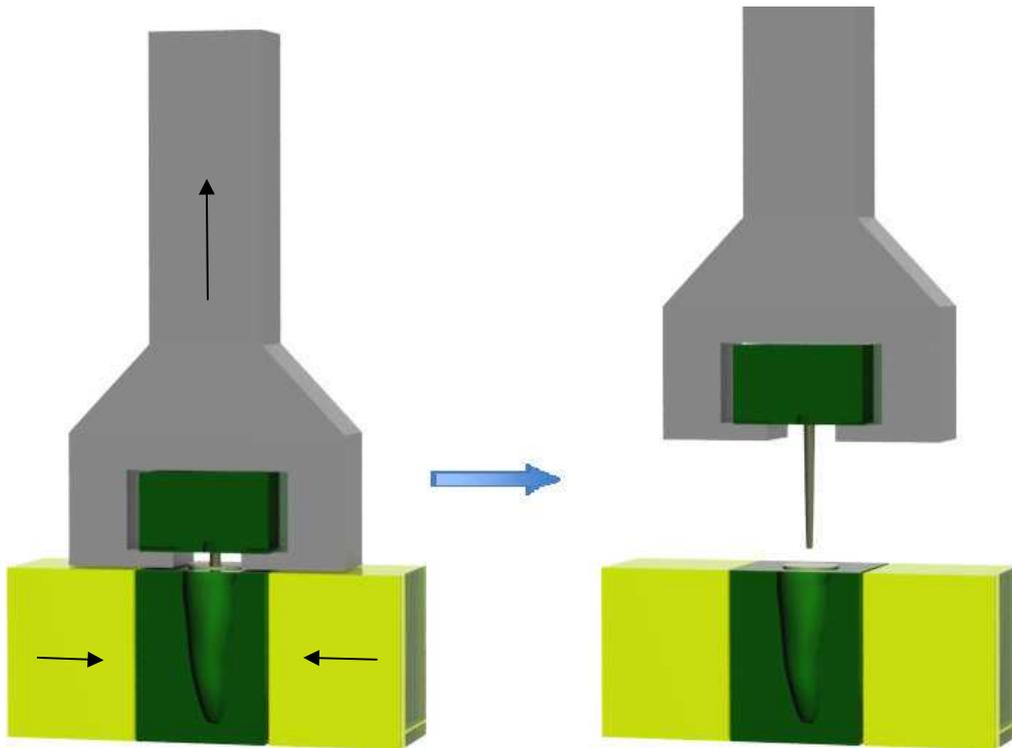


Abb. 20 Auszugsversuch. Die schwarzen Pfeile stellen die Richtung der einwirkenden Kräfte, die gelben Quader die Befestigungsbacken der Zwick-Maschine dar.

4.2.12 Bruchmodus-Bestimmung

Nach den durchgeführten Auszugtests wurden die eingebetteten Zahnwurzeln am Band-Trennschleifsystem (E300 Exakt Diaplus; Exakt Vertriebs GmbH, Norderstedt, Deutschland) durch die Mitte des Wurzelkanals längs geteilt. Die Ausrichtung der Proben erfolgte nach Augenmaß. Die Sägebänddicke betrug 0,2 mm. Der tatsächliche Schneidverlust lag bei 0,3 mm. Die Proben wurden auf einem Schlitten mit Fingerdruck in Richtung des Sägebandes bewegt, dessen Geschwindigkeit bei 850 m/min lag. Eine ausreichende Wasserkühlung war stets gewährleistet.

Die längs geteilten Zahnwurzeln wurden anschließend unter einem Stereomikroskop (Stemi SV 11 Makroskop, S 1,0 x Objektiv, 0,8-fache Vergrößerung; Carl Zeiss Jena GmbH) mit den zugehörigen Faserstiften nach ihrem Bruchmodus ausgewertet. Drei Bruchmodi konnten unterschieden werden:

1. adhäsive Bruchart I: Bruch zwischen Befestigungskomposit und Wurzelkanaldentin (mehr als 70 % der Verbundfläche einnehmend)
2. adhäsive Bruchart II: Bruch zwischen Befestigungskomposit und Faserstift (mehr als 70 % der Verbundfläche einnehmend)

3. gemischte Bruchart: Brucharten I und II sind gleichzeitig vorhanden, erreichen aber nicht 70 % der Verbundfläche.

Mit dem Computerprogramm AnalySIS Pro 5.0 (Soft Image System [SIS], Münster, Germany) wurden die herausgezogenen Faserstifte, die zugehörigen Stiftbettpräparationen sowie die Wild-Eichskala (Wild, Millimeter-Eichlineal, Deutschland) unter dem Stereomikroskop (S 1,0 x Objektiv, 0,8-fache Vergrößerung) mit einer Charge-coupled Device (CCD) Kamera (Color View IIIu; Olympus, Hamburg, Deutschland) fotografiert. Mithilfe der Eichskala erfolgte die Markierung einer 8 mm langen Strecke mit dem Bildbearbeitungsprogramm Adobe Photoshop CS2 (Adobe Systems GmbH, Dublin, Irland). Nach der Unterteilung der Strecke in 0,5-Millimeter-Schritten wurde eine transparente Folie erstellt, die auf den Fotos der Faserstifte platziert wurde.

Die haftenden Zementreste an den Stiftoberflächen wurden an zwei zueinander entgegengesetzt liegenden Seiten der Faserstifte als Strecken entlang der Stiftlängsachsen abgemessen (Abb. 21 - 22). Um eine Aussage über die prozentualen Anteile der Kompositreste an den Gesamthaffflächen zu machen, wurden die beiden Werte addiert und ins Verhältnis zur doppelten Länge der Verbundflächen gesetzt.

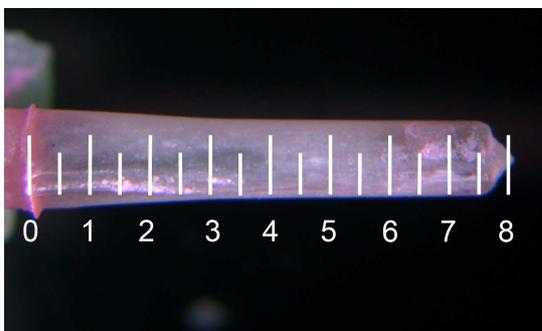


Abb. 21 Abmessung der Zementreste an der Vorderseite des Faserstiftes.

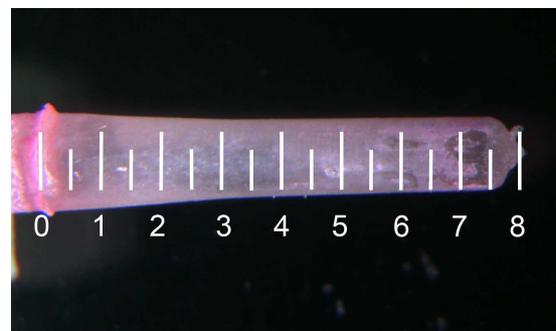


Abb. 22 Abmessung der Zementreste an der Rückseite des Faserstiftes.

4.2.13 Qualitative Analyse mit REM

Je zwei exemplarische Zahnwurzeln aus jeder Gruppe wurden nach den durchgeführten Reinigungsmethoden am Band-Trennschleifsystem manuell durch die Mitte des Wurzelkanals längs geteilt. Nach einer Trocknung erfolgte die qualitative Analyse der Stiftbettkavitäten unter einem Rasterelektronenmikroskop (Cam Scan Maxim 2040; Cam Scan Maxim Elektron Optics, Cambridge, UK) im Niedrigvakuum bei einer 300- und 1500-fachen Vergrößerung.

4.2.14 Qualitative Analyse mit CLSM

24 Zahnwurzeln wurden für diesen Teil der Arbeit nach dem beschriebenen Vorgehen zur Stiffaufnahme vorbereitet. Die Aufteilung der Proben in Gruppen ist dem Flussdiagramm 4.2.1 zu entnehmen. Die Stiffbefestigung erfolgte mit angefärbten Befestigungssystemen.

4.2.14.1 Verarbeitung von SmartCem2

0,2 ml der hergestellten Rhodamin B Isothiocyanat-Lösung (vgl. Kapitel 4.1.3.1) wurden mit einer Pipette aufgenommen und auf eine Glasplatte gebracht. Das anschließende Verblasen mit Luftstrom diente dem vollständigen Verdunsten des zugesetzten Alkohols. 200 mg des Befestigungszementes wurden anschließend mit dem roten Farbstoff vermischt, auf den Faserstift appliziert und unter leicht drehender Bewegung in die Stiffbettkavität eingebracht. Zementüberschüsse wurden belassen. Die Lichthärtung erfolgte mit einer direkt an den Kopf der Faserstifte angesetzten Polymerisationslampe für 40 Sekunden.

4.2.14.2 Verarbeitung von CoreX Flow

Je 0,2 ml der Rhodamin B Isothiocyanat- und Fluoreszein Isothiocyanat-Lösung wurden auf einer Glasplatte vorsichtig verblasen. 200 mg des Komposites anschließend mit dem roten, 20 µl des Adhäsivsystems mit dem grünen Farbstoff vermischt. Die Applikation des Bondingsystems entsprach dem unter Kapitel 4.2.8.2 beschriebenen Vorgehen, die des Befestigungskomposites dem unter Kapitel 4.2.8.1.

4.2.14.3 Vorbereitung der Proben

Nachdem die Wurzeln in Technovit eingebettet worden waren, wurden sie mit Sekundenkleber (Fa. Henkel, Düsseldorf, Deutschland) auf Objektträgern (Fa. Diaplas, Oststeinbeck, Deutschland) befestigt und anschließend mit der Exakt-Präzisionsdiamantbandsäge in je drei Scheiben von 2 mm Dicke geschnitten. Diese Scheiben wurden auf Objektträger geklebt und unter Wasserkühlung in einer Schleifmaschine (EXAKT 400 CS, Exakt Vertriebs GmbH) mit Schleifpapier aufsteigender Körnung (Schleifpapier Körnung 2500, 4000; Exakt Vertriebs GmbH) poliert. Die gewonnenen Probenscheiben wurden nachfolgend mit einem Konfokalen Laser-Raster-Mikroskop (TCS NT; Fa. Leica, Heidelberg, Deutschland) untersucht.

4.2.14.4 Anfertigung und Bewertung der Bilder

In dieser Studie wurde das CLSM im Dualfluoreszenzmodus genutzt, der nur die Detektion des von den Fluoreszenzfarbstoffen emittierten Lichtes zulässt. Das Anregungslicht wurde für den Farbstoff Fluoreszein Isothiocyanat mit einem Argon-Laser erzeugt und hatte ein Wellenlängenmaximum bei 488 nm. Die Fluoreszenz stellte sich grün dar. Für das Rhodamin B Isothiocyanat erzeugte ein Helium-Neon-Laser die notwendige Energie bei einer Wellenlänge von 543 nm für die Fluoreszenz, welche sich rot darstellte. Die jeweils observierte Schicht befand sich etwa 10 µm unter der Probenoberfläche. Von ausgewählten Scheiben der Proben wurden je eine Aufnahme mit dem Argon- und eine weitere mit dem Helium-Neon-Laser (40-fach-Objektiv und 2-fach-Zoom) elektronisch gewonnen, im Tiff-Dateiformat gespeichert und anschließend zu einem Gesamtbild überlagert. Die Ausbildung der Hybridschicht und der Tags wurde bei beiden Befestigungszementen unter Berücksichtigung der jeweiligen Reinigungsmethode qualitativ analysiert.

4.2.15 Statistische Auswertung

Die gesamte statistische Auswertung wurde mit dem Programm SPSS, Version 16.0 (SPSS; Chicago, Illinois, USA) erstellt. Der Signifikanzgrad p ist mit $p \leq 0,05$ festgelegt worden. Der Einfluss der Reinigungsmethode, des Befestigungskomposites und der Präparationsmethode auf die Retention der Faserstifte wurde mithilfe der dreifaktoriellen Varianzanalyse (Drei-Wege-ANOVA) ausgewertet. Mit dieser konnte untersucht werden, welchen Einfluss drei unabhängige Faktoren in verschiedenen Ausprägungen auf eine abhängige Variable, die die Messwerte enthält, hatten. Dabei galten die Retentionswerte als die abhängige, Reinigungsmethode, Befestigungskomposit und Präparationsmethode als die unabhängigen Variablen. Voraussetzung für die Varianzanalyse war eine Normalverteilung der Daten. Durch einen Vergleich der gruppenspezifischen Mittelwertunterschiede konnte ermittelt werden, ob sich die Gruppen signifikant voneinander unterschieden.

Die nachfolgenden Post-hoc-Analysen zu den Retentionswerten wurden mit einem Tukey's HSD (Honestly Significant Difference) Test durchgeführt. Dieser Test baut auf der Varianzanalyse auf und benutzt Zwischenergebnisse dieses Verfahrens, um homogene Untergruppen bei Abweichungen zwischen den festgestellten Mittelwerten zu bilden. Dabei werden die Gruppenmittelwerte eingestuft und der Spannweitenwert berechnet. Für paarweise Vergleiche zwischen den Probengruppen wird die Studentized-Range-Verteilung verwendet. Der Einfluss der Reinigungsmethoden auf die Sauberkeit der Stiftbettkavitäten sowie die Einflüsse der Befestigungskomposite und der Präparationsmethoden auf die Versagensmodi wurden mit dem Chi-Quadrat-Test nach

Pearson untersucht. Mithilfe dieses Tests werden nominal oder ordinal skalierte Merkmale (z.B. Reinigungsmethoden und Sauberkeit der Stiftpfanne) anhand von beobachteten Häufigkeiten ihrer Merkmalsausprägung (im verwendeten Beispiel: Score-Grad) analysiert. Dabei wird untersucht, ob zwei unabhängige Merkmale assoziiert sind. Die Berechnung erfolgt anhand einer Kontingenztafel, in der die jeweiligen Merkmale anhand ihrer Merkmalsausprägungen gegenübergestellt werden. Das Prinzip dieses Tests besteht darin, die beobachteten Häufigkeiten in jeder Gruppe/Zelle mit den bei Unabhängigkeit erwarteten Häufigkeiten zu vergleichen. Je größer die Differenzen sind, desto mehr spricht dies für eine Abhängigkeit zwischen den beiden Merkmalen [Zöfel 2002].

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse zur Stiftretention

Die Wurzelstiftretention wurde signifikant vom Befestigungsmaterial ($p < 0,0005$), der Reinigungsmethode ($p = 0,008$) und der Präparationsart beeinflusst ($p < 0,0005$; Drei-Wege-ANOVA). In der Abbildung 23 sind die gemessenen Retentionswerte grafisch dargestellt.

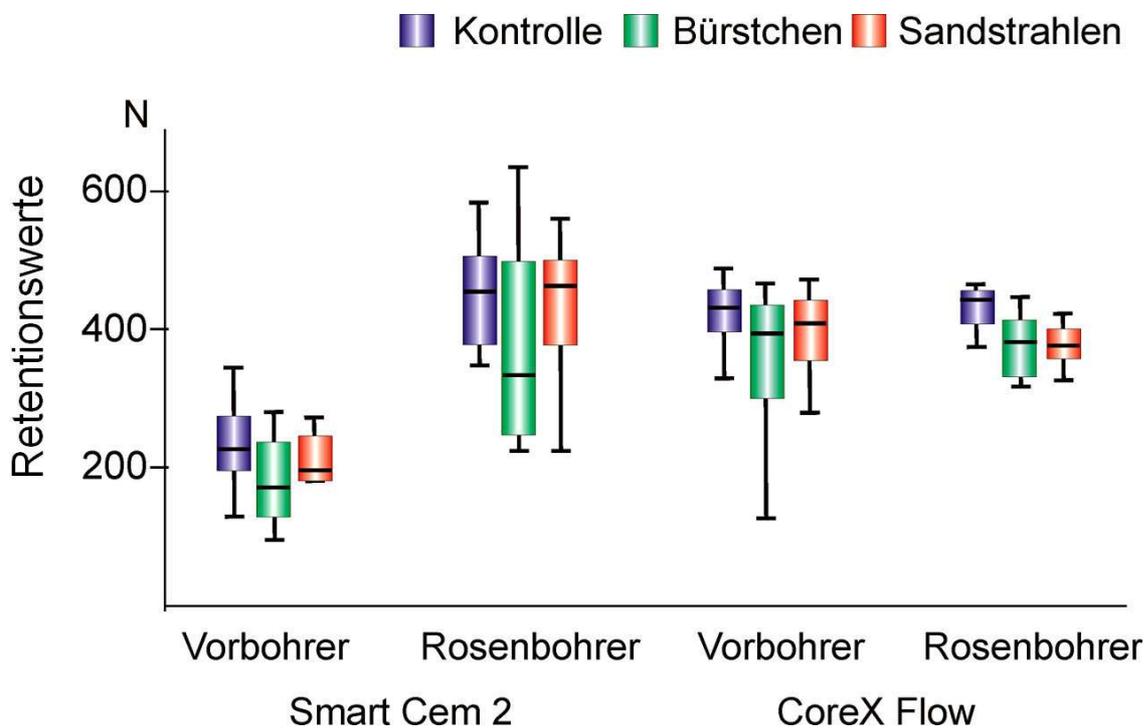


Abb. 23 Grafische Darstellung der Retentionswerte jeder Befestigungskomposit-Gruppe, aufgeteilt nach der Präparationsart und der Reinigungsmethode.

5.1.1 Einfluss der Reinigungsmethode auf die Stiftretention

Bei den Reinigungsmethoden zeigte die Kontrollgruppe signifikant höhere Retentionswerte als die Bürstchen-Gruppe ($p = 0,005$), unterschied sich jedoch nicht signifikant von der Sandstrahl-Gruppe ($p = 0,280$). In der Sandstrahl-Gruppe war die Stiftretention ebenfalls nicht signifikant höher als in der Bürstchen-Gruppe ($p = 0,224$; Tukey-HSD Test) (Tab. III).

Tabelle III: Retentionswerte (Mittelwert und Standardabweichung [SD]) in Abhängigkeit von der Reinigungsmethode

Reinigungsmethode	Anzahl der Proben	Stiftretention in N
Kontrolle	40	370 (104) ^A
Bürstchen	40	315 (124) ^B
Sandstrahlen	40	344 (102) ^{AB}

^{A,B,C} Die hochgestellten Buchstaben innerhalb einer Spalte zeigen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Reinigungsmethoden ($p = 0,008$; Tukey-HSD Test).

5.1.2 Einfluss der Präparationsart auf die Stiftretention

Die Präparation der Stiftbettkavität mit dem Vorbohrersystem erzeugte eine signifikant geringere Stiftretention im Vergleich zur Stiftbettpräparation mit überlangen Rosenbohrern (Tab. IV). Diese Ergebnisse konnten vor allem in der SmartCem2-Gruppe beobachtet werden, in der die Rosenbohrer-Gruppe signifikant höhere Retentionswerte [423 (112) N] zeigte als die Vorbohrer-Gruppe [207 (58) N] ($p < 0,0005$). Eine signifikante Interaktion zwischen dem Befestigungsmaterial und der Stiftbettpräparation wurde festgestellt ($p < 0,0005$, Drei-Wege-ANOVA) (Abb. 23).

Tabelle IV: Retentionswerte (Mittelwert und Standardabweichung [SD]) in Abhängigkeit von der Präparationsart

Präparationsart	Anzahl der Proben	Stiftretention in N
Stiftvorbohrer	60	287 (105) ^A
Rosenbohrer	60	399 (88) ^B

^{A,B} Die hochgestellten Buchstaben innerhalb einer Spalte zeigen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Präparationsarten ($p < 0,0005$; Drei-Wege-ANOVA).

5.1.3 Einfluss des Befestigungskomposites auf die Stiftretention

Das Befestigungsmaterial CoreX Flow zeigte signifikant höhere Retentionswerte gegenüber SmartCem2 (Tab. V).

Tabelle VI: Retentionswerte (Mittelwert und Standardabweichung [SD]) in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial

Befestigungskomposit	Anzahl der Proben	Stiftretention in N
SmartCem2	60	315 (141) ^A
CoreX Flow	60	370 (62) ^B

^{A,B} Die hochgestellten Buchstaben innerhalb einer Spalte zeigen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Befestigungskompositen ($p < 0,0005$; Drei-Wege-ANOVA).

5.2 Ergebnisse zu den Versagensmodi

Die Versagensmodi (Abb. 24) waren sowohl vom Befestigungskomposit als auch von der Präparationsart signifikant abhängig (Tab. VI). In der Abbildung 25 ist ein Vergleich der Stiftoberflächen vor und nach dem Auszugsversuch exemplarisch dargestellt.

Tabelle VI: Prozentuale Verteilung der Versagensmodi in Abhängigkeit vom Befestigungskomposit und der Präparationsart

Befestigungs- material	Stiftbett- präparation	Versagensmodus in %				p-Wert
		I	II	III		
		adhäsive Bruchart Komposit/ Dentin	adhäsive Bruchart Stift/ Komposit	gemischte Bruchart		
SmartCem2	Vorbohrer	83.3	0	16.7	p<0.0005	
	Rosenbohrer	10	40	50		
CoreX Flow	Vorbohrer	23.3	56.7	20	p=0.006	
	Rosenbohrer	0	93.4	6.6		

$p < 0.05$ zeigt einen signifikanten Einfluss der Präparationsmethode auf die Versagensmodi (Chi-Quadrat-Test nach Pearson).

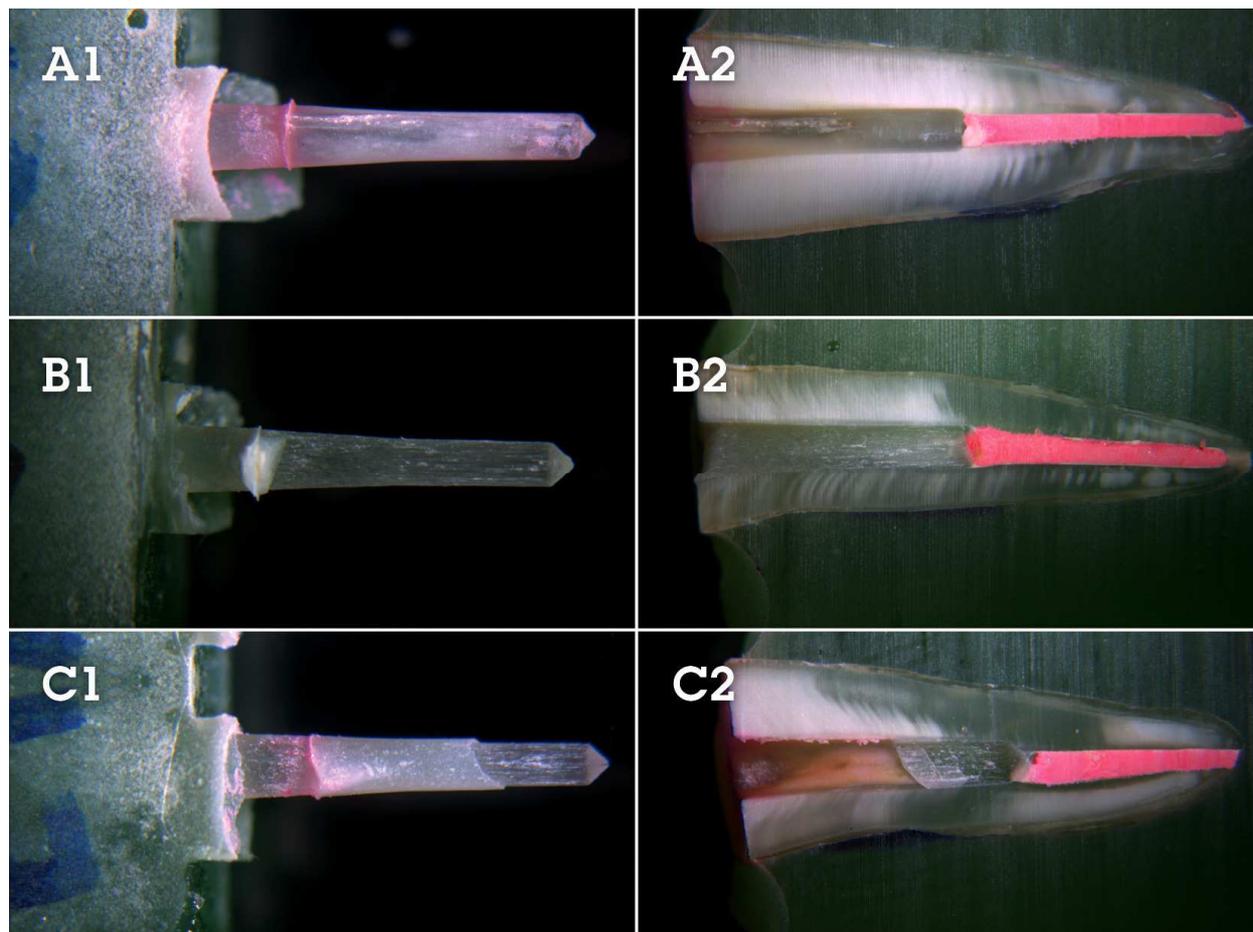


Abb. 24 (A-C) Die Versagensmodi. In A1 und A2 zeigen ein Beispiel für die Gruppe der adhäsiven Bruchart I. Das gesamte Befestigungskomposit befindet sich am Faserstift, während in der zugehörigen Stiftbettkavität keine Zementreste zu erkennen sind. In B1 und B2 ist ein Beispiel der adhäsiven Bruchart II gezeigt. Das gesamte Befestigungsmaterial befindet sich in der Stiftbettkavität, während der zugehörige Wurzelkanalstift frei von Zementresten ist. In C1 und C2 ist ein Beispiel der gemischten Bruchart dargestellt. Das Befestigungskomposit ist sowohl auf dem Faserstift als auch in der zugehörigen Stiftbettkavität zu finden. Jedoch bedeckt es weder die Stiftoberfläche noch die Wurzelkanalwände zu 70% (1,0 x Objektiv, 0,8-fache Vergrößerung).

In der Vorbohrer-Gruppe versagte vor allem der Dentin-Komposit-Verbund, in der Rosenbohrer-Gruppe vorwiegend der Stift-Komposit-Verbund (Abb. 26).

Bei Faserstiften, die mit SmartCem2 befestigt wurden, zeigte sich die adhäsive Bruchart zwischen dem Befestigungskomposit und Wurzelkanaldentin am häufigsten (46,7 %). Jedoch ist dieses Ergebnis bedingt durch die hohen Versagensraten des Dentin-Komposit-Verbundes bei der Stiftbettpräparation mit dem Vorbohrersystem (83,3%). Bei der Entfernung der Guttapercha mit einem überlangen Rosenbohrer zeigte sich ein adhäsives Versagen zwischen Komposit und Dentin hingegen nur bei 10 % der Proben (Tab. VI). Der Unterschied in den Versagensmodi zwischen den

Präparationsarten erwies sich im Chi-Quadrat-Test nach Pearson als signifikant ($p < 0,0005$).

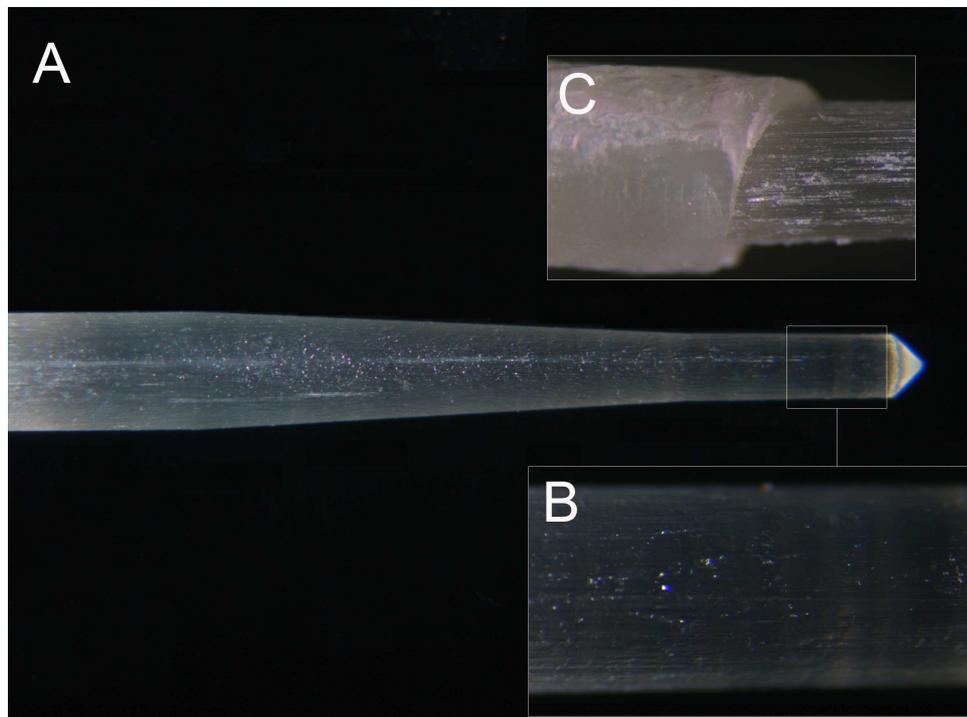


Abb. 25 (A-C) Dargestellt ist der transluzente DT Light Post bei 0,8-facher (A) und 5-facher (B) Vergrößerung vor dem Auszugsversuch. Zu erkennen ist die glänzende SL-Beschichtung. Nach dem Pull-out-Test zeigt die aufgeraute Stiftoberfläche bei 3,2-facher Vergrößerung (C) einzelne freigelegte Quarzfasern und anhaftende Zementreste (1,0 x Objektiv).

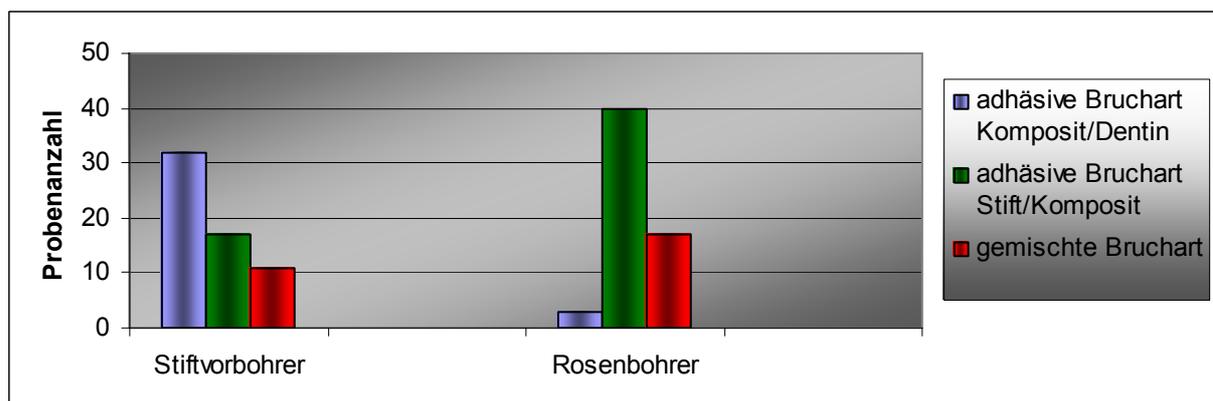


Abb. 26 Grafische Darstellung der Versagensmodiverteilung in den Präparationsgruppen.

Bei Faserstiften, die mit CoreX Flow befestigt wurden, zeigte sich die adhäsive Bruchart zwischen dem Faserstift und Befestigungskomposit am häufigsten (75 %), wobei in der Rosenbohrer-Gruppe dieser Versagensmodus öfter (93,4 %) vertreten war als in der Vorbohrergruppe (56,7 %) (Tab. VI). Die Verteilung der Versagensmodi war

auch hier zwischen den Präparationsmethoden signifikant unterschiedlich ($p = 0,006$; Chi-Quadrat-Test nach Pearson).

5.3 Ergebnisse zum Einfluss der Reinigungsmethoden auf die Sauberkeit der Stiftbettkavität

Die Sauberkeit der Wurzelkanalwände wurde nicht durch die angewandten Reinigungsmethoden beeinflusst ($p = 0.618$; Chi-Quadrat-Test nach Pearson). In der Tabelle VII ist die prozentuale Probenverteilung in jeder Reinigungsgruppe anhand der ermittelten Sauberkeitsgrade dargestellt. Man erkennt, dass weder die Bürsten- noch die Sandstrahl-Gruppe bessere Ergebnisse im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigten.

Tabelle VII: Prozentuale Verteilung der Proben jeder Reinigungsgruppe anhand ihrer Sauberkeitsgrade

Reinigungsmethode	Sauberkeit der Stiftbettkavitäten in %			
	I	II	III	IV
	sauber	kleine Sealer-rückstände	größere Sealer-rückstände oder kleine Sealerrückstände in Kombination mit kleinen apikalen Guttapercharesten	größere Sealerrückstände in Kombination mit apikalen Guttapercharesten
Kontrolle	27.5	45	12.5	15
Bürsten	22.5	37.5	27.5	12.5
Sandstrahlen	32.5	30	25	12.5

In der Abbildung 27 sind die am OP-Mikroskop bei 23-facher Vergrößerung erstellten Beispielbilder für die einzelnen Sauberkeitsgrade zu sehen. Besonders häufig zeigten sich Reste von Wurzelfullmaterialen in unter sich gehenden Bereichen. Bei solchen Regionen handelte es sich oft um Preparationsspuren, die während der

Instrumentierungen der Wurzelkanäle entstanden sind. Einzelne Proben wiesen darüber hinaus geringe Bimsmehlrückstände an Kavitätenböden auf.

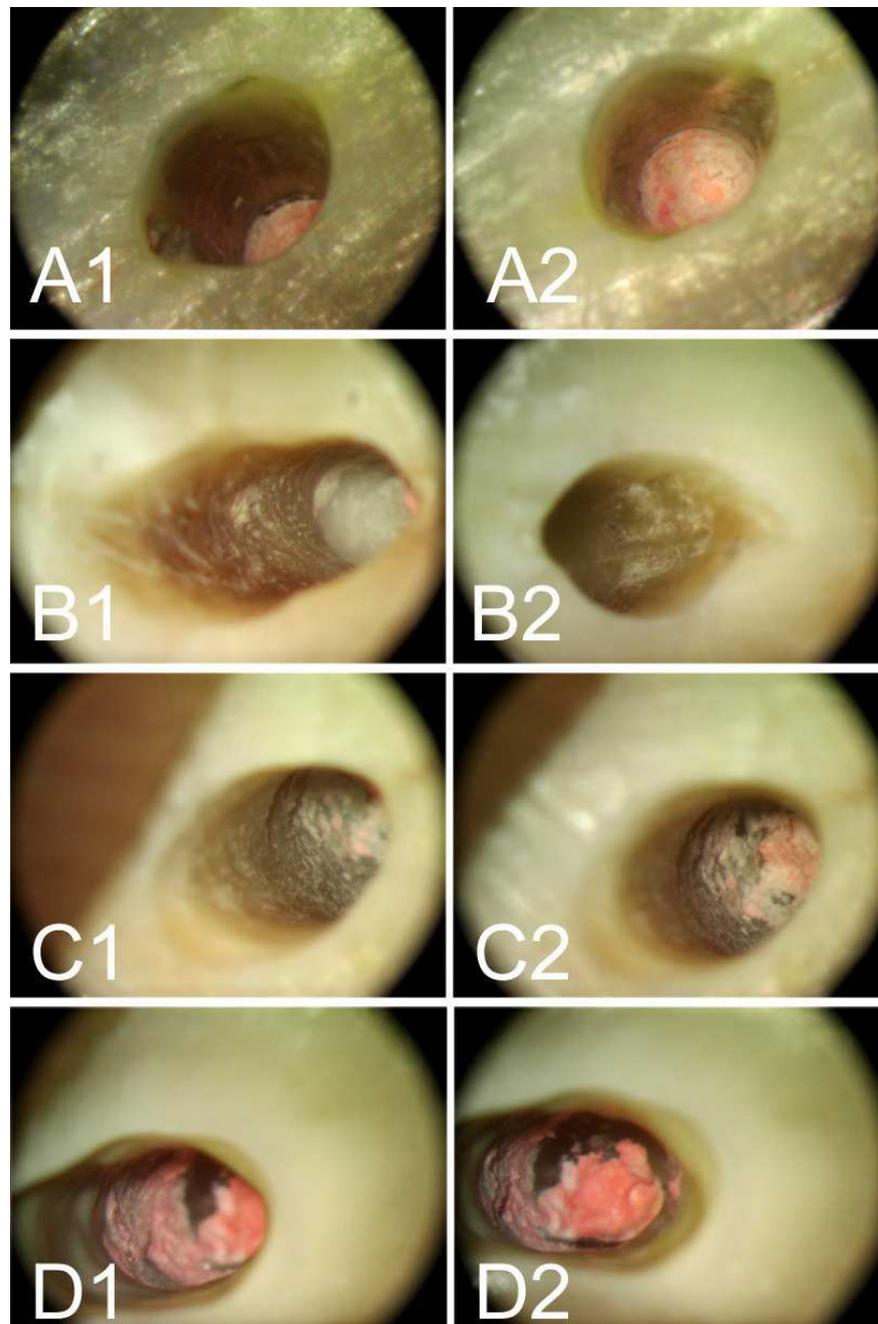


Abb. 27 (A-D) Übersicht über das Score-System mit je zwei Beispielen zu einem Sauberkeitsgrad; A1 und A2: saubere Stiftbettkavität mit morphologischen Ausbuchtungen der Wurzelkanäle (Gruppe I); B1 und B2: einzelne Sealereste entlang der Kanalwände (Gruppe II); C1 und C2: einzelne Guttaperchareste am Kavitätenboden mit Sealerrückständen an den Kanalwänden (Gruppe III); D1 und D2: apikale Guttaperchareste mit Sealerrückständen in unter sich gehenden Gebieten der Kanalwände nach der Stiftbettpräparation mit einem überlangen Rosenbohrer (Gruppe IV).

5.4 Ergebnisse der qualitativen Analyse mit dem REM

5.4.1 Der Vergleich zwischen den Reinigungsmethoden

In allen Reinigungsgruppen sind kontrastreiche Rückstände von Wurzelfüllmaterialien entlang den Kanalwänden beobachtet worden. Die Abbildung 28 zeigt ein Bild solcher Rückstände am Beispiel einer Probe aus der Kontrollgruppe.

Das Abstrahlen der Stiftbettkavitäten mit Al_2O_3 -Partikeln hinterließ auf voller Länge der Stiftbettpräparationen (8 mm) aufgeraute Wurzelkanalwände mit vielen eröffneten Dentintubuli. Die Bimsmehlreinigung konnte hingegen weniger effektiv zur Entfernung der Schmierschicht beitragen. In der Abbildung 29 ist ein Vergleich zwischen den einzelnen Reinigungsgruppen dargestellt. Man erkennt deutliche Dentinaussprengungen in den Kanalwänden bei sandgestrahlten Proben. Jedoch stellen sich keine Unterschiede zwischen der Bürstchen- und Kontrollgruppe dar.

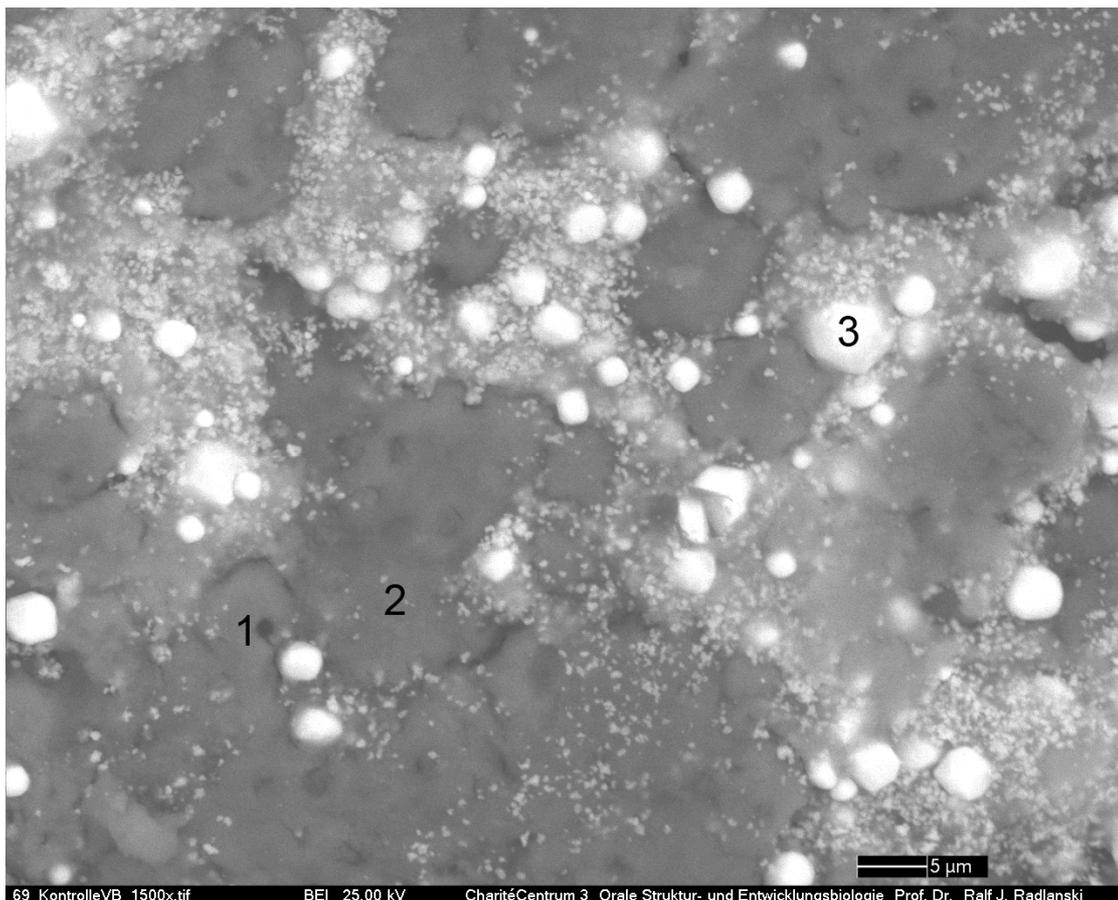


Abb. 28 Wurzelkanaloberfläche einer Probe aus der Kontrollgruppe bei 1500-facher Vergrößerung. Zu erkennen sind nur wenige offene Dentintubuli (1). Die meisten sind von der Schmierschicht (2) und den Sealerrückständen (3) bedeckt.

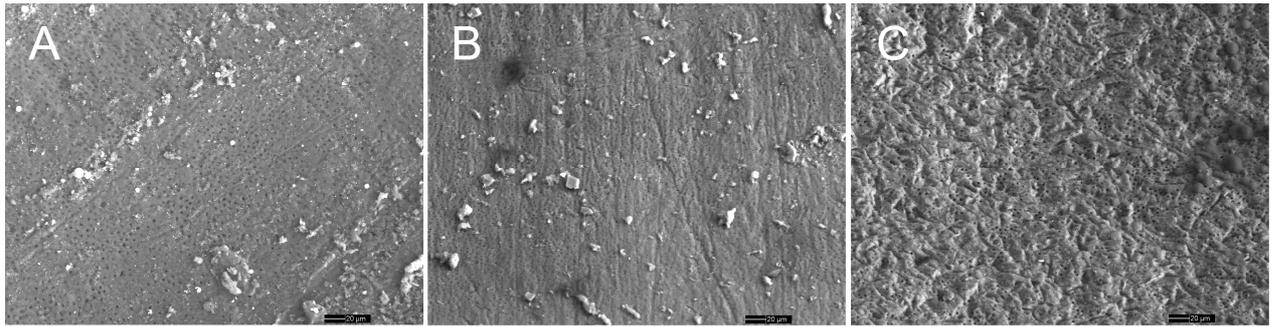


Abb. 29 Vergleich der Wurzelkanaloberflächen aller Reinigungsgruppen bei 300-facher Vergrößerung. Die Kanalwand der Sandstrahl-Gruppe (C) ist im Vergleich zu der Bürstchen- (B) und Kontrollgruppe (A) aufgeraut. Darüber hinaus enthält sie in dieser exemplarischen Abbildung weniger Sealerrückstände.

5.4.2 Der Vergleich zwischen den Präparationsarten

Die Oberfläche der Wurzelkanalwände zeigte bei Proben der Rosenbohrer-Gruppe neben den gehäuft anzutreffenden Präparationsriefen auch unter sich gehende Bereiche (Abb. 30). Die Präparationsspuren des Stiftvorbohrersystems waren feiner und erreichten eine vergleichsweise geringere Tiefe. Auch wurden Unterschnitte nur selten beobachtet (Abb. 31).

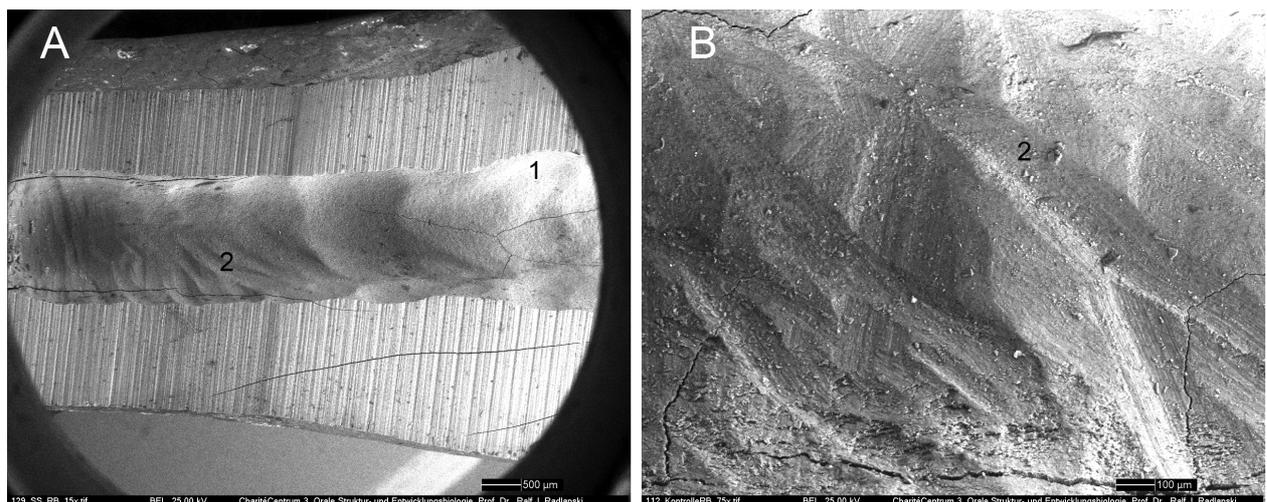


Abb. 30 Die Kanalwand nach der Stiftbettpräparation mit einem überlangen Rosenbohrer bei 15-facher (A) und 75-facher (B) Vergrößerung. Zu erkennen sind Unterschnitte (1) und Präparationsriefen (2).

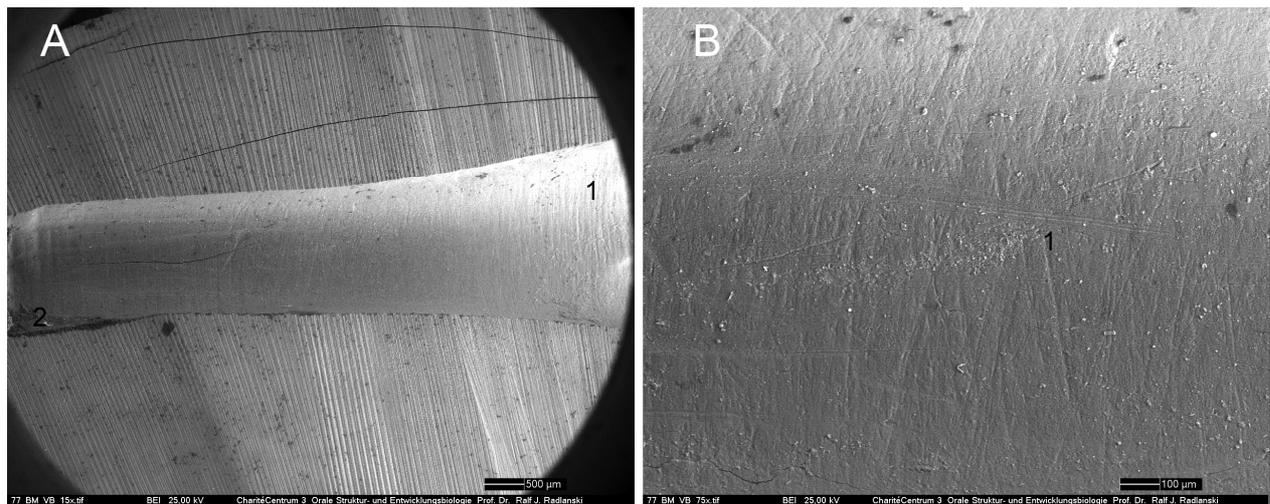


Abb. 31 Die Kanalwand nach der Stiftbettpräparation mit dem Vorbohrersystem bei 15-facher (A) und 75-facher (B) Vergrößerung. Zu erkennen sind oberflächliche Präparationsspuren (1) und ein apikaler Unterschnitt (2).

5.5 Ergebnisse der CLSM-Untersuchung

Es wurde kein Einfluss der Reinigungsmethoden auf den Dentin-Komposit-Verbund bei der CLSM-Analyse von zwei exemplarischen Proben aus jeder Gruppe festgestellt. Rückstände von Wurzelfüllmaterialien konnten in jeder Reinigungsgruppe beobachtet werden (Abb. 32).

Die verwendeten Befestigungsmaterialien zeigten hingegen Unterschiede in der adhäsiven Verbundzone zwischen Befestigungskomposit und Wurzelkanaldentin. Beim Aufbaukomposit CoreX Flow in Verbindung mit dem Adhäsivsystem XP Bond/Self-Cure Activator stellte sich im Gegensatz zu dem selbstadhäsiven Befestigungszement SmartCem2 eine ausgeprägte Hybridschicht mit vielen Tags dar (Abb. 33-34). SmartCem2 penetrierte hingegen nur vereinzelt und oberflächlich in die Dentintubuli (Abb. 35).

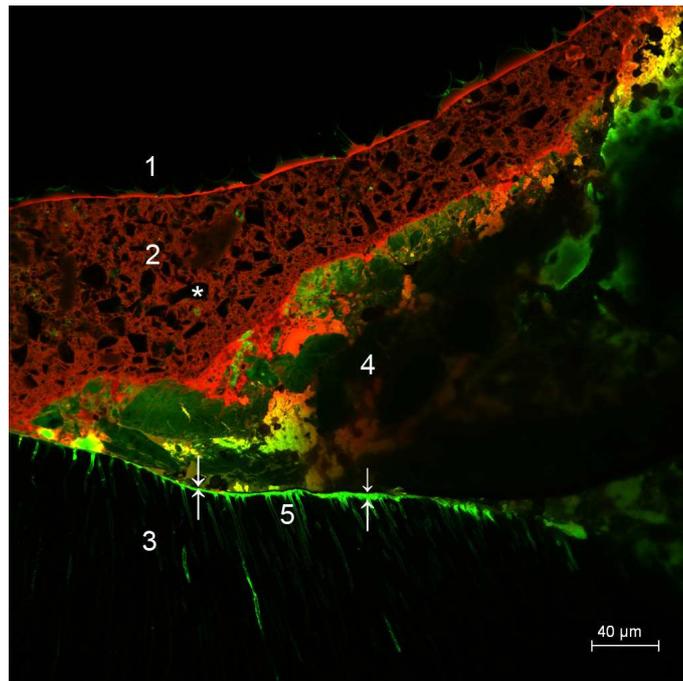


Abb. 32 Aufnahme der Verbundschicht von CoreX Flow/XP Bond (40-fach-Objektiv und 1-fach Zoom). Zu erkennen sind der Faserstift (1), das rot angefarbte Komposit (2) mit den Füllkörpern (*) und das Wurzelkanalentin (3). Die Pfeile zeigen auf das grün angefarbte Adhäsiv, welches sich unter den Guttapercha- und Sealerrückständen (4) entlang der Kanalwand ausgebreitet hat. Darüber hinaus penetrierte es in mehrere Dentintubuli (5). Die Reste der Wurzelfüllmaterialien trennen das Adhäsiv vom Komposit. Die Hybridschicht ist nicht ausgebildet.

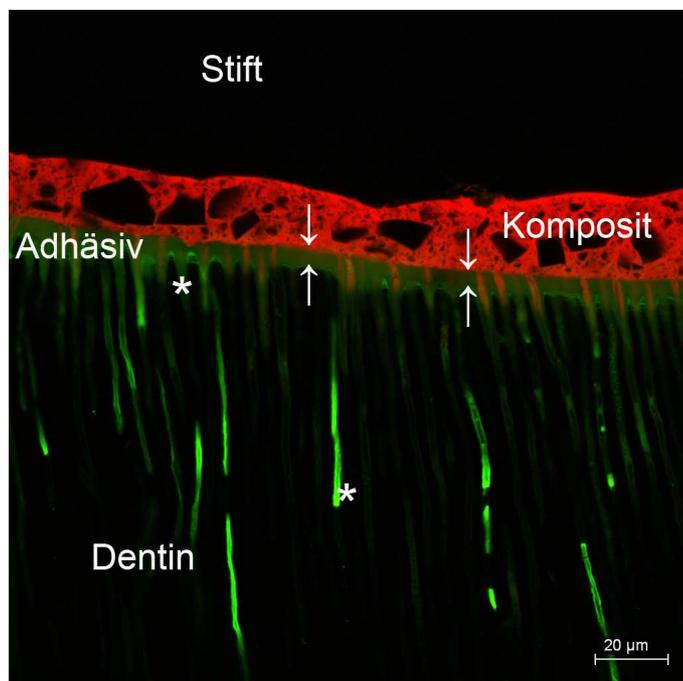


Abb. 33 Aufnahme der Verbundschicht von CoreX Flow/XP Bond (40-fach-Objektiv und 2-fach Zoom). Die Pfeile zeigen auf die Hybridschicht, die Sterne markieren die langen Tags. Die Dentintubuli sind in diesem Beispiel vor allem mit dem Adhäsiv gefüllt; nur an den Tubulieingängen sind rote Ausläufer des Befestigungskomposites zu erkennen.

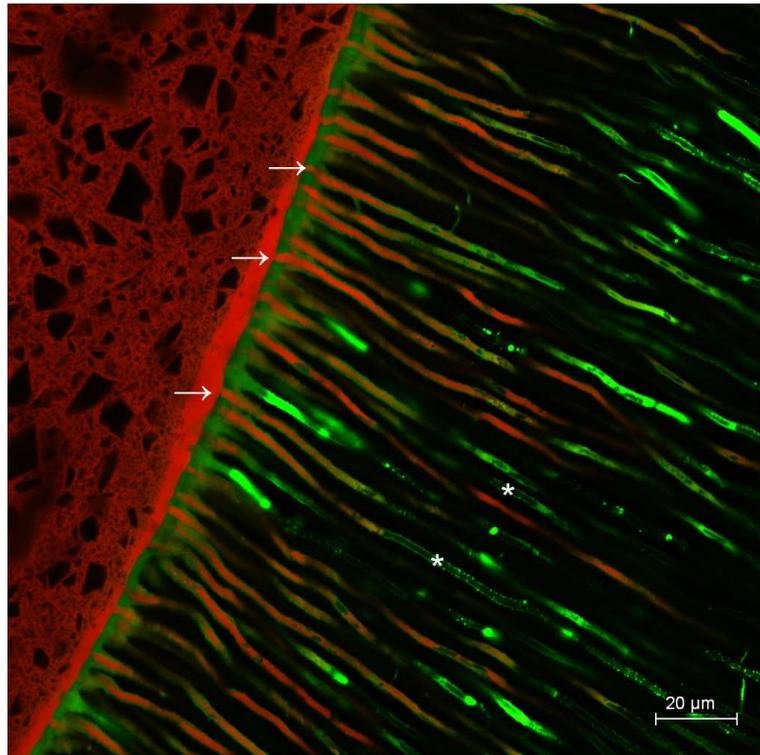


Abb. 34 Aufnahme der Verbundschicht von CoreX Flow/XP Bond (40-fach-Objektiv und 2-fach Zoom). Die Pfeile zeigen auf Kompositausläufer, die zusammen mit dem Adhäsiv tief in die Dentintkanälchen penetrieren. Die Sterne markieren Hohlräume in den Tags.

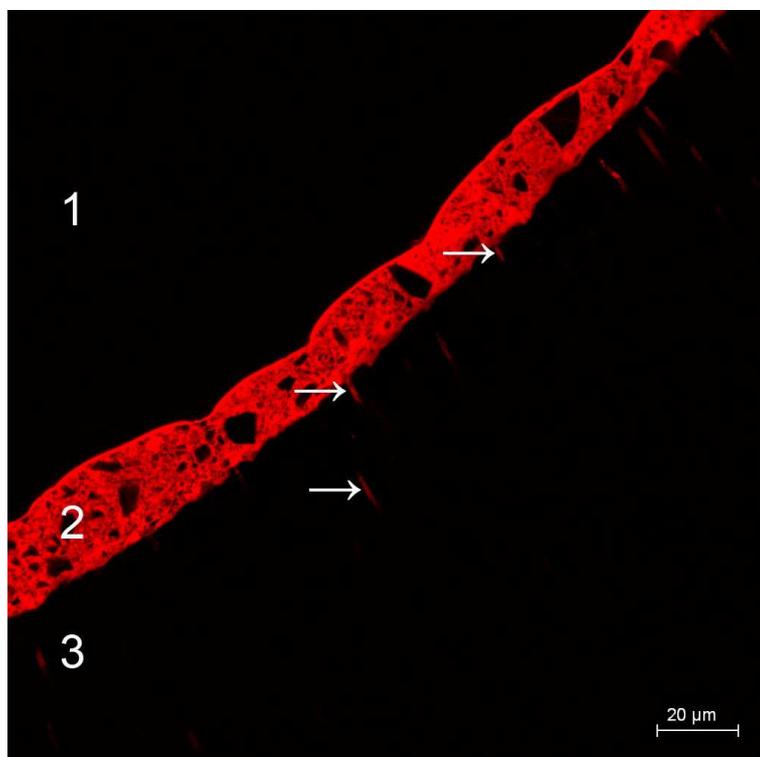


Abb. 35 Aufnahme der Verbundschicht von SmartCem2 (40-fach-Objektiv und 2-fach Zoom). Die Zementfuge (2) befindet sich zwischen Stift (1) und Dentin (3). Vereinzelt kurze Tags sind durch Pfeile gekennzeichnet. Eine Hybridschicht ist nicht erkennbar.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methode

6.1.1 Probenzähne

Für die vorliegende Studie wurden extrahierte humane Zähne verwendet. Obere Canini der zweiten Dentition wurden nach festgelegten Ausschlusskriterien ausgesucht um eine Vergleichbarkeit unter den Proben zu gewährleisten. So wiesen alle Zahnwurzeln einen ausschließlich geraden Verlauf mit einem nicht obliterierten Kanallumen auf. Dennoch sind individuelle Unterschiede zwischen den einzelnen Probenzähnen, die zu größeren Standardabweichungen der Retentionswerte führen können, nicht auszuschließen. Dentin unterliegt neben den chemischen und physikalischen Einflüssen auch physiologischen Alterungsprozessen. Mit zunehmendem Lebensalter kommt es zu einer Anlagerung von Sekundärdentin an die Wurzelkanalwände sowie zu einer Abnahme der Tubulanzahl und -lumina [Schroeder und Scherle 1988]. Komposite zeigen verminderte Haftwerte [Yoshiyama *et al.* 1996] sowie eine dünnere Hybridschicht und kürzere Kunststoffzapfen [Prati *et al.* 1999] am sklerosierten Dentin. Zum unterschiedlichen Alter der untersuchten Zähne kommt auch die individuell stark variierende Verteilung von Dentintubuli innerhalb eines Wurzelkanals hinzu [Schröder 1992]. In einer aktuellen Studie zum Wurzelkanalsystem der oberen Eckzähne konnten u. a. Unterschiede in der Morphologie und dem Vorhandensein von akzessorischen Kanälen aufgezeigt werden [Uchiyama *et al.* 2011]. Inwiefern chemische und mikrostrukturelle Dentinvariationen die Verbundfestigkeit adhäsiver Kompositmaterialien beeinflussen, ist nicht hinreichend geklärt [Duke und Lindemuth 1991].

Um eine ausreichende Gruppengröße zur Verringerung der Streuung zu erreichen, wurde eine hohe Anzahl von Proben benötigt. Aus diesem Grund war es nicht möglich, eine ausreichende Menge an frisch extrahierten oberen Eckzähnen innerhalb eines kurzen Zeitraums zu rekrutieren, sodass auf bereits gesammelte Zähne zurückgegriffen werden musste. Mehrere Autoren konnten keinen Zusammenhang zwischen Lagerungsdauer der Zähne nach Extraktion und den erzielten Haftwerten feststellen [Finger 1988; Blunck *et al.* 1990; Goodis *et al.* 1993; Lee *et al.* 2007]. Untersuchungen von Beech *et al.* zeigten jedoch eine signifikant geringere Haftfestigkeit von adhäsiv befestigten Brackets auf länger gelagerten Dentinoberflächen gegenüber Proben, auf denen die Brackets bereits 20 Minuten nach der Extraktion befestigt wurden [Beech *et al.* 1991]. Haller *et al.* und Tittley *et al.* stellten darüber hinaus fest,

dass Lagerungsmedien Einfluss auf die Hafteigenschaften von Zahnhartsubstanzen haben [Haller *et al.* 1993; Titley *et al.* 1998]. Die Aufbewahrung in 0,5%iger Chloramin-T-Lösung bei Zimmertemperatur führt jedoch zu keiner signifikanten Beeinflussung der Zahnhartgewebe [Haller *et al.* 1993; Lee *et al.* 2007], sodass diese Lösung in der vorliegenden Untersuchung für die Lagerung der Zähne nach der Extraktion bis zu ihrer Weiterverarbeitung verwendet wurde. Um der bakteriellen Kontamination entgegenzuwirken, wurde das Lagerungsmedium wöchentlich gewechselt. Während der Versuchsdurchführung wurden die Proben analog der Studie von de Durao Mauricio *et al.* in Aqua dest. aufbewahrt um eine Austrocknung der Zahnhartsubstanzen zu vermeiden [de Durao Mauricio *et al.* 2007]. Eine Beeinflussung des Wurzelkanalodontins durch dieses Lagerungsmedium ist als eher gering einzustufen [Lee *et al.* 2007].

6.1.2 Endodontische Behandlung der Zahnwurzeln

Eine Vergleichbarkeit der Proben untereinander konnte nur durch ein standardisiertes Vorgehen bei der Wurzelkanalbehandlung gewährleistet werden. Die Aufbereitung der Kanäle bis zur ISO-Größe 60 entsprach der Forderung von Uchiyama *et al.*, eine ausreichende apikale Reinigung sicherzustellen [Uchiyama *et al.* 2011]. Die anschließenden Wurzelkanalfüllungen erfolgten mit Guttapercha und einem eugenolfreien, kunstharzhaltigen Sealer (2Seal). Die Verwendung von solchen Sealern wird empfohlen, wenn eine adhäsive Wurzelstiftbefestigung folgen soll [Hagge *et al.* 2002a; Baldissara *et al.* 2006]. Eugenolhaltige Wurzelfüllpasten haben hingegen einen negativen Einfluss auf den adhäsiven Haftverbund [Hagge *et al.* 2002b; Baldissara *et al.* 2006].

6.1.3 Stiftbettpräparationen und Reinigungen der Stiftbettkavität

Da klinische Bedingungen simuliert werden sollten, erfolgten die Präparationen und Reinigungen der Stiftbettkavitäten am Phantomkopf unter Verwendung einer Lupe. Um einen Wechsel der Behandlungs- bzw. der Phantomkopfposition und dadurch unterschiedliche Sichtverhältnisse zu vermeiden, wurden alle Eckzahnwurzeln in den Alveolen der Schneidezähne (Regio 12 bis 22) eines Oberkiefermodells fixiert. Auch war eine Drehung der Proben, um Rückstände von Wurzelfüllmaterialien besser zu erkennen, nicht möglich.

Die Stiftbettpräparation mit überlangen Rosenbohrern ist als eine minimal-invasive Präparationsart von Krastl *et al.* in der Literatur vorgestellt worden [Krastl 2007; Krastl *et al.* 2008]. Da ein geringer Dentinabtrag bei der Herstellung der Stiftbettkavität für die Frakturstabilität eines Zahnes von enormer Wichtigkeit ist [Trope *et al.* 1985; Sidoli *et al.*

1997; Schwartz und Robbins 2004], erschien diese Methode für die vorliegende Studie als sinnvoll. Zum Vergleich wurde bei der Hälfte der Proben die Stiftbettpräparation mit dem Vorbohrersystem durchgeführt. Die Wasserkühlung wirkte dabei der Wärmeentwicklung entgegen, so wie es bei der mechanischen Guttaperchaentfernung auch gefordert wird [Saunders und Saunders 1989; Lipski *et al.* 2010].

Sowohl das Abstrahlen des Dentins mit Aluminiumoxidpartikeln [Zappini und Seitner 2005; Kianusch 2009; Etienne und Schoeffler 2010] als auch die Anwendung von rotierenden Wurzelkanabürstchen mit feuchtem Bimsmehl [Krastl 2007; Krastl *et al.* 2008; Bitter *et al.* 2010] haben bereits als Reinigungsmethoden der Stiftbettkavität Erwähnung in der Literatur gefunden. In den Vorversuchen wurde die passende Bürstchengröße (Größe 12) für die Durchmesser der Stiftbettpräparationen ausgewählt. Die Druckeinstellung (40 psi) und die Al₂O₃-Partikelgröße (50 µm) wurden anhand der Untersuchungsergebnisse einer Studie von Chaiyabutr *et al.* festgelegt, in der Rückstände eines provisorischen Zementes von Zahnstümpfen durch das Sandstrahlen effektiv entfernt worden waren [Chaiyabutr und Kois 2008]. Eine 1%ige Natriumhypochloritlösung wurde in der Kontrollgruppe nach der Stiftbettpräparation eingesetzt.

Die abschließende Spülung mit 5 ml 0,9%iger Kochsalzlösung diente der Entfernung von Bimsmehl- und Aluminiumoxidpartikeln sowie der NaOCl-Lösung aus den Stiftbettkavitäten. Dennoch könnten einzelne Reinigungspartikel an den Wurzelkanalwänden sowie Überreste des Natriumhypochlorits in den Dentinkanälchen verbleiben und den Haftverbund zum Wurzelkanaldentin beeinflussen [Nikaido *et al.* 1999; Erdemir *et al.* 2004b]. In Ausstoßversuchen von Ernst *et al.* führten Desinfektionsmaßnahmen mit NaOCl (1%ig) vor dem Ätzvorgang zu strukturellen Veränderungen der Dentinoberfläche und damit zu einem erheblichen Rückgang der Dentinhaftwerte der untersuchten Adhäsivsysteme [Ernst *et al.* 1999]. In einer anderen Studie wurde geätztes Dentin mit NaOCl (5%ig) gespült, wobei auch hier ein Absinken der Werte bestätigt wurde [Frankenberger *et al.* 2000]. Gwinnett konnte hingegen in Abscherversuchen für geätztes, mit NaOCl (5%ig) befeuchtetes Dentin keine Verminderung der Scherhaftungswerte nachweisen. Bei nicht geätztem Dentin war jedoch eine Reduktion der Werte zu verzeichnen [Gwinnett 1994]. Die Verschlechterung des adhäsiven Verbundes durch die Anwendung von Natriumhypochlorit (5%ig) kann auch auf das Wurzelkanaldentin übertragen werden [Ari *et al.* 2003; Erdemir *et al.* 2004a]. In einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung von Mannocci *et al.* wurde gezeigt, dass durch die NaOCl-Spülung (2,5%ig) während der Wurzelkanalaufbereitung die Ausbildung der Hybridschicht und der Kunststoffzapfen behindert wird [Mannocci *et al.* 1999b]. Beim Einsatz einer 5,25%igen NaOCl-Lösung kann zwar der Smear layer entfernt werden, jedoch verbleiben viele Schmierpropfen in

den Dentintubuli [Gu *et al.* 2009]. Zu beachten ist jedoch, dass sowohl die Kontaktzeit der Spüllösung [Perdigao *et al.* 2000] als auch die unterschiedlich starke Interaktion des jeweiligen Adhäsivsystems mit dem NaOCl [Pioch *et al.* 1999; Sterzenbach 2010] Einfluss auf die Haftkraft nehmen.

6.1.4 Die Observation der verunreinigten Wurzelkanalwände

Alle Überreste von Wurzelfüllmaterialien waren am OP-Mikroskop bei einer 23-fachen Vergrößerung gut aufzufinden. Um keine verunreinigten Bereiche zu übersehen, wurden die Zahnwurzeln bei der Observation in der Hand gehalten und gedreht. Die Bimsmehlrückstände waren grau und leicht von den weißen Sealerresten zu unterscheiden. Es wiesen aber nur einzelne Stiftbettkavitäten solche Verunreinigungen auf, sodass diese nicht mit in die Score-Einteilung einbezogen wurden. Eine Unterscheidung zwischen verbliebenen Al_2O_3 -Partikeln und Sealerrückständen konnte dagegen nicht erfolgen. Beide stellten sich als weiße Verunreinigungen am Kavitätenboden dar, sodass entstandene Verwechslungen nicht auszuschließen waren. Der Einsatz eines OP-Mikroskops wird für die Ermittlung des Verunreinigungsgrades von Wurzelkanälen nach der Entfernung der Wurzelfüllung in der Literatur empfohlen [Schirrmeyer *et al.* 2006]. Auch wird das REM zur Begutachtung der Kanaloberfläche oft verwendet [Mandel *et al.* 1990; Serafino *et al.* 2004; Serafino *et al.* 2006].

Für die Beurteilung der Verunreinigung wurde ein Score-System anhand der Observationen in den Vorversuchen erstellt. In der Literatur existieren nur wenige Studien über die Verteilung der Wurzelfüllmaterialrückstände entlang den Kanalwänden nach einer Stiftbettpräparation [Rovatti und Dallari 1996; Serafino *et al.* 2004; Serafino *et al.* 2006]. Die Score-Systeme dieser Untersuchungen konnten aufgrund eines unterschiedlichen Studiendesigns in der vorliegenden Arbeit nicht angewandt werden.

Die Bewertung der Verunreinigung anhand des Score-Systems erfolgte durch einen geschulten Zahnarzt, der keine Kenntnisse über die Vorbehandlung der jeweiligen Zahnwurzel besaß. Nur so konnte ein gegenüber einer Reinigungsmethode voreingenommenes Beurteilen ausgeschlossen werden. Um die Wirksamkeit der angewandten Methoden besser zu bewerten, hätte eine zusätzliche Observation der Stiftbettkavitäten vor der Reinigung stattfinden sollen. Dies stellt eine Limitation der vorliegenden Studie dar.

6.1.5 Adhäsive Befestigung der Faserstifte

Aufgrund der in der Literatur beschriebenen Vorteile ist der *DT Light Post SL* für die Untersuchung ausgewählt worden. Neben seiner doppelkonischen Form und der vorkonditionierten Oberfläche weist dieser Quarzfaserstift eine optimale Lichtleitfähigkeit auf [Zappini und Seitner 2005]. Des Weiteren zeigt er eine hohe Frakturresistenz [Sahafi *et al.* 2004], die mit seiner großen Faserdichte (32 Fasern/mm²) erklärt werden könnte [Grandini *et al.* 2005b].

Für die Zementierung wurden zwei unterschiedliche Befestigungskomposite verwendet. Wegen der kontroversen Ergebnisse in der Literatur [Goracci *et al.* 2005c; Bitter *et al.* 2006a] sollte geprüft werden, ob mit der Verwendung eines Aufbaukomposites (CoreX Flow) in Kombination mit einem Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem (XP Bond/Self-Cure Activator) höhere Haftfestigkeitswerte zu erreichen sind als mit einem selbstadhäsiven Befestigungszement (SmartCem2). Um störende chemische Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten auszuschließen, wurde der von dem Hersteller des Aufbaumaterials empfohlene Dentinhaftvermittler entsprechend den Herstellerangaben eingesetzt. Zum Auftragen des Adhäsivsystems wurden für den Wurzelkanal geeignete Microbrush-Applikatoren (*Root Canal Applicator Tips*) verwendet, die vom Hersteller mitgeliefert werden. Ferrari *et al.* untersuchten in einer rasterelektronenmikroskopischen Studie verschiedene Applikationsformen der Adhäsive für die Befestigung der Faserstifte. Wurden „Microbrush Plus“ zur Applikation des Dentinhaftvermittlers verwendet, zeigte sich eine sehr gleichmäßig ausgeprägte Hybridschicht mit einer signifikant erhöhten Kunststoffzapfenanzahl [Ferrari *et al.* 2001]. Der lange, schmale und biegbare Halter dieser kleinen Applikatoren gestattet das Auftragen einer gleichmäßigen und kontrollierten Menge des Adhäsivs in der gesamten Stiftbettkavität [Ferrari *et al.* 2002a; Ferrari *et al.* 2002b].

Um möglichst homogene Kompositfugen zu erhalten, wurden die Befestigungskomposite mithilfe von speziellen vom Hersteller mitgelieferten Applikationskanülen, die auf die Doppelkammerspritzen aufgesetzt wurden, in die Wurzelkanäle eingebracht. In einer Untersuchung von Watzke *et al.* konnten mit ähnlichen Verlängerungskanülen (3M ESPE) nahezu blasenfreie Zementfugen erreicht werden [Watzke *et al.* 2008]. Beim freihändigen Anmischen des Befestigungskomposites besteht die Gefahr des Einmischens von Luftblasen in das Material. Dies verringert die Qualität des Kunststoffes und mindert die Kontaktflächen des Haftverbundes [Sanares *et al.* 2001].

Das Einsetzen der Faserstifte erfolgte mit der Hand in die Mitte der präparierten Stiftbettkavitäten. Die entstandenen Zementfugen wiesen daher zirkulär nur näherungsweise einheitliche Breiten auf. Dieses Vorgehen war bereits aus anderen

Studien bekannt [Hagge *et al.* 2002c; Perdigao *et al.* 2007; Schmage *et al.* 2009a]. Zur Kontrolle der Stiftpassung wurde bei allen Proben ein bei 8 mm markierter *DT Light Post SL* (Größe 3) einprobiert. So konnte insbesondere bei der Rosenbohrer-Gruppe das Erreichen der Zementierungstiefe sichergestellt werden. Bei der Vermessung von Kompositresten nach den Auszugsversuchen ist die Insertionstiefe noch einmal überprüft worden.

Da dualhärtende Befestigungskomposite höhere Haftwerte bei zusätzlicher Lichtpolymerisation zeigen [Piwowarczyk *et al.* 2007], erfolgte nach der Überschussentfernung eine 20-sekündige Lichthärtung. Die vom Hersteller empfohlene Mindestlichtleistung von 550 mW/cm² wurde eingehalten (gemessene Lichtleistung der verwendeten Polymerisationslampe mit *bluephase meter*: 890 mW/cm²).

6.1.6 Die Anwendung des Zugversuches zur Ermittlung der Retention faserverstärkter Wurzelkanalstifte

Von Wurzelkanalstiften wird eine langfristige Retention im Wurzelkanal gefordert [Schönbrodt *et al.* 2003; Sen *et al.* 2004]. Der Pull-out-Test wird zur Ermittlung der Retention bzw. der Haftfestigkeit von intrakanalären Stiften im Wurzelkanal als eine gängige Testmethode angewandt [Love und Purton 1996; Purton *et al.* 1998; Gallo *et al.* 2002; Nergiz *et al.* 2002; Hagge *et al.* 2002c; Schönbrodt *et al.* 2003; Sen *et al.* 2004; Schmage *et al.* 2009a; Castellan *et al.* 2010], die den Vorteil bietet, die Haftung des Stiftes über die gesamte Länge des Wurzelkanals zu untersuchen. Mit dieser Testmethode wird auch die Effektivität diverser Vorbehandlungen der Stiftoberflächen sowie des Wurzelkanal Dentins überprüft [Schmage *et al.* 2009a; Schmage *et al.* 2009b]. Jedoch erfordert sie eine Vielzahl an Faserstiften und verursacht damit hohe Kosten [De Santis *et al.* 2000; Prisco *et al.* 2003].

Auch der axiale Push-out-Test ist eine gängige Methode, die Haftkraft der Faserstifte zum Wurzelkanal Dentin zu bestimmen [Soares *et al.* 2008]. Die einwirkenden Ausstoßkräfte während dieser Untersuchung sollen jedoch nicht einer funktionellen Belastung, die während der klinischen Gebrauchsperiode auftritt, entsprechen [Radovic *et al.* 2008a]. Darüber hinaus können durch das Schneiden der Proben in der Vorbereitung des Versuches Artefakte entstehen, welche die Studienergebnisse beeinflussen. Um den Einfluss der Reinigungsmethoden und der Präparationsarten auf die Retention von faserverstärkten Wurzelkanalstiften zu bestimmen, erschien daher die Verwendung des axialen Auszugsversuches als sinnvoll.

Die gemessenen Retentionswerte mit dem Pull-out-Test sind abhängig von der Form, Länge, Oberflächenbeschaffenheit und dem Durchmesser des Stiftes [Standlee

et al. 1978; Assif und Ferber 1982]. Daher wurde nur ein Stifttyp (*DT Light Post SL*) mit einer den Wurzelkanaldurchmessern entsprechenden Größe (Größe 3) verwendet und eine Zementierungstiefe von 8 mm bei allen Zahnwurzeln eingehalten.

Die Realisierung rein axial gerichteter Kräfte auf den Probekörper ist eine wichtige Voraussetzung zur Erzielung reproduzierbarer Ergebnisse [Habenicht 1990]. Während die axiale Krafteinwirkung zur Stiftachse gleichmäßig auf die Verbundfläche einwirkt, kommt es durch nicht-axiale Kräfte (Scherkräfte) zu einem ungleichmäßigen Belastungsmuster in der Verbundzone [Habenicht 1990] und in der Folge zu höheren Messwerten. Die Abzugsvorrichtung in der vorliegenden Studie erforderte eine absolut axiale Positionierung der intrakanalären Stifte in den Probekörpern. Die recht aufwendige Einbettprozedur mit dem Parallelometer gewährleistete eine Parallelität zwischen den Stiftlängsachsen und den zylindrischen Probekörperanteilen, die im weiteren Versuchsablauf in der Zwick-Universalprüfmaschine eingespannt wurden. Durch eine senkrechte Positionierung des Hakenschlüssels zu den Prüfkörpern bei der Herstellung der Abzugshaken konnten die Faserstifte axial aus den Probekörpern herausgezogen werden. Der Einsatz des Parallelometers war aus einer Studie von de Duraõ Mauricio *et al.* bekannt, jedoch verwendeten die Autoren diesen, um Wurzelstifte mittig in die Stiftbettkavitäten zu zementieren [de Duraõ Mauricio *et al.* 2007]. Hagge *et al.* sowie Love und Purton erreichten in ihren Abzugskraftmessungen die axiale Krafteinwirkung auf die intrakanalären Stifte ebenfalls durch eine Zentrierung der Stift-Wurzel-Einheit in einen Kunststoffzylinder nach der Stiftinsertion [Love und Purton 1996; Hagge *et al.* 2002c].

Die Abbindereaktion von Kunststoffeintrittmassen erfolgt unter erheblicher Temperaturentwicklung. Während der Polymerisation von 15 g des verwendeten Einbettkunststoffes Technovit 4071 werden laut Herstellerangaben Höchsttemperaturen von 108°C gemessen. In Anlehnung an die Studie von Hagge *et al.* wurde die starke Erwärmung der Proben durch eine Lagerung im kalten Wasser reduziert [Hagge *et al.* 2002c]. Inwieweit diese Maßnahme den Haftverbund vor der Erwärmung schützt, ist jedoch nicht bekannt. Darüber hinaus wurde die Zwischenlagerung der Proben in Aqua dest. nach dem Einbetten der Zahnwurzeln bis zu den Auszugsversuchen auf zwei Tage begrenzt, da ein Feuchthalten der Zahnhartsubstanzen in Technovit nicht gewährleistet werden kann.

Oshida und Miyazaki untersuchten den Einfluss der Zuggeschwindigkeit von Abzugsvorrichtungen auf die Dentinhaftung der Komposite [Oshida und Miyazaki 1996]. Abzugsgeschwindigkeiten von mehr als 1 mm/min zeigten negative Auswirkungen auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse infolge kritischer Überlastung der Adhäsivsysteme. Obwohl bei den Abzugskraftmessungen von Wurzelkanalstiften

unterschiedliche Hubgeschwindigkeiten (0,5 mm/min, 1 mm/min, 2 mm/min, 5 mm/min) angewandt wurden [Purton *et al.* 2000; Gallo *et al.* 2002; Nergiz *et al.* 2002; Schönbrodt *et al.* 2003; Yang *et al.* 2010], erschien damit für die vorliegende Untersuchung eine Abzugsgeschwindigkeit von 1 mm/min als sinnvoll.

6.1.7 Die Bestimmung der Versagensmodi

In dieser Arbeit wurde mithilfe des Zugversuches das Verhalten unterschiedlicher, zu einem Verbundsystem zusammengesetzter Materialien betrachtet. Folgende Komponenten waren Bestandteil der Untersuchung: das Wurzelkanalentin, der Verbund zwischen dem Wurzelkanalentin und Befestigungskomposit, das Befestigungskomposit, der Verbund zwischen dem Befestigungskomposit und Faserstift sowie der Faserstift. Weder eine der Zahnwurzeln, noch einer der faserverstärkten Kompositstifte frakturierten unter der Zugbelastung. In dieser Untersuchung lagen die Bruch- und Schwachstellen in den Verbundzonen der untersuchten Materialien.

Castellan *et al.* stellten fest, dass die verwendete Testmethode die Versagensmodi stark beeinflusst. Während bei Verwendung des Pull-out-Tests vor allem der Stift-Komposit-Verbund versagte (70 % der Proben), war beim Push-out-Test eine homogene Verteilung der Versagensmodi zu beobachten [Castellan *et al.* 2010]. Dennoch erschien die Analyse der Bruchmodi für die Ermittlung der Defizite im Haftverbund der untersuchten Befestigungszemente als sinnvoll. Ergänzt wurde diese Analyse durch eine Untersuchung von ausgewählten Proben mit der konfokalen Laser-Raster-Mikroskopie, die ihren Einsatz in der Darstellung der adhäsiven Verbundschicht findet [Watson 1991; D'Souza *et al.* 1999; Pioch *et al.* 2004; Bitter *et al.* 2009b].

Bei der Bruchmodus-Bestimmung wurden zwei zueinander entgegengesetzt liegende Stiftseiten unter einem Stereomikroskop betrachtet und der prozentuale Anteil der vom Komposit bedeckten Stiftoberfläche mit einer transparenten Folie ermittelt. Dieses Vorgehen ist von Wrbas *et al.* beschrieben worden [Wrbas *et al.* 2007]. Darüber hinaus wurden in der vorliegenden Arbeit die zugehörigen Zahnwurzeln halbiert und unter einem Stereomikroskop untersucht. Nur so konnten kohäsive Brüche des Befestigungszementes ausgeschlossen werden. Die Definition der einzelnen Brucharten ist einer Studie von de Duraõ Mauricio *et al.* entnommen [de Duraõ Mauricio *et al.* 2007].

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Der Einfluss der Reinigungsmethode auf die Sauberkeit des Wurzelkanals und die Retention faserverstärkter Kompositstifte

Es ist bekannt, dass die Haftung von Adhäsiven an Dentinflächen, die mit provisorischen Zementresten [Paul und Scharer 1997a] oder Wurzelkanalsealern [Demiryurek *et al.* 2010] kontaminiert sind, reduziert ist. Nach der Stiftbettpräparation verbleiben oft Reste von Wurzelfüllmaterialien an den Kanalwänden [Serafino *et al.* 2004;Perdigao *et al.* 2007]. Eine Reinigung des Wurzelbettes vor der adhäsiven Stiftbefestigung ist daher sinnvoll. Die untersuchten Reinigungsmethoden hatten jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Sauberkeit der Wurzelkanäle (Tab. VII), was den Ergebnissen einer Studie von Caneppele *et al.* entspricht, in der weder durch das Abstrahlen der Proben mit 50 µm Aluminiumoxidpartikeln, noch mit Bimsmehl und Bürstchen Zementreste von Kompositoberflächen effektiv entfernt werden konnten [Caneppele *et al.* 2010]. Die in Kapitel 3 (Ziel der Arbeit und Arbeitshypothese) aufgestellte erste Nullhypothese wurde somit bestätigt. Die Retentionswerte waren aber signifikant von der jeweiligen Reinigungsmethode abhängig (Tab. III).

In der Literatur lassen sich nur wenige Studien zur Reinigungseffektivität des intraoralen Abstrahlens mit Aluminiumoxidpartikeln finden [Abo-Hamar *et al.* 2005; Chaiyabutr und Kois 2008; Caneppele *et al.* 2010], wobei keine Untersuchung sich mit der Anwendung im Wurzelkanal beschäftigt. Die eingeschränkte Zugänglichkeit der Stiftbettkavität für den Sandstrahlansatz sowie die schwer durchzuführende gezielte Lenkung des Sandstrahls auf die verunreinigten Bereiche könnten die fehlende Reinigungswirkung in der vorliegenden Arbeit erklären. Auch war der eingestellte Druck von 40 psi eventuell zu niedrig für die Anwendung im 8 mm tiefen Wurzelbett. Es ist anzunehmen, dass über eine größere Distanz die Al₂O₃-Partikel viel von ihrer kinetischen Energie verloren haben und damit nicht mehr wirkungsvoll die zu säubernden Zahnhartsubstanzoberflächen bearbeiten konnten [Gray *et al.* 2006]. In einer Untersuchung von Chaiyabutr *et al.* zeigte hingegen das Abstrahlen des koronalen Dentins mit 27 µm und 50 µm Aluminiumoxidpartikeln, gefolgt von der Reinigung mit Bürstchen und feuchtem Bimsmehl eine gute Säuberung der Zahnstümpfe von Resten eines provisorischen Zementes [Chaiyabutr und Kois 2008].

Obwohl sich in der REM-Analyse selbst in den apikalen Bereichen deutlich aufgeraute Kanalwände mit effektiv abgetragenen Smear layer sowie viele offene Dentintubuli darstellten, waren die Haftfestigkeitswerte der Faserstifte nicht höher als in der Kontrollgruppe. Mit diesem Ergebnis schließt sich die vorliegende Studie den Aussagen früherer Forschungsarbeiten an [Chaves *et al.* 2002; Abo-Hamar *et al.* 2005;

Franca *et al.* 2007]. Sowohl selbststützende Adhäsivsysteme [Chaves *et al.* 2002; Franca *et al.* 2007] als auch Etch-and-Rinse-Adhäsivsysteme [Abo-Hamar *et al.* 2005] zeigten durch das Sandstrahlen der Dentinoberfläche keine erhöhten Haftkräfte. Im Gegensatz dazu zeigten andere Studien eine bessere Haftung von Kompositen an sandgestrahlten Dentinproben [Mujdeci und Gokay 2004; Motisuki *et al.* 2006; Chaiyabutr und Kois 2008]. Die aufgerauten Zahnhartsubstanzen weisen zwar eine größere Klebe- und Retentionsfläche auf [Los und Barkmeier 1994; Roeder *et al.* 1995; Manhart *et al.* 1999], jedoch sollen neben der Rauigkeit vor allem die physikalischen Parameter (z.B. Kapillarkräfte) sowie die chemische Zusammensetzung der bearbeiteten Zahnflächen für die freie Oberflächenenergie [Attal *et al.* 1994] und damit auch für die Penetration der Adhäsive in das demineralisierte Dentin [Coli *et al.* 1999] ausschlaggebend sein. Andere Autoren konnten, im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, durch das Anrauen der Wurzelkanalwände die Stiftretention steigern. Dabei benutzten die Autoren diamantierte Anrauinstrumente, die eine dicke Schmierschicht auf der Dentinoberfläche hinterließen [Nergiz *et al.* 1997; Balbosh *et al.* 2005; Yang *et al.* 2010].

Die Effektivität der Bimsmehlreinigung wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Während einige Autoren mit einem Gummikelch und feuchtem Bimsmehl Zementreste von präparierten Zahnstümpfen signifikant besser als mit chemischen Reinigungslösungen (z.B. 0,12%iges Chlorhexidindigluconat) oder einem Handinstrument und Wasserspray entfernen konnten [Button *et al.* 1988; Grasso *et al.* 2002; Chaiyabutr und Kois 2008], berichteten andere von widersprüchlichen Ergebnissen, die auf eine schwache Reinigungswirkung dieser Methode hindeuten [Paul und Scharer 1997b; Caneppele *et al.* 2010; Ribeiro *et al.* 2011]. In der vorliegenden Studie erwies sich die Säuberung mit Bimsmehl ebenfalls als nicht wirkungsvoll. Auch konnte in der qualitativen rasterelektronenmikroskopischen Analyse der vorliegenden Arbeit keine effektive Entfernung des Smear layers durch diese Vorbehandlung beobachtet werden, was sich mit den Ergebnissen einer rasterelektronenmikroskopischen Studie von Bloxham *et al.* deckt [Bloxham *et al.* 1990]. Es ist zu vermuten, dass das selbstadhäsive Befestigungskomposit SmartCem2 durch die Schmierschicht nicht wirkungsvoll die Wurzelkanaloberfläche konditionieren konnte [Goracci *et al.* 2005c], woraus eine geringe Haftung am Dentin resultierte [Senawongse *et al.* 2010]. Auch kann die Schmierschicht nicht effektiv durch das Ätzen der Dentinoberfläche mit einer Phosphorsäure entfernt werden [Serafino *et al.* 2004], sodass sich diese auch auf die Haftung des Etch-and-Rinse-Adhäsivsystems XP Bond/Self-Cure Activator ausgewirkt haben könnte. Dies könnte erklären, warum in der Bimsmehl-Gruppe die niedrigsten Retentionswerte für beide Befestigungskomposite gemessen wurden (Tab. III).

Wurzelkanalsealer auf Kunstharzbasis, wie in der vorliegenden Untersuchung verwendet, penetrieren besonders tief (110-132 µm) in die Dentinkanälchen [Sevimay und Dalat 2003] und haften am Dentin besser als viele andere Sealertypen [Gettleman *et al.* 1991; Pecora *et al.* 2001; Ungor *et al.* 2006]. Daher kann darüber spekuliert werden, ob die Umdrehungsgeschwindigkeit der Wurzelkanalbürstchen (10000 U/min), die zusammen mit dem feuchten Bimsmehl angewandt wurden, ausreichend hoch war, um die Wurzelkanäle gründlich zu säubern. Andererseits entfernten Grasso *et al.* effektiv anhaftende Zementreste von beschliffenen Zähnen mit Prophylaxekelchen und Bimsmehl bereits bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 5000 U/min [Grasso *et al.* 2002]. Weitere Forschungsarbeiten sollten die Reinigungswirkung von schallaktivierten Wurzelkanalbürstchen untersuchen, die in einer Studie von Salman *et al.* in Kombination mit einer 17%igen EDTA-Lösung wirkungsvoll den Smear layer von der Kanaloberfläche entfernten [Salman *et al.* 2010]. In der Studie von Zhang *et al.* zeigten die ultraschallaktivierte Spülung mit EDTA und NaOCl sowie das Ätzen des Wurzelkanals mit 35%iger Phosphorsäure eine effektive Reinigung der Stiftbettkavität und Erhöhung der apikalen Haftkräfte von selbstadäzenden Adhäsivsystemen im Vergleich zur alleinigen Spülung mit Wasser oder EDTA gefolgt von NaOCl [Zhang *et al.* 2008]. Im Gegensatz dazu wurde in einer anderen Studie durch die Anwendung der Phosphorsäure das Wurzelbett nicht wirkungsvoll gesäubert [Serafino *et al.* 2004]. Auch scheint die Ultraschallreinigung nur in Kombination mit einer EDTA-Spüllösung effektiv im Débridement der Wurzelkanalwände zu sein [Coniglio *et al.* 2008].

In der Kontrollgruppe sind die höchsten Retentionswerte gemessen worden. Das in den Dentinkanälchen verbliebene Natriumhypochlorit könnte in der Kontrollgruppe zu den erhöhten Retentionswerten beigetragen haben. Jedoch kann hierüber nur spekuliert werden. In der Literatur sind Studien zu finden, in denen sowohl für ein selbstkonditionierendes Adhäsiv (Xeno III; Dentsply) [Cecchin *et al.* 2010] als auch für ein Etch-and-Rinse-Adhäsiv (One-Step; Bisco, Schaumburg, IL, USA) [Hayashi *et al.* 2005] höhere Scherhafffestigkeitswerte nach der Spülung der Dentinproben mit einer NaOCl-Lösung (1%ige Lösung für Xeno III und 5%ige Lösung für One-Step) bestimmt worden sind. Es liegen jedoch keine Untersuchungen zum Einfluss der Natriumhypochloritspüllösung auf die in der vorliegenden Studie verwendeten Befestigungssysteme vor.

6.2.2 Der Einfluss des Befestigungskomposites auf die Retention faserverstärkter Kompositstifte

In der vorliegenden Untersuchung zeigte der selbstadhäsive Befestigungszement SmartCem2 signifikant geringere Retentionswerte im Vergleich zu dem

Komposit CoreX Flow, welches zusammen mit dem Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem XP Bond/Self-Cure Activator angewandt wurde. Somit ist die in Kapitel 3 aufgestellte dritte Nullhypothese, derzufolge die Retention der Wurzelkanalstifte nicht vom Befestigungskomposit abhängig ist, widerlegt worden.

In den Ausstoßversuchen von Mazzoni *et al.* zeigte das selbstadhäsive Befestigungszement RelyX Unicem ähnliche Haftwerte im Wurzelkanal wie das Befestigungssystem CoreX Flow/XP Bond [Mazzoni *et al.* 2009]. Jedoch kann die Haftung von RelyX Unicem nicht mit der von SmartCem2 verglichen werden, da die unterschiedliche Zusammensetzung der Materialien die Haftwerte beeinflusst [Monticelli *et al.* 2008a; Radovic *et al.* 2008b]. In einer weiteren Studie zeigte SmartCem2 geringere Haftwerte zum koronalen Dentin im Vergleich zu einem Befestigungskomposit, welches mit einem Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem appliziert worden ist [Viotti *et al.* 2009]. Diese Beobachtungen entsprechen den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung.

Die niedrigeren Retentionswerte in der SmartCem2-Gruppe beruhen vermutlich auf der eingeschränkten Fähigkeit des Materials das Dentin zu demineralisieren und zu infiltrieren, was bereits in zahlreichen Studien für RelyX Unicem gezeigt worden ist [De Munck *et al.* 2004; Goracci *et al.* 2005c; Monticelli *et al.* 2008a; Bitter *et al.* 2009c]. Die CLSM-Analyse der Dentin-Komposit-Verbundschicht, in der sich keine Hybridschicht und nur wenige Kunststoffzapfen darstellten, bekräftigt diese Vermutung (Abb. 35). Der initial niedrige pH-Wert und die viel höhere Viskosität des selbstadhäsiven Zementes im Vergleich zu einem selbstätzenden Primer, könnten erklären, warum keine Hybridschicht am Wurzelkanaldentin ausgebildet worden ist. Im Gegensatz dazu zeigte das Kompositmaterial CoreX Flow mit der Adhäsivkombination XP Bond/Self-Cure Activator eine ausgeprägte Hybridschicht mit zahlreichen Tags, was den Beobachtungen aus früheren CLSM-Untersuchungen für andere Etch-and-Rinse-Adhäsivsysteme entspricht [Bitter *et al.* 2009c]. Dies könnte erklären, warum in der CoreX Flow-Gruppe höhere Retentionswerte bestimmt wurden. Kritisch anzumerken bleibt, dass aufgrund der geringen Probenanzahl ($n = 2$) in der CLSM-Analyse lediglich eine exemplarische Darstellung jedoch keine verlässliche Aussage über die Qualität der adhäsiven Verbundschicht möglich ist.

6.2.3 *Der Einfluss der Präparationsmethode auf die Retention faserverstärkter Kompositstifte*

Die in Kapitel 3 aufgestellte zweite Nullhypothese, derzufolge die Retention faserverstärkter Wurzelkanalstifte nicht von der Präparationsart der Stiftbettkavität abhängig ist, wurde widerlegt. Darüber hinaus ist eine signifikante Interaktion zwischen

dem Befestigungsmaterial und der Stiftbettpräparation festgestellt worden (Abb. 23). In der REM-Untersuchung zeigten die mit einem Rosenbohrer präparierten Wurzelkanaloberflächen neben den gehäuft anzutreffenden Präparationsriefen auch tiefe Unterschnitte (Abb. 30). Die Präparationsspuren von dem Stiftvorböhlersystem waren vergleichsweise feiner und oberflächlicher (Abb. 31). Einerseits kann dies darauf hindeuten, dass eine substanzschonende Entfernung der Wurzelfüllung mit überlangen Rosenbohrern aufgrund von eingeschränkten Sichtverhältnissen in Wurzelkanälen nur schwer möglich ist. Andererseits kann auch angenommen werden, dass die Vorbohrer mehr Dentin entfernt und damit zu weniger Unterschnitten geführt haben. Weitere Studien sollten mit einer μ CT-Analyse eindeutig klären, welche von den beiden Präparationsmethoden substanzschonender ist.

Die unter sich gehenden Bereiche könnten zu den höheren Retentionswerten in der Rosenbohrer-Gruppe beigetragen haben. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass aufgrund der schlechten Passung der Stifte in den nicht formkongruenten Stiftbettkavitäten größere Zementfugen entstanden sind. Aus diversen Pull-out Versuchen mit adhäsiv eingesetzten Metallstiften ist bekannt, dass bei breiteren Kompositfugen mit höheren Haftfestigkeitswerten zu rechnen ist [Assif und Ferber 1982; Chan *et al.* 1993; Hagge *et al.* 2002c] (vgl. gelb markierte Studien in Tab. IX). Jedoch sind in der Literatur auch Untersuchungen zu finden, in denen höhere Haftwerte bei Stiften mit guter Passung bestimmt worden sind [Chen *et al.* 2003; Schmage *et al.* 2009a] (vgl. rot markierte Studien in Tab. VIII). Interessanterweise wurden die Proben in diesen Versuchen einer thermozyklischen Wechselbelastung (Thermocycling) ausgesetzt. Thoma stellte in ihrer REM-Untersuchung eine extreme Erhöhung der Randspaltbildung in der Komposit-Dentin-Verbundzone mit wachsender Kompositfugenbreite bei adhäsiv befestigten Faserstiften nach dem Thermocycling fest [Thoma 2008]. Dies könnte in den Studien von Schmage *et al.* sowie Chen *et al.* die niedrigeren Retentionswerte in den Gruppen mit nicht formkongruenten Stiftbettpräparationen verursacht haben. Die von den Autoren durchgeführten Bruchmodi-Analysen, in denen vor allem die Dentin-Komposit-Verbundzone versagte, unterstützen diese Vermutung [Chen *et al.* 2003; Schmage *et al.* 2009a]. Die Bedeutung des Thermocyclings bei der Simulation von Bedingungen, wie sie in der Mundhöhle zu finden sind, wird jedoch kontrovers diskutiert. Einerseits wurde in einigen Studien gezeigt, dass aufgrund von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen dem Komposit und der Zahnhartsubstanz nach einer thermozyklischen Belastung Randspaltbildungen, Kompositrandfrakturen oder Spannungen im Komposit entstehen können [Torstenson und Brannstrom 1988; Monticelli *et al.* 2007]. Andererseits sind in der Literatur Untersuchungen zu finden, in denen diese Beeinträchtigung des Materials durch die künstliche Alterung nicht bestätigt werden konnte [Wendt *et al.* 1992; Purton *et al.*

2003]. Insbesondere ist es fraglich, inwieweit mit einer thermozyklischen Wechselbelastung der Alterungsprozess einer im Alveolarfach verankerten Zahnwurzel realitätsnah nachgeahmt wird [Purton *et al.* 2003]. Thoma vermutete, dass die Ursache der Randspaltbildung in der vergleichsweise höheren Polymerisationsschrumpfung der breiten Klebefugen liegt, die zu einer größeren Belastung des Dentin-Adhäsiv-Verbundes führen soll [Thoma 2008]. Zu dieser Ansicht gibt es aber in der Literatur gegenteilige Meinungen: In den Studien von Alster *et al.* sowie Tay *et al.* ist gezeigt worden, dass ein Ablösen des Komposites von den Kavitätenwänden aufgrund des vergleichsweise höheren C-Faktors eher bei dünneren Klebefugen auftritt [Alster *et al.* 1997; Tay *et al.* 2005]. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschließend beurteilt werden kann, welche Kompositfugenbreiten bei adhäsiv verankerten Stiften im Hinblick auf eine langzeitstabile Haftung im Wurzelkanal angestrebt werden sollten.

Die Tabelle VIII zeigt eine Zusammenstellung der Studien zur Auswirkung der Kompositfugenbreite auf die Retentions- bzw. Haftkraft von Wurzelkanalstiften. Die Untersuchungen können aufgrund des jeweils unterschiedlichen Studiendesigns sowie der verschiedenen Befestigungs- und Stiftmaterialien nur bedingt miteinander verglichen werden. Auch lassen sich kaum Schlussfolgerungen auf die vorliegende Arbeit ableiten, da stets gleichmäßig verbreiterte Klebefugen untersucht wurden, die frei von Unterschnitten waren. Lediglich die Studie von Chen *et al.* kann zum Vergleich herangezogen werden. In dieser Untersuchung zeigten schlecht passende Metallstifte nach der Präparation eines unterschneidenden Bereiches an den Wurzelkanalwänden höhere Retentionswerte im Vergleich zu gut passenden Stiften in Wurzelkanälen ohne den angelegten Unterschnitt [Chen *et al.* 2003].

Tabelle VIII: Übersicht über die Studien zur Auswirkung der Kompositfugenbreite auf die Haftkraft bzw. Retentionskraft von Wurzelkanalstiften

Studie	Thermo-cycling	Vorbehandlung des Wurzelkanals	WF	Sealertyp	Befestigungssystem	Stiftmaterial	Test-methode	Ergebnis der Studie
Assif <i>et al.</i> 1982	nein	nein	nein	---	Prosthodont crown base (Lee Pharmaceuticals, Los Angeles, USA)	zylindrischer und konischer Metallstift	Pull-out	Stifte mit breiten Zementfugen zeigen höhere Retentionswerte.
Assif <i>et al.</i> 1986	nein	Spülung mit Aqua dest. vor der Stiftinsertion	nein	---	Prosthodont crown base (Lee Pharmaceuticals)	zylindrischer Metallstift	Pull-out	Die Zementfugenbreite hat keinen Einfluss auf die Retentionswerte.
Chan <i>et al.</i> 1993	nein	Spülung mit NaCl-Lösung vor der Stiftinsertion	nein	---	Panavia EX (Kuraray Co., Osaka, Japan)	zylindrischer Metallstift	Pull-out	Stifte mit breiten Zementfugen zeigen höhere Retentionswerte.
Hagge <i>et al.</i> 2002c	nein	Spülung mit 5,25%iger NaOCl-Lösung während der Aufbereitung und Ätzen des Wurzelkanals für 15 Sekunden vor der Stiftinsertion	ja	Eugenol-sealer	34%iges Ätzel (Dentsply) und Panavia 21 OP (Kuraray)	zylindrischer Metallstift	Pull-out	Stifte mit breiten Zementfugen zeigen höhere Retentionswerte.
Chen <i>et al.</i> 2003	ja	nein	nein	---	All-Bond 2/ All-Bond C and B Cement System (Bisco, Schaumburg, USA)	konischer Metallstift	Pull-out	Stifte mit schmalen Zementfugen zeigen höhere Retentionswerte.
Perez <i>et al.</i> 2006	nein	Spülung mit 0,5%iger NaOCl-Lösung während der Aufbereitung und Ätzen des Wurzelkanals für eine Minute vor der Stiftinsertion	nein	---	34%iges Ätzel (3M ESPE) und All-Bond 2/Duolink (Bisco)	zylindrischer Faserstift	Push-out	Die Zementfugenbreite hat keinen Einfluss auf die Haftwerte.

Perdigao <i>et al.</i> 2007	nein	Spülung mit 5,25%iger NaOCl-Lösung während der Aufbereitung und Ätzen des Wurzelkanals für 15 Sekunden vor der Stiftinsertion	ja	Kunstharz-sealer	32%iges Ätzel (Uni-Etch, Bisco) und One-Step Adhesive/Hi-X Self-Cured Resin Cement (Bisco)	doppelkonischer Faserstift	Push-out	Die Zementfugenbreite hat keinen Einfluss auf die Haftwerte.
Schmage <i>et al.</i> 2009a	ja	Spülung mit 1,5%iger NaOCl-Lösung während der Aufbereitung und nach der Stiftbettpräparation	nein	---	RelyX Unicem (3M ESPE), 37%iges Ätzel mit Bond-1 Primer/Adhäsiv und Build-It (Jeneric Pentron, Wallingford, USA), 37%iges Ätzel mit XP Bond/ Self-Cure Activator und Calibra (Dentsply), AdheSE Bond/AdheSE DC Activator mit Multicore Flow (Ivoclar Vivadent), AdheSE System (Ivoclar Vivadent) mit Reblida DC (VOCO)	konischer Faserstift	Pull-out	Stifte mit schmalen Zementfugen zeigen höhere Retentionswerte.
Juthatip <i>et al.</i> 2011	nein	Spülung mit Aqua dest. vor der Stiftinsertion	nein	---	Clearfil DC Bond mit Clearfil DC Core Automix (Kuraray), Clearfil Photo Bond/Clearfil Porcelain Bond Activator mit Clearfil DC Core Automix (Kuraray)	konischer Faserstift	Mikrozugfestigkeitstest	Die Zementfugenbreite hat keinen Einfluss auf die Haftwerte.

Untersuchungen mit gleichen Ergebnissen sind in jeweils einer Farbe markiert.

In der Vorbohrer-Gruppe zeigte das Komposit CoreX Flow mit dem Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem XP Bond/Self-Cure Activator höhere Auszugshafte Werte im Vergleich zu dem selbstadhäsiven Befestigungszement SmartCem2. Wurden hingegen die Stiftbettkavitäten mit überlangen Rosenbohrern präpariert, waren keine signifikanten Unterschiede mehr in den Retentionswerten zwischen den beiden Befestigungsmaterialien zu beobachten. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine geringere Haftung des Komposites am Wurzelkanalentin durch Unterschnitte an den Kanalwänden, die zu einer Erhöhung der Friktion und damit auch der Auszugshafte Kraft der Faserstifte führen, kompensiert werden kann. Solche Zusammenhänge wurden bereits von Goracci *et al.* sowie Pirani *et al.* beschrieben [Pirani *et al.* 2005; Goracci *et al.* 2005a]. Auch die Analyse der Versagensmodi bestätigt diese Annahme (vgl. Abschnitt 6.2.4).

6.2.4 Diskussion der Versagensmodi

Die Bruchmodi waren sowohl vom Befestigungsmaterial als auch von der Präparationsart abhängig. In der Rosenbohrer-Gruppe waren signifikant weniger Versagen zwischen dem Wurzelkanalentin und Befestigungskomposit zu beobachten. Dies deutet darauf hin, dass durch eine mechanische Retention die Komposithaftung am Dentin verbessert wurde. Die Materialkombination CoreX Flow/XP Bond zeigte sowohl in der Vorbohrer-Gruppe als auch in der Rosenbohrer-Gruppe signifikant mehr adhäsive Versagensmodi zwischen dem Faserstift und Komposit. Die Haftung von CoreX Flow scheint somit an der Stiftoberfläche schwächer als am Wurzelkanalentin zu sein. Dies könnte erklären warum die Auszugshafte Kraft der Stifte bei diesem Befestigungsmaterial durch die Präparation der Stiftbettkavität mit einem Rosenbohrer nicht verbessert wurde, obwohl ein Anstieg der adhäsiven Bruchart II zu beobachten war.

Im Gegensatz dazu zeigte der selbstadhäsive Befestigungszement SmartCem2 bei der Stiftbettpräparation mit einem Rosenbohrer im Vergleich zur Präparation mit dem Vorbohrersystem sowohl signifikant höhere Retentionswerte als auch einen Wechsel der Versagensmodi von der adhäsiven Bruchart zwischen Dentin und Komposit zur gemischten und adhäsiven Bruchart zwischen Komposit und Stift. Dies deutet darauf hin, dass der Zement besser am Faserstift als am Wurzelkanalentin haftet. Durch die Unterschnitte in der mit einem Rosenbohrer präparierten Kavität konnte das Material sich nicht von den Kanalwänden lösen, sodass die Stifte nur bei einem Bruch des Zementes und/oder beim Versagen des Komposit-Stift-Verbundes herausgezogen werden konnten.

7 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit konnte eine der drei Arbeitshypothesen bestätigt werden. Die Sauberkeit der Stiftbettkavität wurde nicht durch die angewandten Reinigungsmethoden beeinflusst. Die Retention der faserverstärkten Kompositstifte war hingegen von der Präparationsart, der Reinigungsmethode und dem Befestigungskomposit abhängig.

Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen kann angenommen werden, dass weder durch die Anwendung der Wurzelkanalbürstchen mit feuchtem Bimsmehl noch durch das Abstrahlen der Wurzelkanalwände mit 50 µm Aluminiumoxidpartikeln bei 40 psi für 10 Sekunden die Stiftbettkavität effektiv gesäubert und die Retention der Faserstifte im Wurzelkanal erhöht wird. Das Einsetzen der intrakanalären Stifte mit einem Aufbaukomposit und Etch-and-Rinse-Adhäsiv ergibt signifikant höhere Retentionswerte im Vergleich zur Zementierung mit einem selbstadhäsiven Befestigungszement. Wird die Stiftbettpräparation mit überlangen Rosenbohrern vorgenommen, können die Auszugshaftwerte der Faserstifte erhöht werden, wenn die adhäsive Befestigung mit einem selbstadhäsiven Zement vorgenommen wird. Weitere Studien sollten jedoch mittels einer µCT-Analyse der bei der Stiftbettpräparation entfernten Zahnhartsubstanzmenge klären, ob die Rosenbohrer-Methode im Vergleich zu der Vorbohrer-Methode aufgrund der beobachteten Unterschnitte substanzschonender ist.

8 Zusammenfassung

Problemstellung: Für den Langzeiterfolg einer postendodontischen Versorgung mit faserverstärkten Kompositstiften ist sowohl ein größtmöglicher Zahnhartsubstanzerhalt und damit ein minimal-invasives Vorgehen bei der Stiftbettpräparation als auch die Etablierung eines adhäsiven Verbundes zum Wurzelkanalentin von entscheidender Bedeutung. Jedoch ist die Anwendung der Adhäsivtechnik im Wurzelkanal mit erhöhten Schwierigkeiten verbunden. Darüber hinaus können Überreste von Wurzelfüllmaterialien in der Stiftbettkavität verbleiben und die Ausbildung des Komposit-Dentin-Verbundes stören. Auch ist nicht abschließend geklärt, welche Befestigungsstrategie für die Anwendung im Wurzelkanal am besten geeignet ist.

Zielsetzung: Die Studie hatte zum Ziel den Einfluss ausgewählter Reinigungsmethoden sowie zweier Befestigungssysteme und Stiftbettpräparationsarten auf die Retention faserverstärkter Wurzelkanalstifte zu untersuchen. **Material und Methoden:** 156 menschliche obere Eckzähne wurden auf zwölf Gruppen aufgeteilt ($n = 13$). Die Zähne sind dekapiert, aufbereitet und die Wurzeln mit der Technik der vertikalen Kondensation gefüllt worden. Bei 78 Proben erfolgten die Stiftbettpräparationen (8 mm) mit den zu dem Stiftsystem *DT Light Post SL* zugehörigen Vorbohrern (Gruppe V), während bei den restlichen 78 Proben die Guttapercha mit überlangen Rosenbohrern entfernt wurde (Gruppe R). In beiden Gruppen sind 26 Stiftbettkavitäten mit einer 1%igen NaOCl-Lösung gespült (Kontrollgruppe), 26 mit feuchtem Bimsmehl und rotierenden Wurzelkanalbürstchen gereinigt (Bimsmehl-Gruppe) und 26 mit Aluminiumoxidpartikeln ($50 \mu\text{m}$) bei 40 psi für 10 Sekunden abgestrahlt (Sandstrahl-Gruppe) worden. Die Sauberkeit der Wurzelkanalwände wurde unter einem OP-Mikroskop beurteilt. Zusätzlich erfolgte eine qualitative REM-Analyse an einer exemplarischen Proben aus jeder Gruppe. Die Faserstifte sind bei der Hälfte der Proben mit einem selbstadhäsiven Befestigungszement (SmartCem2) und bei der anderen Hälfte mit einem Aufbaukomposit (CoreX Flow/XP Bond) eingesetzt worden. Anschließend wurden die Auszugshaftwerte der Wurzelkanalstifte bestimmt und eine Analyse der Versagensmodi unter einem Stereomikroskop durchgeführt. Darüber hinaus erfolgte eine qualitative CLSM-Untersuchung an zwei Proben aus je einer Gruppe um die Dentin-Komposit-Verbundzone zu beurteilen. **Ergebnisse:** Die Reinigungsmethoden hatten keinen Einfluss auf die Sauberkeit der Wurzelkanalwände ($p = 0.618$; Chi-Quadrat-Test nach Pearson). Die Auszugshaftwerte der Faserstifte zeigten eine signifikante Abhängigkeit von der Reinigungsmethode ($p = 0.008$), dem Befestigungssystem ($p < 0.0005$) und der Präparationsart ($p < 0.0005$; 3-Wege-ANOVA). In der Gruppe R sind signifikant höhere Retentionswerte [399 (88) N] als in der Gruppe V [287 (105) N] gemessen worden. Faserstifte, die mit CoreX Flow befestigt

wurden, zeigten signifikant höhere Auszugshaftwerte [370 (62) N] als solche, die mit SmartCem2 eingesetzt worden sind [315 (141) N]. Darüber hinaus wiesen die Wurzelkanalstifte in der Bismehl-Gruppe signifikant geringere Retentionswerte [315 (124) N] im Vergleich zu Stiften aus der Kontrollgruppe [370 (104) N] ($p = 0.005$; Tukey-HSD Test) auf. **Schlussfolgerungen:** Die untersuchten Reinigungsmethoden zeigten sich in der vorliegenden Studie als nicht effektiv im Hinblick auf die Sauberkeit der Stiftbettkavität. Sie erhöheten auch nicht die Stiftretention im Wurzelkanal. Das Einsetzen der intrakanalären Stifte mit einem Aufbaukomposit und einem Etch-and-Rinse-Adhäsiv ergab signifikant höhere Retentionswerte im Vergleich zur Zementierung mit einem selbstadhäsiven Befestigungszement. Wurde die Stiftbettpräparation mit überlangen Rosenbohrern vorgenommen, konnten die Auszugshaftwerte der Faserstifte, die mit einem selbstadhäsiven Zement befestigt worden sind, erhöhet werden. Weitere Studien sollten mittels einer μ CT-Analyse der bei der Stiftbettpräparation entfernten Zahnhartsubstanzmenge klären, ob die Rosenbohrer-Methode im Vergleich zu der Vorbohrer-Methode aufgrund der beobachteten Unterschnitte substanzschonender ist.

Schlagwörter:

faserverstärkte Wurzelkanalstifte, Stiftbettpräparation, adhäsive Befestigung, Reinigung der Stiftbettkavität

Klinische Bedeutung:

Die Reinigung der Stiftbettkavität mit Bismehl und Bürstchen sowie durch das Abstrahlen mit Aluminiumoxidpartikeln war in der vorliegenden Studie nicht wirkungsvoll. Weitere Forschungsarbeiten sollten die Reinigungswirkung von schallaktivierten Wurzelkanalbürstchen untersuchen. Ob die Entfernung der Wurzelfüllung mit überlangen Rosenbohrern substanzschonender als die Stiftbettpräparation mit den Vorbohrern des Stiftsystems ist, müsste ebenfalls in weiteren Studien geklärt werden.

9 Abstract

Statement of problem: The longevity of a post-endodontic restoration with adhesively luted fiber posts depends heavily on the amount of the remaining tooth structure as well as a minimally invasive post space preparation and sufficient adhesion of the luting agent to the intra-radicular dentin. Bonding to root canal dentin is still a challenge due to limited access and visibility. Moreover, dentin hybridization can be compromised by remnants of sealer and gutta-percha in the endodontic space. It is also not clear which luting strategy might be beneficial for luting fiber posts. **Objectives:** The aim of this study was to investigate the effects of cleaning method, luting agent and preparation procedure on the retention of fiber posts. **Materials and methods:** 156 human canines were allocated to twelve groups ($n = 13$). The teeth were decoronated, instrumented and root filled using warm vertical compaction. 78 roots received post space preparations using dedicated drills of the fiber post system DT Light Post SL (group PD), and in 78 roots gutta-percha was removed using a rose-head bur up to a depth of 8 mm (group RHB). In both groups 26 root canals each were rinsed using 1 % NaOCl (control), 26 were cleaned using rotating brushes and pumice powder and 26 were sandblasted with Al_2O_3 (50 μm) using an intraoral device. Cleanliness of the root canal was investigated using an operating microscope. Furthermore a qualitative SEM-analysis of one specimen of each group was performed. Fiber posts were inserted using self-adhesive resin cement (SmartCem2) or a core build-up material (CoreX Flow/XP Bond). Pull-out force was measured using a universal testing machine. Subsequently, the failure mode was determined using a stereomicroscope. Moreover, two specimens of each group were evaluated using CLSM to analyze the adhesive interface. **Results:** The cleanliness of the root canals was not affected by the cleaning method ($p = 0.618$; Chi-square-test). The pull-out force of the fiber posts was significantly affected by the cleaning method ($p = 0.008$), the luting agent ($p < 0.0005$) and the preparation procedure ($p < 0.0005$; 3-way ANOVA). Group RHB demonstrated significantly higher pull-out forces [399 (88) N] compared to group PD [287 (105) N]. Posts that were inserted using CoreX Flow showed significantly higher pull-out forces [370 (62) N] compared to SmartCem2 [315 (141) N]. Pull-out force of fiber posts inserted into root canals that were cleaned using rotating brushes was significantly lower [315 (124) N] compared to controls [370 (104) N] ($p = 0.005$; Tukey-HSD). **Conclusions:** The investigated cleaning methods after post space preparation did not impact the cleanliness of the root canal and could not enhance fiber post retention. The use of a core build-up material with an etch-and-rinse adhesive for luting fiber posts resulted in higher post retention compared to a self-adhesive cement. Post space preparation using a rose-head bur might be beneficial for improving retention especially when

cements with a minor adhesive performance are used. Further studies should clarify whether the post space preparation with dedicated drills of the fiber post system is more invasive than the rose-head bur approach by using a μ CT-analysis of the hard tooth tissue that was lost during preparation.

Keywords:

fiber post, post space preparation, root canal cleanliness, adhesive luting

Clinical significance:

The investigated cleaning methods after post space preparation did not succeed in cleaning the canal-walls that were covered with gutta-percha and sealer remnants and could not enhance fiber post retention inside the root canal. Further studies should evaluate the effects of sonically activated canal brushes on the cleanliness of the root canal. Moreover, research is needed to clarify whether the rose-head bur-approach is beneficial for preserving sound tooth structure compared to the post space preparation with dedicated drills of the post system.

10 Literaturverzeichnis

- Abo-Hamar SE, Federlin M, Hiller KA, Friedl KH, Schmalz G: Effect of temporary cements on the bond strength of ceramic luted to dentin. *Dent Mater*, 2005; 21: 794-803
- Abramovitz L, Lev R, Fuss Z, Metzger Z: The unpredictability of seal after post space preparation: a fluid transport study. *J Endod*, 2001; 27: 292-295
- Adanir N, Belli S: Evaluation of different post lengths' effect on fracture resistance of a glass fiber post system. *Eur J Dent*, 2008; 2: 23-28
- Adolphi G, Zehnder M, Bachmann LM, Gohring TN: Direct resin composite restorations in vital versus root-filled posterior teeth: a controlled comparative long-term follow-up. *Oper Dent*, 2007; 32: 437-442
- Akkayan B, Gulmez T: Resistance to fracture of endodontically treated teeth restored with different post systems. *J Prosthet Dent*, 2002; 87: 431-437
- Alster D, Feilzer AJ, de Gee AJ, Davidson CL: Polymerization contraction stress in thin resin composite layers as a function of layer thickness. *Dent Mater*, 1997; 13: 146-150
- Anderson GC, Perdigao J, Hodges JS, Bowles WR: Efficiency and effectiveness of fiber post removal using 3 techniques. *Quintessence Int*, 2007; 38: 663-670
- Ari H, Yasar E, Belli S: Effects of NaOCl on bond strengths of resin cements to root canal dentin. *J Endod*, 2003; 29: 248-251
- Assif D, Ferber A: Retention of dowels using a composite resin as a cementing medium. *J Prosthet Dent*, 1982; 48: 292-296
- Assif D und Bleicher S: Retention of serrated endodontic posts with a composite luting agent: effect of cement thickness. *J Prosthet Dent*, 1986; 56: 689-691
- Assif D, Bitenski A, Pilo R, Oren E: Effect of post design on resistance to fracture of endodontically treated teeth with complete crowns. *J Prosthet Dent*, 1993; 69: 36-40
- Assif D: Biomechanical considerations in restoring endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 1994; 71: 563-567
- Attal JP, Asmussen E, Degrange M: Effects of surface treatment on the free surface energy of dentin. *Dent Mater*, 1994; 10: 259-264
- Axelsson P, Nystrom B, Lindhe J: The long-term effect of a plaque control program on tooth mortality, caries and periodontal disease in adults. Results after 30 years of maintenance. *J Clin Periodontol*, 2004; 31: 749-757
- Babenhauerheide K, Rössner A, Freesmeyer W: Silanisierung versus Oberflächendesign. *Endodontie Journal*, 2009; 2: 30-32
- Bachicha WS, DiFiore PM, Miller DA, Lautenschlager EP, Pashley DH: Microleakage of endodontically treated teeth restored with posts. *J Endod*, 1998; 24: 703-708
- Balbosh A, Ludwig K, Kern M: Comparison of titanium dowel retention using four different luting agents. *J Prosthet Dent*, 2005; 94: 227-233
- Baldissara P, Pieri F, Arcidiacono A: Fatigue resistance of fibre posts: a comparative study. *J Dent Res* 2001; 80: 706
- Baldissara P: Mechanical properties and in vitro evaluation. In: Scotti R, Ferrari M. *Fiber post: Characteristic and clinical application*, Masson, Milano 2002: 39-51

- Baldissara P, Zicari F, Valandro LF, Scotti R: Effect of root canal treatments on quartz fiber posts bonding to root dentin. *J Endod*, 2006; 32: 985-988
- Barjau-Escribano A, Sancho-Bru JL, Forner-Navarro L, Rodriguez-Cervantes PJ, Perez-Gonzalez A, Sanchez-Marin FT: Influence of prefabricated post material on restored teeth: fracture strength and stress distribution. *Oper Dent*, 2006; 31: 47-54
- Bateman G, Ricketts DN, Saunders WP: Fibre-based post systems: a review. *Br Dent J*, 2003; 195: 43-48
- Beech DR, Tyas MJ, Solomon A: Bond strength of restorative materials to human dentin: influence of post-extraction time. *Dent Mater*, 1991; 7: 15-17
- Beer R, Heffenträger K, Walter H: Bruchlast postendodontisch adhäsiv befestigter Glasfaserstifte. *ZWR*, 2010; 119: 472-486
- Bell AM, Tanner J, Lassila LV, Kangasniemi I, Vallittu P: Bonding of composite resin luting cement to fiber-reinforced composite root canal posts. *J Adhes Dent*, 2004; 6: 319-325
- Bell AM, Lassila LV, Kangasniemi I, Vallittu PK: Bonding of fibre-reinforced composite post to root canal dentin. *J Dent*, 2005; 33: 533-539
- Bitter K, Meyer-Lueckel H, Priehn K, Kanjuparambil JP, Neumann K, Kielbassa AM: Effects of luting agent and thermocycling on bond strengths to root canal dentine. *Int Endod J*, 2006a; 39: 809-818
- Bitter K, Meyer-Lueckel H, Priehn K, Martus P, Kielbassa AM: Bond strengths of resin cements to fiber-reinforced composite posts. *Am J Dent*, 2006b; 19: 138-142
- Bitter K, Kielbassa AM: Post-endodontic restorations with adhesively luted fiber-reinforced composite post systems: a review. *Am J Dent*, 2007a; 20: 353-360
- Bitter K, Noetzel J, Neumann K, Kielbassa AM: Effect of silanization on bond strengths of fiber posts to various resin cements. *Quintessence Int*, 2007b; 38: 121-128
- Bitter K, Neumann K, Kielbassa AM: Effects of pretreatment and thermocycling on bond strength of resin core materials to various fiber-reinforced composite posts. *J Adhes Dent*, 2008a; 10: 481-489
- Bitter K, Noetzel J, Volk C, Neumann K, Kielbassa AM: Bond strength of fiber posts after the application of erbium:yttrium-aluminum-garnet laser treatment and gaseous ozone to the root canal. *J Endod*, 2008b; 34: 306-309
- Bitter K, Noetzel J, Stamm O, Vaudt J, Meyer-Lueckel H, Neumann K, Kielbassa AM: Randomized clinical trial comparing the effects of post placement on failure rate of postendodontic restorations: preliminary results of a mean period of 32 months. *J Endod*, 2009a; 35: 1477-1482
- Bitter K, Paris S, Mueller J, Neumann K, Kielbassa AM: Correlation of scanning electron and confocal laser scanning microscopic analyses for visualization of dentin/adhesive interfaces in the root canal. *J Adhes Dent*, 2009b; 11: 7-14
- Bitter K, Paris S, Pfuertner C, Neumann K, Kielbassa AM: Morphological and bond strength evaluation of different resin cements to root dentin. *Eur J Oral Sci*, 2009c; 117: 326-333
- Bitter K, Kielbassa AM, Weiger R, Krastl G: Die Befestigung faserverstärkter Wurzelkanalstifte. *Quintessenz*, 2010; 61: 35-45
- Bloxham GP, Dennison JD, Charbeneau GT: A clinical scanning electron microscope study of tooth surface preparation and bonding. *Aust Dent J*, 1990; 35: 345-351

- Blunck U, Pohl M, Dieker A: Time of extraction and cavity position in in-vitro tests of dentin adhesives. *Dtsch Zahnärztl Z*, 1990; 45: 639-642
- Blunck U: Adhäsive Befestigungsmaterialien. *Zahnarzt & Praxis*, 2009; 12: 330-332
- Bolhuis HPB, De Gee AJ, Feilzer AJ, Davidson CL: Fracture strength of different core build-up designs. *Am J Dent*, 2001; 14: 286-290
- Bolhuis P, De Gee A, Feilzer A: Influence of fatigue loading on four post-and-core systems in maxillary premolars. *Quintessence Int*, 2004; 35: 657-667
- Bolla M, Muller-Bolla M, Borg C, Lupi-Pegorier L, Laplanche O, Leforstier E: Root canal posts for the restoration of root filled teeth. *Cochrane Database Syst Rev*, 2007; 1: CD004623
- Boone KJ, Murchison DF, Schindler WG, Walker WA, 3rd: Post retention: the effect of sequence of post-space preparation, cementation time, and different sealers. *J Endod*, 2001; 27: 768-771
- Boudrias P, Sakkal S, Petrova Y: Anatomical post design meets quartz fiber technology: rationale and case report. *Compend Contin Educ Dent*, 2001; 22: 337-340, 342, 344
- Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH: Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin. *Dent Mater*, 2003; 19: 199-205
- Breschi L, Mazzone A, Ferrari M: Adhesion to Intraradicular Dentin: A Review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009; 23: 1053-1083
- Buettel L, Krastl G, Lorch H, Naumann M, Zitzmann NU, Weiger R: Influence of post fit and post length on fracture resistance. *Int Endod J*, 2009; 42: 47-53
- Button GL, Moon PC, Barnes RF, Gunsolley JC: Effect of preparation cleaning procedures on crown retention. *J Prosthet Dent*, 1988; 59: 145-148
- Butz F, Heydecke G, Bleise W, Strub J: Können wurzelgefüllte Molaren ohne Stift versorgt werden? *Quintessenz*, 2007; 58: 1035-1039
- Cagidiaco MC, Garcia-Godoy F, Vichi A, Grandini S, Goracci C, Ferrari M: Placement of fiber prefabricated or custom made posts affects the 3-year survival of endodontically treated premolars. *Am J Dent*, 2008a; 21: 179-184
- Cagidiaco MC, Goracci C, Garcia-Godoy F, Ferrari M: Clinical studies of fiber posts: a literature review. *Int J Prosthodont*, 2008b; 21: 328-336
- Camargo CH, Siviero M, Camargo SE, de Oliveira SH, Carvalho CA, Valera MC: Topographical, diametral, and quantitative analysis of dentin tubules in the root canals of human and bovine teeth. *J Endod*, 2007; 33: 422-426
- Caneppele TM, Zogheib LV, Gomes I, Kuwana AS, Pagani C: Bond strength of a composite resin to an adhesive luting cement. *Braz Dent J*, 2010; 21: 322-326
- Carratu P, Amato M, Riccitiello F, Rengo S: Evaluation of leakage of bacteria and endotoxins in teeth treated endodontically by two different techniques. *J Endod*, 2002; 28: 272-275
- Castellan CS, Santos-Filho PC, Soares PV, Soares CJ, Cardoso PE: Measuring bond strength between fiber post and root dentin: a comparison of different tests. *J Adhes Dent*, 2010; 12: 477-485
- Cecchin D, Farina AP, Galafassi D, Barbizam JVB, Corona SAM, Carlini-Júnior B: Influence of sodium hypochlorite and edta on the microtensile bond strength of a self-etching adhesive system. *J Appl Oral Sci*, 2010; 18: 385-389

- Chaiyabutr Y, Kois JC: The effects of tooth preparation cleansing protocols on the bond strength of self-adhesive resin luting cement to contaminated dentin. *Oper Dent*, 2008; 33: 556-563
- Chan FW, Harcourt JK, Brockhurst PJ: The effect of post adaptation in the root canal on retention of posts cemented with various cements. *Aust Dent J*, 1993; 38: 39-45
- Chaves P, Giannini M, Ambrosano G: Influence of smear layer pretreatments on bond strength to dentin. *J Adhes Dent*, 2002; 4: 191-196
- Chen DC, Lai YL, Chen HL, Lee SY: Effect of circumferential undercut placement in the root canal wall on the retention of a tapered post in large and small root canals. *J Dent*, 2003; 31: 247-252
- Chen SC, Chueh LH, Hsiao CK, Wu HP, Chiang CP: First untoward events and reasons for tooth extraction after nonsurgical endodontic treatment in Taiwan. *J Endod*, 2008; 34: 671-674
- Chersoni S, Suppa P, Breschi L, Ferrari M, Tay FR, Pashley DH, Prati C: Water movement in the hybrid layer after different dentin treatments. *Dent Mater*, 2004; 20: 796-803
- Chersoni S, Acquaviva GL, Prati C, Ferrari M, Grandini S, Pashley DH, Tay FR: In vivo fluid movement through dentin adhesives in endodontically treated teeth. *J Dent Res*, 2005; 84: 223-227
- Cheung W: A review of the management of endodontically treated teeth. Post, core and the final restoration. *J Am Dent Assoc*, 2005; 136: 611-619
- Christensen GJ: Posts: necessary or unnecessary? *J Am Dent Assoc*, 1996; 127: 1522-1524, 1526
- Coli P, Alaeddin S, Wennerberg A, Karlsson S: In vitro dentin pretreatment: surface roughness and adhesive shear bond strength. *Eur J Oral Sci*, 1999; 107: 400-413
- Coniglio I, Magni E, Goracci C, Radovic I, Carvalho CA, Grandini S, Ferrari M: Post space cleaning using a new nickel titanium endodontic drill combined with different cleaning regimens. *J Endod*, 2008; 34: 83-86
- Creugers NH, Mentink AG, Kayser AF: An analysis of durability data on post and core restorations. *J Dent*, 1993; 21: 281-284
- Cury AH, Goracci C, de Lima Navarro MF, Carvalho RM, Sadek FT, Tay FR, Ferrari M: Effect of hygroscopic expansion on the push-out resistance of glass ionomer-based cements used for the luting of glass fiber posts. *J Endod*, 2006; 32: 537-540
- D'Souza PD, Duschner H, Staehle HJ, Pioch T: Dentin bonding systems: a comparative study of SEM and CLSM used to visualize the resin-dentin interface. *Acta Med Dent Helv*, 1999; 4: 20-26
- Davidson CL, de Gee AJ, Feilzer A: The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. *J Dent Res*, 1984; 63: 1396-1399
- Davy DT, Dilley GL, Krejci RF: Determination of stress patterns in root-filled teeth incorporating various dowel designs. *J Dent Res*, 1981; 60: 1301-1310
- De Duraõ Mauricio PJ, Gonzalez-Lopez S, Aguilar-Mendoza JA, Felix S, Gonzalez-Rodriguez MP: Comparison of regional bond strength in root thirds among fiber-reinforced posts luted with different cements. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2007; 83: 364-372

- De Munck J, Vargas M, Van Landuyt K, Hikita K, Lambrechts P, Van Meerbeek B: Bonding of an auto-adhesive luting material to enamel and dentin. *Dent Mater*, 2004; 20: 963-971
- De Rijk WG: Removal of fiber posts from endodontically treated teeth. *Am J Dent*, 2000; 13: 19B-21B
- De Santis R, Prisco D, Apicella A, Ambrosio L, Rengo S, Nicolais L: Carbon fiber post adhesion to resin luting cement in the restoration of endodontically treated teeth. *J Mater Sci Mater Med*, 2000; 11: 201-206
- Demiryurek EO, Kulunk S, Yuksel G, Sarac D, Bulucu B: Effects of three canal sealers on bond strength of a fiber post. *J Endod*, 2010; 36: 497-501
- Dentsply: Produktkatalog 2011: 36, 81
- Drummond JL: In vitro evaluation of endodontic posts. *Am J Dent*, 2000; 13: 5B-8B
- Duke ES, Lindemuth J: Variability of clinical dentin substrates. *Am J Dent*, 1991; 4: 241-246
- Duncan JP, Pameijer CH: Retention of parallel-sided titanium posts cemented with six luting agents: an in vitro study. *J Prosthet Dent*, 1998; 80: 423-428
- Duret B, Reynaud M, Duret F: New concept of coronoradicular reconstruction: the Composipost (1). *Chirur Dent France*, 1990a; 60: 131-141
- Duret B, Reynaud M, Duret F: A new concept of corono-radicular reconstruction, the Composipost (2). *Chir Dent Fr*, 1990b; 60: 69-77
- Dyer SR, Lassila LV, Jokinen M, Vallittu PK: Effect of fiber position and orientation on fracture load of fiber-reinforced composite. *Dent Mater*, 2004; 20: 947-955
- Edelhoff D, Heidemann D, Kern M, Weigl P: Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK, der DGZPW und der DGZ: Aufbau endodontisch behandelter Zähne. *Zahnärztl Mitt*, 2003; 93: 42-44
- Edelhoff D, Weber M, Spiekermann H, Marx R: PVD-layering for increased retention of glass fibre reinforced endodontic posts. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 2006; 116: 992-999
- Eichner K, Kappert H: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1, Stuttgart, Thieme 2000: 432
- Eisenburger M: Optimale adhäsive Befestigung und Retention. *Zahnarzt & Praxis*, 2008; 12: 150
- Ellakwa A, Cho N, Lee IB: The effect of resin matrix composition on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. *Dent Mater*, 2007; 23: 1229-1235
- Erdemir A, Ari H, Gungunes H, Belli S: Effect of medications for root canal treatment on bonding to root canal dentin. *J Endod*, 2004a; 30: 113-116
- Erdemir A, Eldeniz AU, Belli S, Pashley DH: Effect of solvents on bonding to root canal dentin. *J Endod*, 2004b; 30: 589-592
- Ernst CP, Post M, Willershausen B: Der Einfluß der Kavitätendesinfektion auf den Haftverbund von Dentinadhäsiven. *Dtsch Zahnärztl Z*, 1999; 54: 124-126
- Etienne O, Schoeffler J: Adhäsiv befestigte Stiffaufbauten in der ästhetischen Zahnmedizin. *ZWR*, 2010; 119: 508-513
- Fan B, Wu MK, Wesselink PR: Coronal leakage along apical root fillings after immediate and delayed post space preparation. *Endod Dent Traumatol*, 1999; 15: 124-126

- Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL: Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res*, 1987; 66: 1636-1639
- Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL: Quantitative determination of stress reduction by flow in composite restorations. *Dent Mater*, 1990; 6: 167-171
- Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL: Setting stresses in composites for two different curing modes. *Dent Mater*, 1993; 9: 2-5
- Fennis WM, Kuijs RH, Kreulen CM, Roeters FJ, Creugers NH, Burgersdijk RC: A survey of cusp fractures in a population of general dental practices. *Int J Prosthodont*, 2002; 15: 559-563
- Fernandes AS, Dessai GS: Factors affecting the fracture resistance of post-core reconstructed teeth: a review. *Int J Prosthodont*, 2001; 14: 355-363
- Ferrari M, Mannocci F, Vichi A, Cagidiaco MC, Mjör IA: Bonding to root canal: structural characteristics of the substrate. *Am J Dent*, 2000a; 13: 255-260
- Ferrari M, Vichi A, Garcia-Godoy F: Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. *Am J Dent*, 2000b; 13: 15B-18B
- Ferrari M, Vichi A, Mannocci F, Mason PN: Retrospective study of the clinical performance of fiber posts. *Am J Dent*, 2000c; 13: 9B-13B
- Ferrari M, Vichi A, Grandini S: Efficacy of different adhesive techniques on bonding to root canal walls: an SEM investigation. *Dent Mater*, 2001; 17: 422-429
- Ferrari M, Vichi A, Grandini S, Geppi S: Influence of microbrush on efficacy of bonding into root canals. *Am J Dent*, 2002a; 15: 227-231
- Ferrari M, Grandini S, Simonetti M, Monticelli F, Goracci C: Influence of a microbrush on bonding fiber post into root canals under clinical conditions. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2002b; 94: 627-631
- Ferrari M, Mason PN, Goracci C, Pashley DH, Tay FR: Collagen degradation in endodontically treated teeth after clinical function. *J Dent Res*, 2004; 83: 414-419
- Ferrari M, Cagidiaco MC, Goracci C, Vichi A, Mason PN, Radovic I, Tay F: Long-term retrospective study of the clinical performance of fiber posts. *Am J Dent*, 2007a; 20: 287-291
- Ferrari M, Cagidiaco MC, Grandini S, De Sanctis M, Goracci C: Post placement affects survival of endodontically treated premolars. *J Dent Res*, 2007b; 86: 729-734
- Finger WJ: Dentin bonding agents. Relevance of in vitro investigations. *Am J Dent*, 1988; 1 Spec No: 184-188
- Fokkinga WA, Kreulen CM, Vallittu PK, Creugers NH: A structured analysis of in vitro failure loads and failure modes of fiber, metal, and ceramic post-and-core systems. *Int J Prosthodont*, 2004; 17: 476-482
- Fox K, Gutteridge DL: An in vitro study of coronal microleakage in root-canal-treated teeth restored by the post and core technique. *Int Endod J*, 1997; 30: 361-368
- Franca FM, Dos Santos AJ, Lovadino JR: Influence of air abrasion and long-term storage on the bond strength of self-etching adhesives to dentin. *Oper Dent*, 2007; 32: 217-224
- Frankenberger R, Krämer N, Oberschachtsiek H, Petschelt A: Dentin bond strength and marginal adaptation after NaOCl pre-treatment. *Oper Dent* 2000; 25: 40-45
- Fredriksson M, Astback J, Pamenius M, Arvidson K: A retrospective study of 236 patients with teeth restored by carbon fiber-reinforced epoxy resin posts. *J Prosthet Dent*, 1998; 80: 151-157

- Galhano GA, Valandro LF, De Melo RM, Scotti R, Bottino MA: Evaluation of the flexural strength of carbon fiber-, quartz fiber-, and glass fiber-based posts. *J Endod*, 2005; 31: 209-211
- Gallo JR 3rd, Miller T, Xu X, Burgess JO: In vitro evaluation of the retention of composite fiber and stainless steel posts. *J Prosthodont*, 2002; 11: 25-29
- Gaston BA, West LA, Liewehr FR, Fernandes C, Pashley DH: Evaluation of regional bond strength of resin cement to endodontic surfaces. *J Endod*, 2001; 27: 321-324
- Gettleman BH, Messer HH, ElDeeb ME: Adhesion of sealer cements to dentin with and without the smear layer. *J Endod*, 1991; 17: 15-20
- Giachetti L, Scaminaci Russo D, Bambi C, Grandini R: A review of polymerization shrinkage stress: current techniques for posterior direct resin restorations. *J Contemp Dent Pract*, 2006; 7: 79-88
- Giovani AR, Vansan LP, De Sousa Neto MD, Paulino SM: In vitro fracture resistance of glass-fiber and cast metal posts with different lengths. *J Prosthet Dent*, 2009; 101: 183-188
- Goodis HE, Marshall GW Jr, White JM, Gee L, Hornberger B, Marshall SJ: Storage effects on dentin permeability and shear bond strengths. *Dent Mater*, 1993; 9: 79-84
- Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, Tay FR, Ferrari M: The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci*, 2004; 112: 353-361
- Goracci C, Fabianelli A, Sadek FT, Papacchini F, Tay FR, Ferrari M: The contribution of friction to the dislocation resistance of bonded fiber posts. *J Endod*, 2005a; 31: 608-612
- Goracci C, Raffaelli O, Monticelli F, Balleri B, Bertelli E, Ferrari M: The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization. *Dent Mater*, 2005b; 21: 437-444
- Goracci C, Sadek FT, Fabianelli A, Tay FR, Ferrari M: Evaluation of the adhesion of fiber posts to intraradicular dentin. *Oper Dent*, 2005c; 30: 627-635
- Goracci C, Corciolani G, Vichi A, Ferrari M: Light-transmitting ability of marketed fiber posts. *J Dent Res*, 2008; 87: 1122-1126
- Grandini S, Goracci C, Monticelli F, Borracchini A, Ferrari M: SEM evaluation of the cement layer thickness after luting two different posts. *J Adhes Dent*, 2005a; 7: 235-240
- Grandini S, Goracci C, Monticelli F, Tay FR, Ferrari M: Fatigue resistance and structural characteristics of fiber posts: three-point bending test and SEM evaluation. *Dent Mater*, 2005b; 21: 75-82
- Grasso CA, Caluori DM, Goldstein GR, Hittelman E: In vivo evaluation of three cleansing techniques for prepared abutment teeth. *J Prosthet Dent*, 2002; 88: 437-441
- Gray GB, Carey GP, Jagger DC: An in vitro investigation of a comparison of bond strengths of composite to etched and air-abraded human enamel surfaces. *J Prosthodont*, 2006; 15: 2-8

- Gu XH, Mao CY, Liang C, Wang HM, Kern M: Does endodontic post space irrigation affect smear layer removal and bonding effectiveness? *Eur J Oral Sci*, 2009; 117: 597-603
- Guzy GE, Nicholls JI: In vitro comparison of intact endodontically treated teeth with and without endo-post reinforcement. *J Prosthet Dent*, 1979; 42: 39-44
- Gwinnett AJ: Dentin bond strength after air drying and rewetting. *Am J Dent*, 1994; 7: 144-148
- Habenicht G: Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer Verlag, Berlin. 1990
- Hagge MS, Wong RD, Lindemuth JS: Effect of three root canal sealers on the retentive strength of endodontic posts luted with a resin cement. *Int Endod J*, 2002a; 35: 372-378
- Hagge MS, Wong RD, Lindemuth JS: Retention strengths of five luting cements on prefabricated dowels after root canal obturation with a zinc oxide/eugenol sealer: 1. Dowel space preparation/cementation at one week after obturation. *J Prosthodont*, 2002b; 11: 168-175
- Hagge MS, Wong RD, Lindemuth JS: Effect of dowel space preparation and composite cement thickness on retention of a prefabricated dowel. *J Prosthodont*, 2002c; 11: 19-24
- Haller B, Hofmann N, Klaiber B, Bloching U: Effect of storage media on microleakage of five dentin bonding agents. *Dent Mater*, 1993; 9: 191-197
- Hayashi M, Takahashi Y, Hirai M, Iwami Y, Imazato S, Ebisu S: Effect of endodontic irrigation on bonding of resin cement to radicular dentin. *Eur J Oral Sci*, 2005; 113: 70-76
- Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. Urban & Fischer, München. 2006: 173
- Heydecke, F. B, R. SJ: Einfluß des endodontischen Aufbaus auf die Frakturfestigkeit überkronter Frontzähne. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999; 54: 637-640
- Hikita K, Van Meerbeek B, De Munck J, Ikeda T, Van Landuyt K, Maida T, Lambrechts P, Peumans M: Bonding effectiveness of adhesive luting agents to enamel and dentin. *Dent Mater*, 2007; 23: 71-80
- Huang MS, Li MT, Huang FM, Ding SJ: The effect of thermocycling and dentine pre-treatment on the durability of the bond between composite resin and dentine. *J Oral Rehabil*, 2004; 31: 492-499
- Isidor F, Odman P, Brondum K: Intermittent loading of teeth restored using prefabricated carbon fiber posts. *Int J Prosthodont*, 1996; 9: 131-136
- Juthatip A, Masatoshi N, Pisol S, Junji T: Effects of c-factor and resin volume on the bonding to root canal with and without fibre post insertion. *J Dent*, 2011, 30: 422-429
- Kalkan M, Usumez A, Ozturk AN, Belli S, Eskitascioglu G: Bond strength between root dentin and three glass-fiber post systems. *J Prosthet Dent*, 2006; 96: 41-46
- Karapanou V, Vera J, Cabrera P, White RR, Goldman M: Effect of immediate and delayed post preparation on apical dye leakage using two different sealers. *J Endod*, 1996; 22: 583-585
- Katz A, Wasenstein-Kohn S, Tamse A, Zuckerman O: Residual dentin thickness in bifurcated maxillary premolars after root canal and dowel space preparation. *J Endod*, 2006; 32: 202-205

- Kemp-Scholte CM, Davidson CL: Complete marginal seal of Class V resin composite restorations effected by increased flexibility. *J Dent Res*, 1990; 69: 1240-1243
- Khatavkar RA, Hegde VS: Current concepts in gutta-percha removal for re-treatment. *Dental Tribune*, 2010: 18
- Kianusch Y: Zerstörte Zähne mit Stiftsystem aufbauen. *Dentalzeitung*, 2009; 4: 62-64
- King PA, Setchell DJ, Rees JS: Clinical evaluation of a carbon fibre reinforced carbon endodontic post. *J Oral Rehabil*, 2003; 30: 785-789
- Kishen A, Kumar GV, Chen NN: Stress-strain response in human dentine: rethinking fracture predilection in postcore restored teeth. *Dent Traumatol*, 2004; 20: 90-100
- Kleverlaan CJ, Feilzer AJ: Polymerization shrinkage and contraction stress of dental resin composites. *Dent Mater*, 2005; 21: 1150-1157
- Krastl G: Trauma: Therapie mit Glasfaserstift und Komposit. *Zahnärztl Mitt*, 2007; 97: 38-43
- Krastl G, Zitzmann NU, Weiger R: Adhäsiv Aufbau bei wurzelkanalgefüllten Zähnen. *Zahnmedizin up2date*, 2008; 4: 323-346
- Kuttler S, McLean A, Dorn S, Fischzang A: The impact of post space preparation with Gates-Glidden drills on residual dentin thickness in distal roots of mandibular molars. *J Am Dent Assoc*, 2004; 135: 903-909
- Kvist T, Rydin E, Reit C: The relative frequency of periapical lesions in teeth with root canal-retained posts. *J Endod*, 1989; 15: 578-580
- Lambrianidis T, Margelos J, Beltes P: Removal efficiency of calcium hydroxide dressing from the root canal. *J Endod*, 1999; 25: 85-88
- Lang H, Korkmaz Y, Schneider K, Raab WH: Impact of endodontic treatments on the rigidity of the root. *J Dent Res*, 2006; 85: 364-368
- Lanza A, Aversa R, Rengo S, Apicella D, Apicella A: 3D FEA of cemented steel, glass and carbon posts in a maxillary incisor. *Dent Mater*, 2005; 21: 709-715
- Lassila LV, Tanner J, Le Bell AM, Narva K, Vallittu PK: Flexural properties of fiber reinforced root canal posts. *Dent Mater*, 2004; 20: 29-36
- Lauer HC, Ottl P, O. H: Die prothetische Versorgung des avitalen Zahnes. *Zahnarzt Magazin*, 1996; 11: 15-19
- Lee JJ, Nettey-Marbell A, Cook A, Jr., Pimenta LA, Leonard R, Ritter AV: Using extracted teeth for research: the effect of storage medium and sterilization on dentin bond strengths. *J Am Dent Assoc*, 2007; 138: 1599-1603
- Li LL, Wang ZY, Bai ZC, Mao Y, Gao B, Xin HT, Zhou B, Zhang Y, Liu B: Three-dimensional finite element analysis of weakened roots restored with different cements in combination with titanium alloy posts. *Chin Med J (Engl)*, 2006; 119: 305-311
- Lipski M, Mrozek J, Drozdziak A: Influence of water cooling on root surface temperature generated during post space preparation. *J Endod*, 2010; 36: 713-716
- Los SA, Barkmeier WW: Effects of dentin air abrasion with aluminum oxide and hydroxyapatite on adhesive bond strength. *Oper Dent*, 1994; 19: 169-175
- Love RM, Purton DG: The effect of serrations on carbon fiber posts-retention within the root canal, core retention, and post rigidity. *Int J Prosthodont*, 1996; 9: 484-488
- Malferrari S, Monaco C: Composition, microstructure and morphology of the posts. In: Scotti R, Ferrari M. *Fiber post: Characteristic and clinical application*, Masson, Milano 2002: 25-36

- Malferrari S, Monaco C, Scotti R: Clinical evaluation of teeth restored with quartz fiber-reinforced epoxy resin posts. *Int J Prosthodont*, 2003; 16: 39-44
- Mancebo JC, Jimenez-Castellanos E, Canadas D: Effect of tooth type and ferrule on the survival of pulpless teeth restored with fiber posts: a 3-year clinical study. *Am J Dent*, 2010; 23: 351-356
- Mandel E, Machtou P, Friedman S: Scanning Electron Microscope Observation of Canal Cleanliness. *J Endodont*, 1990; 16: 279-283
- Manhart J, Mehl A, Schroeter R, Obster B, Hickel R: Bond strength of composite to dentin treated by air abrasion. *Oper Dent*, 1999; 24: 223-232
- Mannocci F, Ferrari M, Watson TF: Intermittent loading of teeth restored using quartz fiber, carbon-quartz fiber, and zirconium dioxide ceramic root canal posts. *J Adhes Dent*, 1999a; 1: 153-158
- Mannocci F, Innocenti M, Bertelli E, Ferrari M: Dye leakage and SEM study of roots obturated with Thermafill and dentin bonding agent. *Endod Dent Traumatol*, 1999b; 15: 60-64
- Mannocci F, Sherriff M, Watson TF: Three-point bending test of fiber posts. *J Endod*, 2001; 27: 758-761
- Mannocci F, Pilecki P, Bertelli E, Watson TF: Density of dentinal tubules affects the tensile strength of root dentin. *Dent Mater*, 2004; 20: 293-296
- Mannocci F, Sherriff M, Watson TF, Vallittu PK: Penetration of bonding resins into fibre-reinforced composite posts: a confocal microscopic study. *Int Endod J*, 2005; 38: 46-51
- Matinlinna JP, Lassila LV, Ozcan M, Yli-Urpo A, Vallittu PK: An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. *Int J Prosthodont*, 2004; 17: 155-164
- Mazzoni A, Pashley DH, Nishitani Y, Breschi L, Mannello F, Tjaderhane L, Toledano M, Pashley EL, Tay FR: Reactivation of inactivated endogenous proteolytic activities in phosphoric acid-etched dentine by etch-and-rinse adhesives. *Biomaterials*, 2006; 27: 4470-4476
- Mazzoni A, Marchesi G, Cadenaro M, Mazzotti G, Di Lenarda R, Ferrari M, Breschi L: Push-out stress for fibre posts luted using different adhesive strategies. *Eur J Oral Sci*, 2009; 117: 447-453
- McComb D, Smith DC: A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *J Endod*, 1975; 1: 238-242
- Meira JB, Esposito CO, Quitero MF, Poiate IA, Pfeifer CS, Tanaka CB, Ballester RY: Elastic modulus of posts and the risk of root fracture. *Dent Traumatol*, 2009; 25: 394-398
- Mendoza DB, Eakle WS: Retention of posts cemented with various dentinal bonding cements. *J Prosthet Dent*, 1994; 72: 591-594
- Mjör IA, Nordahl I: The density and branching of dentinal tubules in human teeth. *Arch Oral Biol*, 1996; 41: 401-412
- Mjör IA, Smith MR, Ferrari M, Mannocci F: The structure of dentine in the apical region of human teeth. *Int Endod J*, 2001; 34: 346-353
- Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M: Clinical behavior of translucent-fiber posts: a 2-year prospective study. *Int J Prosthodont*, 2003; 16: 593-596

- Monticelli F, Osorio R, Tay FR, Sadek FT, Ferrari M, Toledano M: Resistance to thermo-mechanical stress of different coupling agents used as intermediate layer in resin-fiber post bonds. *Am J Dent*, 2007; 20: 416-20
- Monticelli F, Osorio R, Mazzitelli C, Ferrari M, Toledano M: Limited decalcification/diffusion of self-adhesive cements into dentin. *J Dent Res*, 2008a; 87: 974-979
- Monticelli F, Osorio R, Sadek FT, Radovic I, Toledano M, Ferrari M: Surface treatments for improving bond strength to prefabricated fiber posts: a literature review. *Oper Dent*, 2008b; 33: 346-355
- Morris MD, Lee KW, Agee KA, Bouillaguet S, Pashley DH: Effects of sodium hypochlorite and RC-prep on bond strengths of resin cement to endodontic surfaces. *J Endod*, 2001; 27: 753-757
- Motisuki C, Monti Lima L, Emi Sanabe M, Jacques P, Santos-Pinto L: Evaluation of the microtensile bond strength of composite resin restoration in dentin prepared with different sizes of aluminum oxide particles, using the air abrasion system. *Minerva stomatologica*, 2006; 55: 611-618
- Mujdeci A, Gokay O: The effect of airborne-particle abrasion on the shear bond strength of four restorative materials to enamel and dentin. *The Journal of prosthetic dentistry*, 2004; 92: 245-249
- Nakabayashi N, Kojima K, Masuhara E: The promotion of adhesion by the infiltration of monomers into tooth substrates. *J Biomed Mater Res*, 1982; 16: 265-273
- Nakabayashi N, Nakamura M, Yasuda N: Hybrid layer as a dentin-bonding mechanism. *J Esthet Dent*, 1991; 3: 133-138.
- Nam SH, Chang HS, Min KS, Lee Y, Cho HW, Bae JM: Effect of the number of residual walls on fracture resistances, failure patterns, and photoelasticity of simulated premolars restored with or without fiber-reinforced composite posts. *J Endod*, 2010; 36: 297-301
- Naumann M, Blankenstein F, Dietrich T: Survival of glass fibre reinforced composite post restorations after 2 years-an observational clinical study. *J Dent*, 2005a; 33: 305-312
- Naumann M, Blankenstein F, Kiessling S, Dietrich T: Risk factors for failure of glass fiber-reinforced composite post restorations: a prospective observational clinical study. *Eur J Oral Sci*, 2005b; 113: 519-524
- Naumann M, Preuss A, Frankenberger R: Load capability of excessively flared teeth restored with fiber-reinforced composite posts and all-ceramic crowns. *Oper Dent*, 2006; 31: 699-704
- Naumann M, Preuss A, Frankenberger R: Reinforcement effect of adhesively luted fiber reinforced composite versus titanium posts. *Dent Mater*, 2007; 23: 138-144
- Naumann M, Reich S, Nothdurft FP, Beuer F, Schirrmeister JF, Dietrich T: Survival of glass fiber post restorations over 5 years. *Am J Dent*, 2008a; 21: 267-272
- Naumann M, Sterzenbach G, Rosentritt M, Beuer F, Frankenberger R: Is adhesive cementation of endodontic posts necessary? *J Endod*, 2008b; 34: 1006-1010
- Naumann M: Adhäsive postendodontische Rekonstruktion mit Glasfaserstiften - was gibt es zu beachten? *Quintessenz*, 2009; 60: 809-820
- Nergiz I, Schmage P, Platzer U, McMullan-Vogel CG: Effect of different surface textures on retentive strength of tapered posts. *J Prosthet Dent*, 1997; 78: 451-457

- Nergiz I, Schmage P, Platzer U, Ozcan M: Bond strengths of five tapered root posts regarding the post surface. *J Oral Rehabil*, 2002; 29: 330-335
- Nikaido T, Takano Y, Sasafuchi Y, Burrow MF, Tagami J: Bond strengths to endodontically-treated teeth. *Am J Dent*, 1999; 12: 177-180
- Nikolaenko SA, Lohbauer U, Roggendorf M, Petschelt A, Dasch W, Frankenberger R: Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin. *Dent Mater*, 2004; 20: 579-585
- Nissan J, Dmitry Y, Assif D: The use of reinforced composite resin cement as compensation for reduced post length. *J Prosthet Dent*, 2001; 86: 304-308
- Oshida Y, Miyazaki M: Dentin bonding system. Part II: Effect of crosshead speed. *Biomed Mater Eng*, 1996; 6: 87-100
- Ottl P, Hahn L, Lauer H, Fay M: Fracture characteristics of carbon fibre, ceramic and non-palladium endodontic post systems at monotonously increasing loads. *J Oral Rehabil*, 2002; 29: 175-183
- Ozturk B, Ozer F: Effect of NaOCl on bond strengths of bonding agents to pulp chamber lateral walls. *J Endod*, 2004; 30: 362-365
- Papa J, Cain C, Messer HH: Moisture content of vital vs endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol*, 1994; 10: 91-93
- Pashley DH: Clinical correlations of dentin structure and function. *J Prosthet Dent*, 1991; 66: 777-781
- Pashley DH: Smear layer: overview of structure and function. *Proc Finn Dent Soc*, 1992; 88 Suppl 1: 215-224
- Pashley DH, Ciucchi B, Sano H, Horner JA: Permeability of dentin to adhesive agents. *Quintessence Int*, 1993; 24: 618-631
- Pashley DH, Tay FR, Yiu C, Hashimoto M, Breschi L, Carvalho RM, Ito S: Collagen degradation by host-derived enzymes during aging. *J Dent Res*, 2004; 83: 216-221
- Paul SJ, Schärer P: Plastische Aufbauten in der Kronen- und Brückenprothetik. *Quintessenz*, 1996; 47: 1519-1531
- Paul SJ, Scharer P: The dual bonding technique: a modified method to improve adhesive luting procedures. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 1997a; 17: 536-545
- Paul SJ, Scharer P: Effect of provisional cements on the bond strength of various adhesive bonding systems on dentine. *J Oral Rehabil*, 1997b; 24: 8-14
- Pecora JD, Cussioli AL, Guerisoli DM, Marchesan MA, Sousa-Neto MD, Brugnera Junior A: Evaluation of Er:YAG laser and EDTAC on dentin adhesion of six endodontic sealers. *Braz Dent J*, 2001; 12: 27-30
- Pegoretti A, Fambri L, Zappini G, Bianchetti M: Finite element analysis of a glass fibre reinforced composite endodontic post. *Biomaterials*, 2002; 23: 2667-2682
- Perdigao J, Lopes M, Geraldeli S, Lopes GC, Garcia-Godoy F: Effect of a sodium hypochlorite gel on dentin bonding. *Dent Mater*, 2000; 311-323
- Perdigao J, Gomes G, Lee IK: The effect of silane on the bond strengths of fiber posts. *Dent Mater*, 2006; 22: 752-758
- Perdigao J, Gomes G, Augusto V: The effect of dowel space on the bond strengths of fiber posts. *J Prosthodont*, 2007; 16: 154-164

- Perez BE, Barbosa SH, Melo RM, Zamboni SC, Ozcan M, Valandro LF, Bottino MA: Does the thickness of the resin cement affect the bond strength of a fiber post to the root dentin? *Int J Prosthodont*, 2006; 19: 606-609
- Peroz I, Blankenstein F, Lange KP, Naumann M: Restoring endodontically treated teeth with posts and cores - a review. *Quintessence Int*, 2005; 36: 737-746
- Petrova Y: Canal adaptation of various dimensions of a double taper post in endodontically-treated teeth. Supervised project, Université de Montréal, Québec, Canada, 1999
- Pilo R, Shapenco E, Lewinstein I: Residual dentin thickness in bifurcated maxillary first premolars after root canal and post space preparation with parallel-sided drills. *J Prosthet Dent*, 2008; 99: 267-273
- Pioch T, Kobaslija S, Schagen B, Gotz H: Interfacial micromorphology and tensile bond strength of dentin bonding systems after NaOCl treatment. *J Adhes Dent*, 1999; 1: 135-142
- Pioch T, Sorg T, Stadler R, Hagge M, Dorfer CE: Resin penetration through submicrometer hiatus structures: a SEM and CLSM study. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2004; 71: 238-243
- Pirani C, Chersoni S, Foschi F, Piana G, Loushine RJ, Tay FR, Prati C: Does hybridization of intraradicular dentin really improve fiber post retention in endodontically treated teeth? *J Endodont*, 2005; 31: 891-894
- Piwowarczyk A, Lauer HC, Sorensen JA: Microleakage of various cementing agents for full cast crowns. *Dent Mater*, 2005; 21: 445-453
- Piwowarczyk A, Bender R, Ottl P, Lauer HC: Long-term bond between dual-polymerizing cementing agents and human hard dental tissue. *Dent Mater*, 2007; 23: 211-217
- Prati C, Chersoni S, Mongiorgi R, Montanari G, Pashley DH: Thickness and morphology of resin-infiltrated dentin layer in young, old, and sclerotic dentin. *Oper Dent*, 1999; 24: 66-72
- Prisco D, De Santis R, Mollica F, Ambrosio L, Rengo S, Nicolais L: Fiber post adhesion to resin luting cements in the restoration of endodontically-treated teeth. *Oper Dent*, 2003; 28: 515-521
- Purton DG, Chandler NP, Love RM: Rigidity and retention of root canal posts. *Br Dent J*, 1998; 184: 294-296
- Purton DG, Love RM, Chandler NP: Rigidity and retention of ceramic root canal posts. *Oper Dent*, 2000; 25: 223-227
- Purton DG, Chandler NP, Qualtrough AJ: Effect of thermocycling on the retention of glass-fiber root canal posts. *Quintessence Int*, 2003; 34: 366-369
- Radovic I, Mazzitelli C, Chieffi N, Ferrari M: Evaluation of the adhesion of fiber posts cemented using different adhesive approaches. *European Journal of Oral Sciences*, 2008a; 116: 557-563
- Radovic I, Monticelli F, Goracci C, Vulicevic ZR, Ferrari M: Self-adhesive resin cements: a literature review. *J Adhes Dent*, 2008b; 10: 251-258
- Randow K, Glantz PO: On cantilever loading of vital and non-vital teeth. An experimental clinical study. *Acta Odontol Scand*, 1986; 44: 271-277
- Reeh ES, Messer HH, Douglas WH: Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod*, 1989; 15: 512-516

- Ribeiro JCV, Coelho PG, Janal MN, Silva NRFA, Monteiro AJ, Fernandes CAO: The influence of temporary cements on dental adhesive systems for luting cementation. *J Dent*, 2011; 39: 255-262
- Ricketts DN, Tait CM, Higgins AJ: Tooth preparation for post-retained restorations. *Br Dent J*, 2005; 198: 463-471
- Robbins JW: Guidelines for the restoration of endodontically treated teeth. *J Am Dent Assoc*, 1990; 120: 558, 560, 562
- Roeder L, Berry Et, You C, Powers J: Bond strength of composite to air-abraded enamel and dentin. *Oper Dent*, 1995; 20: 186-190
- Rovatti L, Dallari A: I Perni Endocanalari II Edizione. In: Edizioni Martina srl. Bologna 1996: 65-72
- Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gofredsen K: Retention and failure morphology of prefabricated posts. *Int J Prosthodont*, 2004; 17: 307-312
- Salameh Z, Sorrentino R, Papacchini F, Ounsi HF, Tashkandi E, Goracci C, Ferrari M: Fracture resistance and failure patterns of endodontically treated mandibular molars restored using resin composite with or without translucent glass fiber posts. *J Endod*, 2006; 32: 752-755
- Salameh Z, Sorrentino R, Ounsi HF, Sadig W, Atiyeh F, Ferrari M: The effect of different full-coverage crown systems on fracture resistance and failure pattern of endodontically treated maxillary incisors restored with and without glass fiber posts. *J Endod*, 2008; 34: 842-846
- Salman MI, Baumann MA, Hellmich M, Roggendorf MJ, Termaat S: SEM evaluation of root canal debridement with Sonicare CanalBrush irrigation. *Int Endod J*, 2010; 43: 363-369
- Sanares AM, Itthagarun A, King NM, Tay FR, Pashley DH: Adverse surface interactions between one-bottle light-cured adhesives and chemical-cured composites. *Dent Mater*, 2001; 17: 542-556
- Santos AF, Tanaka CB, Lima RG, Esposito CO, Ballester RY, Braga RR, Meira JB: Vertical root fracture in upper premolars with endodontic posts: finite element analysis. *J Endod*, 2009; 35: 117-120
- Santos AF, Meira JB, Tanaka CB, Xavier TA, Ballester RY, Lima RG, Pfeifer CS, Versluis A: Can fiber posts increase root stresses and reduce fracture? *J Dent Res*, 2010; 89: 587-591
- Saunders EM, Saunders WP: The heat generated on the external root surface during post space preparation. *Int Endod J*, 1989; 22: 169-173
- Saunders WP, Saunders EM: Coronal leakage as a cause of failure in root canal therapy: a review. *Endod Dent Traumatol*, 1994; 10: 105-108
- Schirmeister J, Hermanns P, Meyer K, Goetz F, Hellwig E: Detectability of residual Epiphany and gutta-percha after root canal retreatment using a dental operating microscope and radiographs – an ex vivo study. *Int Endod J*, 2006; 39: 558-565
- Schmage P, Pfeiffer P, Pinto E, Platzer U, Nergiz I: Influence of oversized dowel space preparation on the bond strengths of FRC posts. *Oper Dent*, 2009a; 34: 93-101
- Schmage P, Cakir FY, Nergiz I, Pfeiffer P: Effect of surface conditioning on the retentive bond strengths of fiber reinforced composite posts. *J Prosthet Dent*, 2009b; 102: 368-377

- Schönbrodt M, Schmage P, Nergiz I, Platzer U: Haftfestigkeit zahnfarbener Wurzelstifte in Abhängigkeit von der Oberflächenbehandlung und dem Befestigungskomposit. Dtsch Zahnärztl Z, 2003; 58: 55-59
- Schroeder HE, Scherle W: Strukturmerkmale der anorganischen Dentinwandung der Pulpa bei jungen und älteren Menschen. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1988; 98: 357-366
- Schröder HE: Orale Strukturbiologie, Thieme. 1992
- Schwartz RS, Robbins JW: Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review. J Endod, 2004; 30: 289-301
- Sedgley CM, Messer HH: Are endodontically treated teeth more brittle? J Endod, 1992; 18: 332-335
- Segerstrom S, Astback J, Ekstrand KD: A retrospective long term study of teeth restored with prefabricated carbon fiber reinforced epoxy resin posts. Swed Dent J, 2006; 30: 1-8
- Sen D, Poyrazoglu E, Tuncelli B: The retentive effects of pre-fabricated posts by luting cements. J Oral Rehabil, 2004; 31: 585-589
- Senawongse P, Srihanon A, Muangmingsuk A, Harnirattisai C: Effect of dentine smear layer on the performance of self-etching adhesive systems: A micro-tensile bond strength study. Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials, 2010; 94: 212-221
- Serafino C, Gallina G, Cumbo E, Ferrari M: Surface debris of canal walls after post space preparation in endodontically treated teeth: a scanning electron microscopic study. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2004; 97: 381-387
- Serafino C, Gallina G, Cumbo E, Monticelli F, Goracci C, Ferrari M: Ultrasound effects after post space preparation: An SEM study. J Endod, 2006; 32: 549-552
- Sevimay S, Dalat D: Evaluation of penetration and adaptation of three different sealers: a SEM study. J Oral Rehabil, 2003; 30: 951-955
- Shadman S, Sadat Sabei N, Gardus M: Endocomposipost UM (canal adaptation in endodontically-treated teeth). Supervised project, Université de Montréal, Québec, Canada, 1998
- Shillingburg HT, Kessler JC: Restoration of the Endodontically-treated tooth. Chicago 1982a
- Shillingburg HT, Kessler JC, Wilson EL Jr: Root dimensions and dowel size. CDA J, 1982b; 10: 43-49
- Sidoli GE, King PA, Setchell DJ: An in vitro evaluation of a carbon fiber-based post and core system. J Prosthet Dent, 1997; 78: 5-9
- Signore A, Kaitsas V, Ravera G, Angiero F, Benedicenti S: Clinical evaluation of an oval-shaped prefabricated glass fiber post in endodontically treated premolars presenting an oval root canal cross-section: a retrospective cohort study. Int J Prosthodont, 2011; 24: 255-263
- Sirimai S, Riis DN, Morgano SM: An in vitro study of the fracture resistance and the incidence of vertical root fracture of pulpless teeth restored with six post-and-core systems. J Prosthet Dent, 1999; 81: 262-269
- Soares CJ, Santana FR, Castro CG, Santos-Filho PC, Soares PV, Qian F, Armstrong SR: Finite element analysis and bond strength of a glass post to intraradicular

- dentin: comparison between microtensile and push-out tests. *Dental Materials*, 2008; 24: 1405-1411
- Sorensen JA, Martinoff JT: Intracoronal reinforcement and coronal coverage: a study of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 1984; 51: 780-784
- Sorensen JA, Engelman MJ: Effect of post adaptation on fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 1990; 64: 419-424
- Sorensen J, Ahn S, Berge H, Edelhoff D: Selection criteria for post and core materials in the restoration of endodontically treated teeth. *Academy of Dental Materials, Transactions of the Conference on Scientific Criteria for Selecting Materials and Techniques in Clinical Dentistry, Siena, Italy*, 2001; 67-84
- Sorrentino R, Monticelli F, Goracci C, Zarone F, Tay FR, Garcia-Godoy F, Ferrari M: Effect of post-retained composite restorations and amount of coronal residual structure on the fracture resistance of endodontically-treated teeth. *Am J Dent*, 2007; 20: 269-274
- Standlee JP, Caputo AA, Collard EW, Pollack MH: Analysis of stress distribution by endodontic posts. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 1972; 33: 952-960
- Standlee JP, Caputo AA, Hanson EC: Retention of endodontic dowels: effects of cement, dowel length, diameter, and design. *J Prosthet Dent*, 1978; 39: 400-405
- Stankiewicz NR, Wilson PR: The ferrule effect: a literature review. *Int Endod J*, 2002; 35: 575-581
- Stern N, Hirshfeld Z: Principles of preparing endodontically treated teeth for dowel and core restorations. *J Prosthet Dent*, 1973; 30: 162-165
- Sterzenbach G: Befestigen im Wurzelkanal. *Zahnarzt & Praxis*, 2010; 13: 336-341
- Stockton LW: Factors affecting retention of post systems: a literature review. *J Prosthet Dent*, 1999; 81: 380-385
- Suliman AH, Boyer DB, Lakes RS: Polymerization shrinkage of composite resins: comparison with tooth deformation. *J Prosthet Dent*, 1994; 71: 7-12
- Tang W, Wu Y, Smales RJ: Identifying and reducing risks for potential fractures in endodontically treated teeth. *J Endod*, 2010; 36: 609-617
- Tay FR, Loushine RJ, Lambrechts P, Weller RN, Pashley DH: Geometric factors affecting dentin bonding in root canals: a theoretical modeling approach. *J Endod*, 2005; 31: 584-589
- Tay FR, Pashley DH, Loushine RJ, Weller RN, Monticelli F, Osorio R: Self-etching adhesives increase collagenolytic activity in radicular dentin. *J Endod*, 2006; 32: 862-868
- Tay FR, Pashley DH: Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod*, 2007; 33: 391-398
- Thoma M. Rasterelektronenmikroskopische Analyse des adhäsiven Verbundes konfektionierter zahnfarbener Wurzelstifte in formkongruenten und übergroßen Wurzelkanälen. *Zahnmed Diss, Saarland* 2008: 50, 63, 67, 75
- Titley KC, Chernecky R, Rossouw PE, Kulkarni GV: The effect of various storage methods and media on shear-bond strengths of dental composite resin to bovine dentine. *Arch Oral Biol*, 1998; 43: 305-311
- Torbjörner A, Fransson B: A literature review on the prosthetic treatment of structurally compromised teeth. *Int J Prosthodont*, 2004; 17: 369-376

- Torstenson B, Brannstrom M: Contraction gap under composite resin restorations: effect of hygroscopic expansion and thermal stress. *Oper Dent*, 1988; 13: 24-31
- Torbjörner A, Karlsson S, Odman PA: Survival rate and failure characteristics for two post designs. *J Prosthet Dent*, 1995; 73: 439-444
- Trope M, Maltz DO, Tronstad L: Resistance to fracture of restored endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol*, 1985; 1: 108-111
- Uchiyama M, Anzai M, Yamamoto A, Uchida K, Utsuno H, Kawase Y, Kasahara E: Root canal system of the maxillary canine. *Okajimas Folia Anat Jpn*, 2011; 87: 189-193
- Ungor M, Onay EO, Orucoglu H: Push-out bond strengths: the Epiphany-Resilon endodontic obturation system compared with different pairings of Epiphany, Resilon, AH Plus and gutta-percha. *Int Endod J*, 2006; 39: 643-647
- Uno S, Finger WJ: Effects of acidic conditioners on dentine demineralization and dimension of hybrid layers. *J Dent*, 1996; 24: 211-216
- Utter JD, Wong BH, Miller BH: The effect of cementing procedures on retention of prefabricated metal posts. *J Am Dent Assoc*, 1997; 128: 1123-1127
- Van Meerbeek B, Inokoshi S, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G: Morphological aspects of the resin-dentin interdiffusion zone with different dentin adhesive systems. *J Dent Res*, 1992; 71: 1530-1540
- Van Meerbeek B, Lambrechts P, Vanherle G: Kunststoff-Dentin-Grenzflächen nach Total-Etch/Total Bonding. *Phillip J*, 1997; 14: 313-315
- Van Meerbeek B, Van Landuyt K, De Munck J, Hashimoto M, Peumans M, Lambrechts P, Yoshida Y, Inoue S, Suzuki K: Technique-sensitivity of contemporary adhesives. *Dent Mater J*, 2005; 24: 1-13
- Van Nieuwenhuysen JP, D'Hoore W, Carvalho J, Qvist V: Long-term evaluation of extensive restorations in permanent teeth. *J Dent*, 2003; 31: 395-405
- Vano M, Goracci C, Monticelli F, Tognini F, Gabriele M, Tay FR, Ferrari M: The adhesion between fibre posts and composite resin cores: the evaluation of microtensile bond strength following various surface chemical treatments to posts. *Int Endod J*, 2006; 39: 31-39
- VDW: Wissenschaftliche Publikationen und klinische Evaluationen zu quarzfaser-verstärkten Wurzelstiften, 2008
- Viotti RG, Kasaz A, Pena CE, Alexandre RS, Arrais CA, Reis AF: Microtensile bond strength of new self-adhesive luting agents and conventional multistep systems. *J Prosthet Dent*, 2009; 102: 306-312
- Walter R, Swift EJ Jr, Sheikh H, Ferracane JL: Effects of temperature on composite resin shrinkage. *Quintessenz Int*, 2009; 40: 843-847
- Wataha JC: Biocompatibility of dental casting alloys: a review. *J Prosthet Dent*, 2000; 83: 223-234
- Watson TF: Applications of confocal scanning optical microscopy to dentistry. *Br Dent J*, 1991; 171: 287-291
- Watzke R, Blunck U, Frankenberger R, Naumann M: Interface homogeneity of adhesively luted glass fiber posts. *Dent Mater*, 2008; 24: 1512-1517
- Wendt SL, McInnes PM, Dickinson GL: The effect of thermocycling in microleakage analysis. *Dent Mater*, 1992; 8: 181-184

- Wirz J, Christ R: In vitro study of the occurrence of screw and pin corrosion in dental prosthesis structures. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 1982; 92: 408-428
- Wrbas KT, Altenburger MJ, Schirrmeister JF, Bitter K, Kielbassa AM: Effect of adhesive resin cements and post surface silanization on the bond strengths of adhesively inserted fiber posts. *J Endod*, 2007; 33: 840-843
- Wu MK, Pehlivan Y, Kontakiotis EG, Wesselink PR: Microleakage along apical root fillings and cemented posts. *J Prosthet Dent*, 1998; 79: 264-269
- Yang B, Wolfart S, Li Q, Balbosh A, Kern M: Retention of prefabricated titanium dowels cemented with three luting resins. *J Adhes Dent*, 2010; 12: 487-495
- Yoldas O, Akova T, Uysal H: An experimental analysis of stresses in simulated flared root canals subjected to various post-core applications. *J Oral Rehabil*, 2005; 32: 427-432
- Yoshiyama M, Sano H, Ebisu S, Tagami J, Ciucchi B, Carvalho RM, Johnson MH, Pashley DH: Regional strengths of bonding agents to cervical sclerotic root dentin. *J Dent Res*, 1996; 75: 1404-1413
- Zappini G, Seitner T: Röntgenopazität und Lichtleitung von glasfaserverstärkten Wurzelstiften. *Quintessenz*, 2005; 56: 875-888
- Zhang L, Huang L, Xiong Y, Fang M, Chen JH, Ferrari M: Effect of post-space treatment on retention of fiber posts in different root regions using two self-etching systems. *Eur J Oral Sci*, 2008; 116: 280-286
- Zicari F, Couthino E, De Munck J, Poitevin A, Scotti R, Naert I, Van Meerbeek B: Bonding effectiveness and sealing ability of fiber-post bonding. *Dent Mater*, 2008; 24: 967-977
- Zicari F, Van Meerbeek B, Debels E, Lesaffre E, Naert I: An up to 3-Year Controlled Clinical Trial Comparing the Outcome of Glass Fiber Posts and Composite Cores with Gold Alloy-Based Posts and Cores for the Restoration of Endodontically Treated Teeth. *Int J Prosthodont*, 2011; 24: 363-372
- Zöfel P: *Statistik verstehen. Ein Begleitbuch zur computergestützten Anwendung.* Adwison-Wesley, München, 2002: 77, 85-93

11 Anhang

11.1 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
Aqua dest.	destilliertes Wasser
Bis-GMA	Bisphenol-A-Glycidyl-Dimethacrylat
CCD	Charge-coupled Device
C-Faktor	(C = configuration) Konfigurationsfaktor
CLSM	Konfokale Laser-Raster-Mikroskopie
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
DT	Double Taper
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
E-Modul	Elastizitätsmodul
et al.	et alii = und andere
FE-Analyse	Finite-Element-Analyse
FNA	Natrium Fluoreszein
Gew.-%	Gewichtsprozent
GPa	Gigapascal
HEMA	Hydroxyethylmethacrylat
HSD	Honestly Significant Difference
ISO	International Organization for Standardization
K-Silikon	kondensationsvernetzendes Silikon
LED	Leuchtdiode
MMA	Methylmethacrylat
MMPs	Matrix-Metalloproteinasen
MOD	mesial, okklusal, distal
MPa	Megapascal
MPS	Methacryloxypropyltrimethoxysilan

n	Anzahl
OPMI	Operationsmikroskop
p	Signifikanzniveau
psi	Pound-force per square inch
PVD	Physical-Vapour-Deposition
R	Rosenbohrer
RCT	Randomized Controlled Trial
REM	Raster-Elektronen-Mikroskopie
RITC	Rhodamin B Isothiocyanat
SD	Standardabweichung
S-Faktor	(S = shrinkage) Schrumpfungsfaktor
SL	Safety Lock
Tab.	Tabelle
TEGDMA	Triethylenglycol-Dimethacrylat
Tiff	Tagged Image File Format
u. a.	unter anderem
UDMA	Urethan-Dimethacrylat
UV	Ultraviolet
V	Vorbohrer
WF	Wurzelfüllung
WKB	Wurzelkanalbehandlung
z.B.	zum Beispiel

11.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Das DT Light Post SL System.....	20
Abb. 2	Abmessungen des DT Light Post SL (Größe 3).....	21
Abb. 3	SmartCem2 mit aufgesetzter Applikationskanüle.....	21
Abb. 4	CoreX Flow mit dem Konditionierungssystem.....	22
Abb. 5	Der Phantomkopf mit eingesetzten Modellen.....	29

Abb. 6	Die Stiftbettpräparationsarten.....	30
Abb. 7	Der Airsonic Mini-Sandstrahler	31
Abb. 8	Die Reinigung mit feuchtem Bimsmehl und Curaprox-Bürstchen	31
Abb. 9	Die Reinigungsmethoden im Überblick	32
Abb. 10	Die Applikationskanülen für den Wurzelkanal	33
Abb. 11	Das Einsetzen der Wurzelkanalstifte nach der Applikation des Befestigungskomposites mithilfe der Applikationskanülen.....	34
Abb. 12	Darstellung der Insertionstiefe der Faserstifte.....	34
Abb. 13	Eingespannte Zahnwurzel, zum Einbetten vorbereitet.....	36
Abb. 14	In das Technovit herabgelassene Zahnwurzel.....	36
Abb. 15	Gelöste Position des Kreuzarmes beim Beginn des Aushärtens des Einbettkunststoffes.....	36
Abb. 16	Der Hakenschlüssel.....	37
Abb. 17	Das Klemmstück.....	37
Abb. 18	Die Herstellung der Abzugshaken.....	38
Abb. 19	Darstellung des Versuchaufbaus.....	39
Abb. 20	Auszugsversuch.....	40
Abb. 21	Abmessung der Zementreste an der Vorderseite des Faserstiftes.....	41
Abb. 22	Abmessung der Zementreste an der Rückseite des Faserstiftes.....	41
Abb. 23	Grafische Darstellung der Retentionswerte jeder Befestigungskomposit-Gruppe.....	45
Abb. 24	Die Versagensmodi.....	48
Abb. 25	Der transluzente DT Light Post.....	49
Abb. 26	Grafische Darstellung der Versagensmodiverteilung in den Präparationsgruppen.....	49
Abb. 27	Übersicht über das Score-System mit je zwei Beispielen zu einem Sauberkeitsgrad.....	51
Abb. 28	Wurzelkanaloberfläche einer Probe aus der Kontrollgruppe.....	52
Abb. 29	Vergleich der Wurzelkanaloberflächen aller Reinigungsgruppen.....	53
Abb. 30	Die Kanalwand nach der Stiftbettpräparation mit einem überlangen	

	Rosenbohrer.....	53
Abb. 31	Die Kanalwand nach der Stiftbettpräparation mit dem Vorbohrersystem.....	54
Abb. 32	Aufnahme der Verbundschicht von CoreX Flow/XP Bond.....	55
Abb. 33	Aufnahme der Verbundschicht von CoreX Flow/XP Bond.....	55
Abb. 34	Aufnahme der Verbundschicht von CoreX Flow/XP Bond.....	56
Abb. 35	Aufnahme der Verbundschicht von SmartCem2.....	56

11.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle I	Zusammensetzung der Materialien.....	23
Tabelle II	Zusammensetzung von Excite.....	24
Tabelle III	Retentionswerte in Abhängigkeit von der Reinigungsmethode.....	46
Tabelle IV	Retentionswerte in Abhängigkeit von der Präparationsart.....	46
Tabelle V	Retentionswerte in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial.....	47
Tabelle VI	Prozentuale Verteilung der Versagensmodi in Abhängigkeit vom Befestigungskomposit und der Präparationsart.....	47
Tabelle VII	Prozentuale Verteilung der Proben jeder Reinigungsgruppe anhand ihrer Sauberkeitsgrade.....	50
Tabelle VIII	Übersicht über die Studien zur Auswirkung der Kompositfugenbreite auf die Haftkraft bzw. Retentionskraft von Wurzelkanalstiften.....	71

11.4 Liste der verwendeten Materialien

Material	Name des Materials	LOT Nummer
Adhäsiv	XP Bond/Self-Cure Activator; Dentsply, Konstanz, Deutschland	0811001247, 080624
Applikationshilfe für das Adhäsiv	Wurzelkanal-Applikator-Tips; Dentsply, Konstanz, Deutschland	10202300
Applikationshilfe für das Befestigungsmaterial	Mix Tips; Dentsply, Konstanz, Deutschland	1001000717, 0911001149
Ätzel	De Trey Conditioner 36; Dentsply, Konstanz,	0807002999

	Deutschland	
Aufbaukomposit	CoreX Flow; Dentsply, Konstanz, Deutschland	090930, 091021, 0809111
Erweiterungsbohrer	DT Finishing Drill (Größe 3); VDW, München, Deutschland	40909
Faserstifte	DT Light Post SL (Größe 3); VDW, München, Deutschland	0910001451, 0910000034
selbstadhäsiver Befestigungszement	SmartCem2; Dentsply, Konstanz, Deutschland	090331, 091206, 091218
Universalbohrer	DT Universal Drill; VDW, München, Deutschland	30907

11.5 Liste der verwendeten Hilfsmaterialien

Alkohol, 96%ig	Krankenhausapotheke der Charité - Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland
Aluminiumoxid	Aluminiumoxid, 50 µm; Korox, BEGO, Bremen, Deutschland
Applikationsnadel	Applikationsnadel; Dentsply, Konstanz, Deutschland
Cavit	3M ESPE, Seefeld, Deutschland
Chloramin-T-Lösung	0,5%ige Chloramin-T-Lösung; Krankenhausapotheke der Charité - Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland
Einbettkunststoff	Technovit 4071; Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland
Einwegspritze	Einwegspritze; Vedefar NV Dilbeek, Belgien
Endo-Feilen	Mtwo-System; Flex-Master-System; Reamer ISO 15; VDW, München, Deutschland
Endo-Kanüle	Endo-Kanüle nach Dr. J. Buquet, Durchmesser: 0,35 mm; Vedefar NV Dilbeek, Belgien
Excite DSC	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein
Guttaperchastifte	ISO 60/.02; VDW GmbH, München, Deutschland
Kochsalzlösung	NaCl 0,9 %; Fresenius Kabi GmbH, Bad Homburg, Deutschland
K-Silikon	Silaplast; Pearson Dental Supply Co, USA

Messlehre	Minifix-Messlehre; VDW, München, Deutschland
Natrium Fluoreszein	Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Deutschland
Natriumhypo- chloritlösung	Natriumhypochlorit 1 %; Aug. Hedinger, Stuttgart, Deutschland
Objektträger	Plexiglas-Objektträger 25x75x2 mm Diaplug, Oststeinbeck, Deutschland
Papierspitzen	Weißer Papierspitzen ISO 60; VDW, München, Deutschland
PA-Sonde	HuFriedy, Chicago, USA
Phosphor- säuregel	Total Etch; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein
Polierbürstchen	Occlubrush; Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co., Lemgo, Deutschland
Rhodamin B Isothiocyanat	Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Deutschland
Rosenbohrer	überlange Rosenbohrer; Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co, Lemgo, Deutschland
Scaler	SM239; HuFriedy, Chicago, USA
Schleifpapier	Körnung 2500 und 4000; Exakt Vertriebs GmbH
Sealer	2Sealer; VDW, München, Deutschland
Sekundenkleber	Henkel, Düsseldorf, Deutschland
Trennscheibe	diamantierte Trennscheibe; Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co., Lemgo, Deutschland
Vaseline	Vaseline; Winthrop Arzneimittel GmbH, Mülheim-Kärlich, Deutschland
Wasserwaage	2D-Wasserwaage; STABILA Messgeräte Gustav Ullrich GmbH, Annweiler am Trifels, Deutschland
Wurzelfüllsystem	BeeFill-System; CDW, München, Deutschland
Wurzelkanal- bürstchen	Spiral-Bürstchen der Größe 12; Curaprox, Curaden, Schweiz

11.6 Geräteliste

Phantomkopf- einheit	Simulationseinheit Premium; Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland
-------------------------	---

CCD Kamera	Color View Illu; Olympus, Hamburg, Deutschland
Eichskala	Wild-Eichskala; Leica, Bensheim, Deutschland
Konfokales Laser-Raster-Mikroskop	Leica TCS SL; Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland
Lichtleistungsmessgerät	bluephase meter; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein
Lupenbrille	Heine C 2.3 K Kopfbandlupe, 2,5-fache Vergrößerung; Heine Optotechnik, Herrsching, Deutschland
Messdose 2,5 kN	Zwick Roell, Ulm, Deutschland
Mikrometer-schraube	Digimatic Bügelmessschraube; Mitutoyo, Kawasaki, Japan
Mini-Sandstrahler	Airsonic Mini-Sandstrahler; Hager & Werken GmbH, Duisburg, Deutschland
OP-Mikroskop	OPMI pico; Carl Zeiss Jena GmbH, Jena, Deutschland
Parallelometer	Degussa Dental, Düsseldorf, Deutschland
Polymerisationslampe	LED-Polymerisationslampe; Elipar Freelight 2; 3M ESPE, Neuss, Deutschland
Präzisions-diamantbandsäge	Exakt 300; Exakt Vertriebs GmbH, Norderstedt, Deutschland
Rasterelektronenmikroskop	Cam Scan Maxim 2040; Cam Scan Maxim Elektron Optics, Cambridge, UK
Reduzierstück	LUX2-Reduzierstück; KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland
Schleifmaschine	Exakt 400 CS; Exakt Vertriebs GmbH, Norderstedt, Deutschland
Stereomikroskop	DV 4; Zeiss, Jena, Deutschland
Teflonform	Technische Abteilung der Charité – Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland
Ultraschall	Sirosonic; Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim Deutschland
Universalprüfmaschine	Zwick Roell, Ulm, Deutschland

11.8 Danksagung

Besonders möchte ich mich bei meiner Betreuerin und Ansprechpartnerin, Frau OÄ PD Dr. Kerstin Bitter (Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Präventivzahnmedizin des CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin), für die Überlassung des interessanten Themas, die freundliche Betreuung und die Erstellung des Erstgutachtens bedanken.

Herrn OA Dr. Gabriel Krastl (Klinik für Parodontologie, Endodontologie und Kariologie, Universität Basel) danke ich für die fachliche Beratung und Unterstützung.

Auch den Mitarbeitern der Abteilung für Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie der Charité - Universitätsmedizin Berlin, allen voran Herrn Dipl.-Biol. Dr. Herbert Renz, gilt mein Dank für die nette Zusammenarbeit.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Rainer Toll (Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Präventivzahnmedizin des CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin) und Frau Gabriele Bölling (Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre der Charité - Universitätsmedizin Berlin), die mir stets mit Rat und Tat bei der Bedienung der Geräte zur Seite standen.

Nicht versäumen will ich, mich bei Prof. Dr. Victor Tarabykin und Jun.-Prof. Dr. Anja U. Bräuer, der Leitung des Instituts für Zellbiologie und Neurobiologie der Charité - Universitätsmedizin Berlin, für die Erlaubnis zur Nutzung ihres Konfokalen Laser-Raster-Mikroskops zu bedanken. Besonders möchte ich hierbei Jutta Schüler erwähnen, die mir bei der Bedienung des Mikroskops zur Seite stand.

Sehr verbunden bin ich außerdem Christin Gläser und Michael Eichhorn, die mich bei der Anfertigung der Bilder unterstützt haben.

Ein herzlicher Dank gilt schließlich meiner Familie. Ohne sie wären ein Studium sowie eine Doktorarbeit niemals möglich geworden.

11.9 Lebenslauf

"Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen
Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht."

"Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen
Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht."

11.10 Eidesstattliche Erklärung

„Ich, Wladimir Eirich, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: `Einfluss der Reinigungsmethode, des Befestigungskomposites und der Stiftbettpräparation auf die Retention faserverstärkter Wurzelkanalstifte` selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Datum: 20.06.2012

Unterschrift