

Aus dem CharitéCentrum 3
für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Andrej M. Kielbassa

HABILITATIONSSCHRIFT

DIE VERSORGUNG ENDODONTISCH BEHANDELTER ZÄHNE MIT FASERVERSTÄRKTEN WURZELKANALSTIFTEN UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DES ADHÄSIVEN VERBUNDES IM WURZELKANAL

zur Erlangung der Lehrbefähigung für das Fach Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. dent. Kerstin Bitter
geboren am 12.02.1974 in Kiel

2010

Dekanin: Frau Prof. Dr. med. Annette Grütters-Kieslich

1. Gutachter: Herr Prof. Dr. R. Weiger / Basel

2. Gutachter: Herr PD Dr. U. Lohbauer / Erlangen

Datum des öffentlich-wissenschaftlichen Vortrags: 14.6.2010

MEINER FAMILIE

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Wissenschaftlicher Hintergrund	2
2.1. Die Versorgung endodontisch behandelter Zähne	2
2.2. Der Einsatz von Wurzelkanalstiften	2
2.2.1. Faserverstärkte Wurzelkanalstifte	4
2.2.2. Adhäsive Befestigung faserverstärkter Wurzelkanalstifte	5
2.2.3. Verbund zum Wurzelkanalidentin	5
2.2.4. Verbund zur Stiftoberfläche	7
2.3. Klinische Evaluation faserverstärkter Wurzelkanalstifte	9
3. Fragestellungen der vorgestellten Arbeiten	10
4. Vorstellung der Originalarbeiten	11
5. Diskussion	12
5.1. Einfluss von Vorbehandlung und thermozyklischer Wechselbelastung auf die Haftung von Aufbaukompositmaterialien zu verschiedenen faserverstärkten Wurzelkanalstiften	12
5.2. Haftung von Faserstiften nach der Applikation des Erbium:Yttrium-Aluminium-Garnet-Lasers und gasförmigen Ozons im Wurzelkanal	14
5.3. Validierung der konfokalen Laser-Rasterelektronenmikroskopie mit der Rasterelektronenmikroskopie zur Visualisierung des adhäsiven Verbundes im Wurzelkanal	16
5.4. Morphologische Analyse und Haftwertmessungen verschiedener Befestigungskomposite zum Wurzelkanalidentin	18
5.5. Randomisierte klinische Studie über den Einfluss der Stiftinsertion auf die Versagensrate postendodontischer Versorgungen	21
6. Schlussfolgerung und Ausblick	23
7. Zusammenfassung	25
8. Literaturverzeichnis	29
9. Danksagung	38
10. Eidesstattliche Erklärung nach § 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité	39

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

10-MDP	10-Methacryloyloxydecyl-Dihydrogenphosphat
CLSM	konfokales Laser-Rastermikroskop
Er:YAG-Laser	Erbium:Yttrium-Aluminium-Garnet-Laser
IPN	zu interpenetrierendes Polymernetzwerk
MMP	Matrix-Metallo-Proteinasen
MPS	Methacryloxypropyltrimethoxysilan
REM	Rasterelektronenmikroskop
RITC	Rhodamin-B-Isothiocyanat

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Seite 7 Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines adhäsiv mit einem Befestigungskomposit (B) in den Wurzelkanal (D) eingesetzten Glasfaserstiftes (S). In diesem Fall wurde ein Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem verwendet (Excite DSC/Variolink II; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein).
- Seite 9 Abbildung 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Verbundschicht eines Etch-and-Rinse-Systems zum Wurzelkanalentin (Excite DSC/ Variolink II; Ivoclar Vivadent). Nach Entfernung der Zahnhartsubstanz wird die Verbundschicht mit zahlreichen Kunststofftags sowie einer ausgeprägten Hybridschicht deutlich.
- Seite 59 Abbildung 3a: Aufnahme mit dem konfokalen Laser-Rastermikroskop eines mit dem selbstkonditionierendem Adhäsivsystem ED Primer und dem Befestigungskomposit Panavia F 2.0 (Kuraray) befestigten Glasfaserstiftes im Wurzelkanal. Die Hybridschicht (grün) ist mit Pfeilen gekennzeichnet. Das Befestigungskomposit ist rot angefärbt.
- Seite 59 Abbildung 3b: Der Ausschnitt derselben Probe nach dem Ausstoßversuch verdeutlicht, dass das Versagen in diesem Fall zwischen Befestigungskomposit und mit Adhäsiv infiltriertem Dentin auftrat.
- Seite 59 Abbildung 4a: Die Befestigung des faserverstärkten Wurzelstiftes erfolgt bei dieser konfokalen laser-rastermikroskopischen Aufnahme mit dem Adhäsivsystem Excite DSC (grün) und dem Befestigungskomposit Variolink II (rot) (Vivadent Ivoclar), welches eine Konditionierung des Dentins mit Phosphorsäure erfordert.
- Seite 59 Abbildung 4b: Die Abbildung nach dem Ausstoßversuch belegt, dass ein Großteil der Hybridschicht und mit Adhäsiv und Komposit infiltrierten Dentintubuli fehlt, was somit auf ein kohäsives Versagen im Dentin hindeutet.

1. EINLEITUNG

Der Wiederaufbau zerstörter devitaler Zähne nach einer endodontischen Behandlung stellt eine Routinemaßnahme in der zahnärztlichen Praxis dar (Morgano *et al.*, 1994; Naumann *et al.*, 2006b) und dient dem Erhalt des natürlichen Zahnes. Hierfür werden in der Zahnmedizin seit Jahrzehnten gegossene metallische Stiftaufbauten als Therapie der Wahl eingesetzt. Diese Behandlungsmethode zeigt jedoch ein gehäuftes Auftreten von Wurzelfrakturen, die oftmals die Extraktion des Zahnes zur Folge haben (Axelsson *et al.*, 2004), sowie Retentionsverluste und ästhetische Nachteile.

Die Einführung transluzenter faserverstärkter Wurzelkanalstifte in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts als Alternative zu gegossenen metallischen Wurzelkanalstiften verspricht neben einer Kostenreduktion ästhetische Vorzüge. Als entscheidender Faktor wird vor allem die Vermeidung von Wurzelfrakturen beschrieben, die durch ein dem Dentin ähnliches Elastizitätsmodul dieser Stiftsysteme sowie deren adhäsive Befestigung begründet wird (Bateman *et al.*, 2003; Schwartz und Robbins, 2004). Dabei wird eine funktionelle Einheit zwischen Wurzelkanaldentin, Befestigungskomposit und Faserstift angestrebt; diese wird auch als adhäsiver Monoblock beschrieben (Tay und Pashley, 2007). Die adhäsive Verankerung im Wurzelkanal ist jedoch im Vergleich zur adhäsiven Befestigung von Restaurationmaterialien am koronalen Dentin mit erhöhten Schwierigkeiten verbunden. Eine effiziente Hybridisierung des Dentins wurde in einigen Studien in Frage gestellt (Cury *et al.*, 2006; Goracci *et al.*, 2005a; Sadek *et al.*, 2006). Um die angestrebte funktionelle Einheit zu erreichen, sollte zwischen allen Komponenten ein optimaler Verbund bestehen.

Die vorliegende Habilitationsschrift beschäftigt sich eingehend und systematisch mit dem Verbund zwischen Befestigungskomposit und Stiftoberfläche sowie mit dem Verbund zwischen Befestigungskomposit und Wurzelkanaldentin, welcher unter Berücksichtigung verschiedener Vorbehandlungen und Materialien analysiert wird. Darüber hinaus wird die Verbundschicht verschiedener Befestigungsmaterialien zum Wurzelkanaldentin erstmals mit dem Dualfluoreszenzmodus des konfokalen Laser-Rasterelektronenmikroskops visualisiert und diese Form der Bildgebung mit dem Rasterelektronenmikroskop validiert. Die klinische Datenlage über den Einfluss des Stifttyps und der Stiftinsertion sowie der verbliebenen koronalen Restzahnhartsubstanz auf die Versagensrate postendodontischer Restaurationen ist bislang aufgrund der unterschiedlichen bearbeiteten Fragestellungen unzureichend (Bolla *et al.*, 2007; Cagidiaco *et al.*, 2008b); eine prospektive randomisierte klinische Studie soll hierzu einen weiterführenden Beitrag leisten.

Ziel dieser Arbeit ist es, die beschriebene Behandlungsmethode sowie auf unterschiedlichen Haftmechanismen basierende Befestigungsmaterialien eingehender zu untersuchen, um die wissenschaftliche Grundlage zu erweitern, auf der die Auswahl von Materialien und Indikationen für den Einsatz dieser Stiftsysteme gestellt werden können. So sollen die Prognose der Behandlungsmethode abgesichert und das Risiko klinischer Misserfolge minimiert werden.

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine kumulative Habilitationsschrift. Zunächst wird ein Überblick über den wissenschaftlichen Hintergrund gegeben. Anschließend erfolgt die Formulierung der Fragestellungen sowie die Vorstellung der relevanten Originalarbeiten. In der Diskussion werden die Ergebnisse im gemeinsamen wissenschaftlichen Kontext erörtert, Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsansätze gegeben. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung der Arbeiten.

2. WISSENSCHAFTLICHER HINTERGRUND

2.1. DIE VERSORGUNG ENDODONTISCH BEHANDELTEN ZÄHNE

Die Rekonstruktion von endodontisch behandelten Zähnen stellt eine Routinebehandlung in der zahnärztlichen Praxis dar. Die Anzahl der endodontischen Behandlungen hat über einen Zeitraum von 40 Jahren um etwa 54 % zugenommen (KZBV, 2008). Demzufolge stieg auch die Anzahl der postendodontischen Versorgungen massiv an. Im Vergleich zum Wiederaufbau vitaler Zähne konnte hierbei jedoch ein dreifach erhöhtes Misserfolgsrisiko gezeigt werden (Van Nieuwenhuysen *et al.*, 2003).

Die Prognose eines wurzelkanalbehandelten Zahnes hängt nicht nur von einer suffizient durchgeführten endodontischen Behandlung ab, sondern auch von der postendodontischen Versorgung. Eine sofortige und bakterien-dichte koronale Versiegelung des Kanalsystems sowie die Wiederherstellung der Kaufunktion sind entscheidende Faktoren für einen langfristigen Behandlungserfolg (Saunders und Saunders, 1994). Bei der Versorgung wurzelkanalbehandelter Zähne kommt der Frakturprophylaxe eine besondere Bedeutung zu, denn im Vergleich zu vitalen Zähnen frakturieren endodontisch behandelte Zähne deutlich häufiger (Adolphi *et al.*, 2007). Diese erhöhte Frakturanfälligkeit lässt sich jedoch auf der Grundlage der aktuellen Literatur nicht auf veränderte Dentineigenschaften nach dem Vitalitätsverlust zurückführen.

Bei einem Vergleich von endodontisch behandelten Prämolaren mit kontralateralen vitalen Prämolaren ergeben sich bei der Analyse der biomechanischen Eigenschaften der Zahnhartsubstanz mit Ausnahme der Mikrohärte keine signifikanten Unterschiede. Die Autoren schließen eine erhöhte Sprödigkeit endodontisch behandelter Zähne aus (Sedgley und Messer, 1992). Auch hinsichtlich des Feuchtigkeitsgehaltes zeigen sich keine Unterschiede zwischen vitalen und endodontisch behandelten Zähnen (Papa *et al.*, 1994). Vielmehr werden die Destabilisierung des Zahnes durch koronalen und radikulären Substanzverlust (Reeh *et al.*, 1989) sowie die höhere Belastung der Zähne durch den Verlust pulpaler Mechanorezeptoren (Randow und Glantz, 1986) als Ursachen für die erhöhte Frakturanfälligkeit diskutiert. Dennoch gibt es Hinweise auf Veränderungen der Kollagenstruktur im Wurzelkanal bei endodontisch behandelten Zähnen, in denen metallische Wurzelstifte mit Zink-Phosphat-Zement befestigt wurden (Ferrari *et al.*, 2004). Die beobachtete Degradation von Kollagenfibrillen des Dentins bei Zähnen, die über einen Zeitraum von sechs bis zwölf Jahren nach endodontischer Behandlung mit einem konventionell befestigten Wurzelstift versorgt waren, führen die Autoren auf eine durch Mikroorganismen oder Matrix-Metallo-Proteinase (MMPs) ausgelöste proteolytische Aktivität zurück. Darüber hinaus wird vermutet, dass eine Aktivierung der MMPs auch bei einer unvollständigen Infiltration demineralisierter Kollagenstrukturen des Dentins bei Anwendung der Adhäsivtechnik auftreten kann. Dies könnte zu einer Auflösung der Hybridschicht beitragen, die eine langfristige Schwächung des adhäsiven Verbundes zur Folge hätte. Über einen möglichen Einfluss der beobachteten Veränderungen der Kollagenstrukturen auf die Stabilität endodontisch behandelter Zähne kann zum jetzigen Zeitpunkt nur spekuliert werden.

2.2. DER EINSATZ VON WURZELKANALSTIFTEN

Lange Zeit galt in der Zahnmedizin das Dogma, dass endodontisch behandelte Zähne mit einem Wurzelkanalstift versorgt werden müssten, um damit die durch die Wurzelkanalbehandlung geschwächte

Wurzel zu stabilisieren. Eine Stabilisierung endodontisch behandelter Zähne wird jedoch durch Wurzelkanalstifte nicht erreicht (Sorensen und Engelman, 1990); die Stiftkanalpräparation führt vielmehr zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Formstabilität der Wurzel (Lang *et al.*, 2006). Somit dienen Wurzelkanalstifte lediglich der Retention der koronalen Restauration. Die intrakanaläre Verankerung ist notwendig, wenn bei der Versorgung von tief zerstörten endodontisch behandelten Zähnen die verbliebene koronale Zahnhartsubstanz keine suffiziente Retention für einen adhäsiven Aufbau bieten kann. Damit benötigt keinesfalls jeder endodontisch behandelte Zahn einen Wurzelkanalstift.

Die Frage, wann ein Wurzelkanalstift indiziert ist, wird mit verschiedenen Therapiekonzepten beantwortet (Edelhoff *et al.*, 2003; Schwartz und Robbins, 2004). Hierbei wird der Zahntyp sowie der koronale Zerstörungsgrad berücksichtigt, wobei die verbliebene koronale Zahnhartsubstanz durch geeignete Restaurationsmaßnahmen zu stabilisieren versucht wird. Die Beurteilung der Wertigkeit der verbliebenen Restzahnhartsubstanz bereitet klinisch jedoch häufig aufgrund der differierenden Defektlokalisationen und -ausdehnungen Schwierigkeiten. In den aktuellen Empfehlungen wird daher vielfach eine Unterteilung in geringen, mittleren und hohen Zerstörungsgrad vorgenommen. Dies lässt jedoch immer einen individuellen Interpretationsspielraum des Behandlers zu. Unabhängig vom Zahntyp wird für einen geringen und mittleren Zerstörungsgrad (mindestens zwei verbliebene Dentinwände von 2 mm Höhe oberhalb des Gingivalsaumes) empfohlen, auf den Einsatz von Wurzelkanalstiften zu verzichten (Edelhoff *et al.*, 2003). Darüber hinaus gelten die gleichen Restaurationsmöglichkeiten wie für vitale Zähne mit einem vergleichbaren Destruktionsgrad. In-vitro-Untersuchungen von oberen mittleren Schneidezähnen mit äquigingivalen Defekten zeigen eine erhöhte Frakturresistenz bei einem Einsatz von Wurzelstiften im Vergleich zur Restauration ohne Wurzelstift (Naumann *et al.*, 2007a; Rosentritt *et al.*, 2004). Bei der Restauration von unteren Molaren kann die Bruchlast jedoch nicht durch die Insertion von Wurzelstiften erhöht werden. Die Fakturrestistenz erscheint vielmehr von der verbliebenen Restzahnhartsubstanz abhängig (Salameh *et al.*, 2006). Dies deutet darauf hin, dass die Frakturresistenz auch vom jeweiligen Zahntyp beeinflusst wird und Seitenzähne vermutlich eine erhöhte Frakturresistenz aufweisen. Damit könnte hier eine Stiftinsertion eher verzichtbar sein (Kraestl *et al.*, 2008). Hierfür fehlt jedoch zum jetzigen Zeitpunkt die klinische Evidenz aufgrund der mangelnden Daten kontrollierter prospektiver Studien (Bolla *et al.*, 2007; Cagidiaco *et al.*, 2008b).

Bei der Restauration von oberen Prämolaren sollte das erhöhte Frakturrisiko aufgrund des ungünstigen Kronen-Wurzelverhältnisses mit berücksichtigt werden (Mondelli *et al.*, 1980; Schwartz und Robbins, 2004). Demzufolge wird empfohlen, für die Restauration von Frontzähnen und Prämolaren bei einem hohen koronalen Zahnhartsubstanzverlust (eine oder keine verbliebene Dentinwand oberhalb von 2 mm des Gingivalsaums) mit einer intrakanalären Verankerung für eine zusätzliche Retention des adhäsiven Aufbaus und der folgenden Überkronung zu sorgen (Kraestl *et al.*, 2008). Klinische Untersuchungen zeigten jedoch bei der Versorgung von Prämolaren mit metallkeramischen Verblendkronen bereits bei zwei oder weniger verbliebenen Wänden bei intrakanalärer Verankerung mit Quarzfaserstiften eine signifikant höhere Überlebensrate im Vergleich zur Versorgung ohne Wurzelstift (Ferrari *et al.*, 2007). Dies zeigt, dass in der derzeitigen Literatur Unklarheit besteht, ab welchem koronalen Zahnhartsubstanzverlust, eine Stiftinsertion empfohlen werden soll. Die intrakanaläre Verankerung kann sowohl mit konfektionierten als auch mit individuell gefertigten Wurzelkanalstiften erfolgen; vielfach kommen metallische, keramische oder faserverstärkte Wurzelstifte zur Anwendung.

2.2.1. FASERVERSTÄRKTE WURZELKANALSTIFTE

Retrospektive Studien zeigen unterschiedliche Formen klinischer Misserfolge, die bei der Versorgung von Zähnen mit einem metallischen Wurzelkanalstift auftreten können. Hierzu zählen unter anderem Wurzelfrakturen bei der Stiftzementierung und Retentionsverluste (Axelsson *et al.*, 1991) sowie Perforationen bei der Aufbereitung der Kanäle für die Wurzelstifte (Ottl und Lauer, 1998). Zusätzlich wurden bei der Versorgung mit metallischen Wurzelkanalstiften Wurzellängsfrakturen beobachtet, die eine Extraktion der betroffenen Zähne notwendig machten (Axelsson *et al.*, 2004). Diese Frakturen wurden extremen Unterschieden zwischen der Rigidität des Aufbaustiftes und des Dentins mit Stresskonzentration innerhalb der Wurzel zugeschrieben (Bolhuis *et al.*, 2004).

Aus dieser Problematik entwickelte sich die Forderung nach einem Wurzelkanalstiftsystem, welches in seinem Elastizitätsmodul in etwa dem des Dentins entspricht. So wurden karbon-, quarz- und glasfaserverstärkte Wurzelkanalstifte entwickelt, deren Elastizitätsmodul den Werten ähnlich ist, die für Dentin angegeben werden (14 - 18 GPa) (Asmussen *et al.*, 1999). Faserstifte allgemein sollen eine gewisse Biegung unter Belastung zulassen und somit eine verbesserte Spannungsverteilung zwischen Aufbaustift und Dentin ermöglichen (Bateman *et al.*, 2003). Das Risiko der Wurzelfraktur soll dadurch verringert werden, jedoch werden Spannungen im Bereich von Zement und Aufbaustift konzentriert, was zum Retentionsverlust des Stiftes führen kann (Bolhuis *et al.*, 2004). Dies unterstreicht den Einfluss des Verbundes zwischen Befestigungszement und Wurzelkanalentin sowie zwischen Befestigungszement und Stift bei der Insertion von Wurzelkanalstiften.

Klinische Studien sowie Laboruntersuchungen zeigen bei der Verwendung von faserverstärkten Stiften vorrangig Versagen in Form von restaurierbaren Retentionsverlusten (Ferrari *et al.*, 2007; Salameh *et al.*, 2007). Bei In-vitro-Untersuchungen der Frakturresistenz von Frontzähnen zeigen mit faserverstärkten Stiftsystemen und Titanstiften versorgte Zähne bei einer 2 mm breiten Fassreifen- oder Ferrule-Präparation (Präparation eines 1,5 - 2 mm breiten Dentinsaums apikal des Aufbaus) vergleichbare Werte (Naumann *et al.*, 2007a). Jedoch wird hier auch ein gehäuftes Auftreten von nicht restaurierbarem Versagen bei der Verwendung von faserverstärkten Stiften beobachtet. Die Autoren dieser Untersuchung weisen darauf hin, dass die Bruchlast eines restaurierten Zahnes vermutlich weniger vom Stiftmaterial, sondern vielmehr von der Menge an verbliebener Zahnhartsubstanz beeinflusst wird. Dies unterstreicht auch die Forderung nach der Präparation des sogenannten Ferrule-Effekts (Stankiewicz und Wilson, 2002). Diese präparative Maßnahme hat nach Eingliederung der Restauration einen stabilisierenden Effekt auf die verbliebene Zahnhartsubstanz im Wurzelbereich und wirkt einer Fraktur entgegen. Dennoch gibt es Hinweise in der Literatur, dass der Vorteil der reduzierten Stressinduktion bei Belastung faserverstärkter Wurzelkanalstifte mit einer verringerten Belastbarkeit gegenüber metallischen Stiftsystemen erreicht wird (Torbjörner und Fransson, 2004).

In einer prospektiven und kontrollierten klinischen Pilotstudie zeigt sich jedoch nach einer Beobachtungsdauer von einem Jahr kein Unterschied hinsichtlich der Überlebensrate von faserverstärkten Wurzelkanalstiften und Titanstiften (Naumann *et al.*, 2007b). Diese Tendenz wird auch nach einer Beobachtungsdauer von fünf Jahren bestätigt (Naumann, 2009).

2.2.2. ADHÄSIVE BEFESTIGUNG FASERVERSTÄRKTER WURZELKANALSTIFTE

Bei der Befestigung faserverstärkter Wurzelkanalstifte ist das Ziel, eine funktionelle Einheit zwischen Wurzelkanaldentin, Befestigungsmaterial und Wurzelstift zu erreichen (Abb. 1).

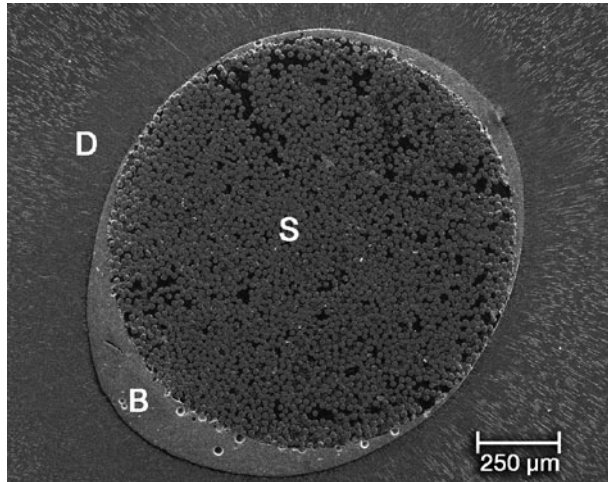


Abb. 1:

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines adhäsiv mit einem Befestigungskomposit (B) in den Wurzelkanal (D) eingesetzten Glasfaserstiftes (S). In diesem Fall wurde ein Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem verwendet (Excite DSC/Variolink II; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein).

Aufgrund des dentinähnlichen Elastizitätsmoduls dieser Stifte konzentrieren sich auftretende Kräfte auf den Verbund zwischen Befestigungsmaterial und Dentin sowie auf den Verbund zwischen Stiftoberfläche und Befestigungsmaterial (Pegoretti *et al.*, 2002). Faserverstärkte Wurzelkanalstifte werden zu meist adhäsiv im Wurzelkanal befestigt. Ein klinisch relevanter Vorteil der adhäsiven Befestigung von Wurzelkanalstiften ist die verringerte Insertionstiefe der Stifte, die durch die erhöhten Retentionswerte möglich wird (Schwartz und Robbins, 2004). Hier sollte jedoch mindestens die Hälfte der Wurzellänge erreicht werden. Demzufolge wird das Risiko von Perforationen bei der Stiftvorbohrung reduziert. Ferner wird den faserverstärkten Kunststoffstiften eine leichte Entfernbarkeit bei notwendigen Revisionen zugeschrieben. Aufgrund der parallel in die Kompositmatrix eingebetteten Fasern soll eine Führung der Bohrer eines speziellen Schleifsatzes gewährleistet und somit das Risiko der Perforation gemindert werden (de Rijk, 2000). Darüber hinaus wird für die adhäsive Befestigung eine verbesserte koronale Dichtigkeit (Bachicha *et al.*, 1998) im Vergleich zur konventionellen Zementierung beschrieben.

2.2.3. VERBUND ZUM WURZELKANALDENTIN

Das Wurzelkanaldentin weist im Vergleich zum koronalen Dentin einige strukturelle Besonderheiten auf. Die Zahl der Dentintubuli nimmt von koronal nach apikal im Wurzelkanal ab. Des Weiteren werden irreguläre Strukturen des Wurzelkanaldentins mit Auflagerungen aus Sekundärdentin und zementartigem Gewebe beschrieben (Mjör *et al.*, 2001). Eine kontrollierte Applikation des Adhäsivsystems sowie die Kontrolle der Feuchtigkeit im Kanal (Chersoni *et al.*, 2005) ist aufgrund der Wurzelkanalanatomie erschwert. Die Bedingungen zur Anwendung der Adhäsivtechnik im Wurzelkanal sind somit als ungünstig einzustufen. Neben dem hohen C-Faktor (Tay *et al.*, 2005) und der schlechten Einsicht können Überreste der Kanalaufbereitung und der Kanalkonditionierung (Serafino *et al.*, 2004) sowie Guttapercha- und Sealerreste (Perdigao *et al.*, 2007) im Kanallumen verbleiben und damit die Ausbildung einer Adhäsivschicht beeinträchtigen. Ob neuere Maßnahmen zur zusätzlichen Desinfektion des Wurzelkanals wie die Anwendung gasförmigen Ozons (Estrela *et al.*, 2007; Hems *et al.*, 2005; Noetzel *et al.*, 2009) oder des Erbium:Yttrium-Aluminium-Garnet-Lasers (Er:YAG) (Kimura *et al.*, 2000; Mehl *et al.*, 1999; Noetzel *et al.*, 2009) eine Auswirkung auf den adhäsiven Verbund bei der Befestigung von faserverstärk-

ten Wurzelkanalstiften haben, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht hinreichend geklärt. Einige Autoren bezweifeln eine suffiziente adhäsive Haftung im Kanal und schreiben mit dem Ausstoßverfahren nachgewiesene Haftkräfte vorrangig der Friktion zu (Cury *et al.*, 2006; Goracci *et al.*, 2005a; Sadek *et al.*, 2006). So erreichen die Haftwerte zum Wurzelkanalentin auch nicht die Werte, die am Kronendentin erzielt werden (Goracci *et al.*, 2004). Dennoch zeigen sich im Vergleich zur konventionellen Befestigung erhöhte Retentionswerte bei der adhäsiven Befestigung von Wurzelstiften (Cohen *et al.*, 1998; O'Keefe *et al.*, 2000). Auch die Analyse des Verbundes im Rasterelektronenmikroskop (REM) kann bei Verwendung von Adhäsivsystemen mit vorheriger Phosphorsäurekonditionierung sowohl die Ausbildung einer Hybridschicht als auch die von Kunststofftags nachweisen (Ferrari *et al.*, 2001) (Abb. 2).

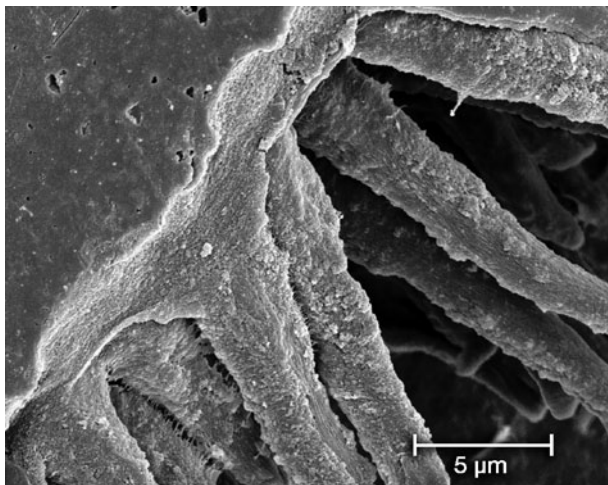


Abb. 2:
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Verbundschicht eines Etch-and-Rinse-Systems zum Wurzelkanalentin (Excite DSC/ Variolink II; Ivoclar Vivadent). Nach Entfernung der Zahnhartsubstanz wird die Verbundschicht mit zahlreichen Kunststofftags sowie einer ausgeprägten Hybridschicht deutlich.

Die Visualisierung des adhäsiven Verbundes mit dem REM ist ein weitverbreitetes Verfahren und gilt als Goldstandard bei der Darstellung der Verbundschicht verschiedener Adhäsivsysteme zum Dentin (Van Meerbeek *et al.*, 2000). Die Interpretation von REM-Bildern im Hinblick auf die Hybridisierung des Dentins kann jedoch mit Schwierigkeiten verbunden sein, da einzelne Komponenten adhäsiver Befestigungssysteme durch die ähnliche Zusammensetzung nicht immer unterschieden werden können (Van Meerbeek *et al.*, 2000). Weiterhin müssen für die Analyse der Verbundschicht mit dem Hochdruckvakuum das darunterliegende Dentin teilweise oder vollständig mit hochkonzentrierten Säuren aufgelöst und deproteinisiert sowie die Proben getrocknet werden. So kann es zu einer Schädigung der mikromorphologischen Verbundschicht und zu Veränderungen der Hybridschichtformation kommen (Arrais *et al.*, 2009). Infolgedessen kann die Information über die Infiltration der Adhäsivsysteme in das Dentin ungenügend oder verfälscht sein (Van Meerbeek *et al.*, 2000). Die Anwendung des Niedrigvakuums ermöglicht eine REM-Analyse ohne großen präparatorischen Aufwand (Pearce und Nelson, 1989; Tjaderhane *et al.*, 1995); dennoch können auch hier Schrumpfungartefakte nicht vollständig ausgeschlossen werden. Zudem ist die Auflösung limitiert. Auch entfällt eine räumliche Darstellung der Verbundschicht, da das Dentin nicht aufgelöst wird und nur eine Betrachtung der Oberfläche möglich ist.

Die Vorteile der Darstellung des adhäsiven Verbundes mit dem konfokalen Laser-Rastermikroskop (CLSM) sind die nondestruktive Analyse der Proben in einer feuchten Umgebung, bei der Trocknungsartefakte weitestgehend vermieden werden (Watson, 1991). Im Dualfluoreszenzmodus können bei Verwendung unterschiedlicher fluoreszierender Farbstoffe Aussagen über die Verteilung von Primer und Adhäsiv in der Verbundschicht getroffen werden (Griffiths und Watson, 1995; Watson, 1991). Die Anwendung des Dualfluoreszenzmodus zur Darstellung des adhäsiven Verbundes im

Wurzelkanal wurde bislang noch nicht beschrieben, könnte jedoch zusätzliche Informationen über die Verteilung von Befestigungskomposit und Adhäsivsystem im Kanal liefern und damit die Visualisierung des Verbundes mit allen beteiligten Komponenten ermöglichen. So wird in einer kürzlich erschienenen Publikation herausgestellt, dass mit dem CLSM im Dualfluoreszenzmodus detaillierte Informationen über die Verteilung der Komponenten Adhäsivsystem und Befestigungskomposit an der Grenze zwischen Befestigungskomposit und Adhäsivschicht sowie in der Hybridschicht gewonnen werden können (Arrais *et al.*, 2009). Bislang gibt es jedoch kaum Untersuchungen, die einen Vergleich der beiden Visualisierungsmethoden mit dem REM und dem CLSM an identischen Proben vorgenommen haben, um die beschriebenen Methoden zu vergleichen (D'Souza *et al.*, 1999).

Zur adhäsiven Befestigung faserverstärkter Stiftsysteme stehen sowohl selbst- als auch phosphorsäurekonditionierende Systeme zur Verfügung. Die selbstkonditionierenden Systeme lassen sich weiter in selbstadhäsive Befestigungszemente und Befestigungskomposite, bei denen zuvor ein selbstkonditionierender Primer angewendet wird, unterteilen.

In-vitro-Untersuchungen zeigen zum Teil kontroverse Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses von Befestigungsmaterial und der Lokalisation im Wurzelkanal auf die Haftung von faserverstärkten Wurzelkanalstiften (Monticelli *et al.*, 2008a). Eine ausreichende Durchdringung des Smear Layers im Wurzelkanal, der nach der Aufbereitung bis zu 40 µm tief in die Dentintubuli hineingepresst werden kann (McComb und Smith, 1975), von vereinfachten Befestigungssystemen wird in Frage gestellt und signifikant höhere Haftwerte für Systeme mit vorheriger Phosphorsäurekonditionierung (Excite DSC/Variolink II; Ivolar Vivadent) des Kanals nachgewiesen (Goracci *et al.*, 2005c). Im Gegensatz dazu zeigen andere Untersuchungen signifikant höhere Haftkräfte für selbstkonditionierende Primer (Zicari *et al.*, 2008) oder das selbstadhäsive Befestigungskomposit RelyX Unicem (Bitter *et al.*, 2006a) im Vergleich zu Systemen mit vorheriger Phosphorsäurekonditionierung. Neben der Zusammensetzung der Adhäsivsysteme wie dem Zusatz des funktionellen Phosphatmonomers 10-Methacryloyloxydecyl-Dihydrogenphosphat (10-MDP) (Zicari *et al.*, 2008) beeinflusst auch die Hydrophilie vereinfachter Adhäsivsysteme und die daraus resultierende intrinsische Permeabilität (Chersoni *et al.*, 2004) die Haftwerte der einzelnen Befestigungssysteme. So wurde bei der Anwendung von 1-Flaschen-Adhäsivsystemen nach Phosphorsäurekonditionierung im Wurzelkanal ein vermehrter Flüssigkeitsaustritt nach Applikation von hydrophilen Adhäsivsystemen nachgewiesen (Chersoni *et al.*, 2005), was den Verbund zum Wurzelkanaldentin beeinträchtigen kann.

Darüber hinaus müssen die Applikationsweise der Befestigungsmaterialien (Watzke *et al.*, 2008), die Testmethode (Goracci *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2008) sowie die Lichtleitung der verwendeten Faserstifte und Lichtpolymerisation (Goracci *et al.*, 2008) bei der Beurteilung der kontroversen Ergebnisse der publizierten In-vitro-Studien berücksichtigt werden.

2.2.4. VERBUND ZUR STIFTOBERFLÄCHE

Obwohl der Schwachpunkt bei der adhäsiven Befestigung von faserverstärkten Stiften im Wurzelkanal eher bei dem Verbund zum Wurzelkanaldentin zu vermuten ist (Zicari *et al.*, 2008), zeigen einige In-vitro-Untersuchungen auch vermehrt Versagen zwischen Stiftoberfläche und Befestigungsmaterial (Drummond, 2000; Perdigao *et al.*, 2006). Somit kommt auch diesem Verbund eine besondere Bedeutung zu, da unmittelbar nach der Stiftbefestigung und der Herstellung des plastischen Aufbaus eine starke Belastung der Restauration durch die Präparation zur Aufnahme der späteren Restauration

bzw. des Provisoriums verursacht wird. Unterschiedliche Vorbehandlungen - wie die Benetzung der Stiftoberfläche mit einem Silan und mechanische oder chemische Behandlungen zur Erhöhung der Mikrorauigkeit der Stiftoberfläche - werden vorgeschlagen mit dem Ziel, die Haftwerte zwischen Stift und Befestigungsmaterial zu steigern (Goracci *et al.*, 2005b; Monticelli *et al.*, 2006; Monticelli *et al.*, 2008b; Sahafi *et al.*, 2003). Während des Herstellungsprozesses glas- oder quarzfaserverstärkter Wurzelkanalstifte werden die Fasern industriell vorbehandelt und silanisiert, um einen optimierten Verbund zu der umgebenden Kunststoffmatrix zu erhalten, der so vor Degradationserscheinungen bspw. durch Feuchtigkeit Zutritt geschützt werden soll (Matinlinna *et al.*, 2004).

Auf dem Dentalmarkt erhältliche konfektionierte quarz- und glasfaserverstärkte Kompositwurzelkanalstifte zeichnen sich durch eine hoch vernetzte Polymermatrix zwischen den eingebetteten Fasern aus, die aufgrund der hohen Konversionsrate kaum offene Doppelbindungen zur weiteren Vernetzung mit anderen Polymeren aufweisen (Mannocci *et al.*, 2005). Hierdurch kann der chemische Verbund zu dem verwendeten Befestigungskomposit erschwert sein.

Die Vorbehandlung der Stiftoberfläche mit einem Silan für einen optimierten Verbund zwischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit wird in verschiedenen In-vitro-Studien untersucht und kontrovers beurteilt. Auf der einen Seite werden Haftwertsteigerungen nach der Silanapplikation (Monobond S; Ivoclar Vivadent) zwischen lichthärtenden fließfähigen Kompositmaterialien und glasfaserverstärkten (FRC Postec; Ivoclar Vivadent) sowie quarzfaserverstärkten Wurzelkanalstiften (DT Light Post, RTD; St Egève, Frankreich) festgestellt (Goracci *et al.*, 2005b). Diese Ergebnisse werden auch für den Verbund zwischen glas- (Snowpost; Carbotech, Ganges, Frankreich) und quarzfaserverstärkten Wurzelkanalstiften (Aestheti-Plus; Bisco, Illinois; USA) und einem dualhärtenden Kompositaufbaumaterial (Clearfil DC Core, Kuraray) nach Silanapplikation (Clearfil Porcelain Bond Activator & Clearfil Photobond; Kuraray) bestätigt (Aksornmuang *et al.*, 2004). Im Gegensatz dazu finden andere Arbeitsgruppen keine Erhöhung der Stiftretention zum Befestigungskomposit oder Aufbaumaterial nach der Anwendung eines Silans (Bitter *et al.*, 2006b; Perdigao *et al.*, 2006; Wrbas *et al.*, 2007a; Wrbas *et al.*, 2007b).

Ein chemischer Verbund durch die Applikation eines Methacryloxypropyltrimethoxysilans (MPS) kann nur zwischen exponierten Fasern oder Füllkörpern an der Stiftoberfläche und dem Befestigungskomposit erreicht werden (Matinlinna *et al.*, 2004). Somit hängt der Effekt der Silanapplikation wesentlich von der Textur und der Zusammensetzung der einzelnen Stifttypen ab. Außerdem können die beschriebenen kontroversen Ergebnisse möglicherweise durch die verschiedenen untersuchten Befestigungs- und Aufbaumaterialien und die Zusammensetzung sowie Techniksensitivität des applizierten Silans zustande kommen, dessen Effektivität durch den pH-Wert, die Menge des Lösungsmittels, die Molekülgröße sowie die Applikationstechnik wesentlich beeinflusst werden kann (de la Fuente und Madruga, 1999).

Mit dem Ziel, den Verbund zwischen Stiftoberfläche und Befestigungsmaterial zu optimieren, wurden individuell formbare faserverstärkte Wurzelstifte aus einem zu interpenetrierenden Polymernetzwerk entwickelt (IPN Ever Stick Post; Stick Tech, Turku, Finnland). Sie weisen an ihrer äußeren Oberfläche eine anlösbare polymethylmethacrylat-angereicherte Schicht auf, die eine Diffusion von Monomeren in die Matrix des Stiftes ermöglichen soll. Erste In-vitro-Studien zeigten verbesserte Haftwerte dieser Stifte im Vergleich zu anderen faserverstärkten Stiftsystemen (Bell *et al.*, 2004).

2.3. KLINISCHE EVALUATION FASERVERSTÄRKTER WURZELKANALSTIFTE

Klinische Studien über die Versorgung endodontisch behandelter Zähne mit faserverstärkten Wurzelkanalstiften zeigen Versagensraten von 7,7 % nach 28 Monaten (Glazer, 2000), 1,7 % nach 30 Monaten (Malferrari *et al.*, 2003), über 5 % nach vier Jahren (Ferrari *et al.*, 2000a) bis zu 33 % nach einem Untersuchungszeitraum von acht Jahren (Naumann *et al.*, 2008a). Die kontroversen Ergebnisse dieser Studien werden den Unterschieden im Studiendesign, den Ein- und Ausschlusskriterien für die jeweiligen Probanden sowie den differierenden Untersuchungszeiträumen zugeschrieben (Ferrari *et al.*, 2007). Die Stabilität postendodontischer Versorgungen hängt von der Anzahl der benachbarten Zähne (Caplan *et al.*, 2002), dem Zahntyp, der Position und Funktion im Zahnbogen und vom Zahnhartsubstanzverlust des endodontisch behandelten Zahnes ab (Naumann *et al.*, 2005a; Naumann *et al.*, 2005b; Naumann *et al.*, 2008a; Sorensen und Martinoff, 1984). Zusätzlich kann die Überlebensrate endodontisch behandelter Zähne auch von der koronalen Restauraionsform beeinflusst werden (Aquilino und Caplan, 2002).

Der Einfluss des Stiftsystems auf den Therapieerfolg postendodontischer Versorgungen wurde bislang nur in wenigen Studien analysiert (Ferrari *et al.*, 2000a; Naumann *et al.*, 2007b; Schmitter *et al.*, 2007) und dabei kontrovers beurteilt. Bisher wurde nur eine kontrollierte prospektive randomisierte Studie mit einer Nachbeobachtungsdauer von zwei und drei Jahren publiziert, die sowohl den Faktor Stiftinsertion als auch den Faktor Zahnhartsubstanzverlust analysiert hat (Cagidiaco *et al.*, 2008a; Ferrari *et al.*, 2007). In dieser prospektiven Untersuchung wurden nur Prämolaren untersucht, die anhand ihres koronalen Zahnhartsubstanzverlustes in sechs experimentelle Gruppen eingeteilt wurden. In jeder dieser Gruppen wurden 20 Zähne mit und 20 Zähne ohne quarzfaserverstärktem Wurzelkanalstift aufgebaut und mit einer Verblend-Metallkeramikkrone versorgt. Nach drei Jahren zeigte sich für Zähne, die ohne Wurzelstift restauriert wurden, eine deutlich erhöhte Versagensrate von 37 % im Vergleich zu Zähnen mit Stiftinsertion, die eine Versagensrate von nur 9 % aufwiesen.

Insgesamt betrachtet lässt die klinische Datenlage zum jetzigen Zeitpunkt nur bedingt Rückschlüsse darüber zu, ab welchem Zerstörungsgrad eines wurzelkanalbehandelten Zahnes die Insertion eines faserverstärkten Wurzelstiftes notwendig wird bzw. wann darauf verzichtet werden kann.

3. FRAGESTELLUNGEN DER VORGESTELLTEN ARBEITEN

Bei der Rekonstruktion endodontisch behandelter Zähne mit adhäsiv verankerten faserverstärkten Wurzelstiften sollten sowohl der Verbund zwischen Wurzelkanalentin und Befestigungsmaterial als auch der Verbund zwischen Befestigungs- bzw. Aufbaumaterial und Stiftoberfläche berücksichtigt werden, um die angestrebte funktionelle Einheit zwischen allen beteiligten Komponenten zu erreichen. In der ersten Originalarbeit der vorliegenden Habilitationsschrift wurde der Verbund von drei verschiedenen, auf dem Markt erhältlichen faserverstärkten Wurzelkanalstiften mit und ohne Silanapplikation zu zwei Aufbaukompositmaterialien vor und nach thermozyklischer Wechsellast untersucht. Ziel dieser Arbeit war, den Einfluss der Silanapplikation, des Stifttyps, der künstlichen Alterung sowie des Befestigungsmaterials auf die Haftung zu analysieren.

Neben dem hohen C-Faktor im Wurzelkanal (Tay *et al.*, 2005) und der schlechten Einsicht können Überreste der Kanalaufbereitung und der Kanalkonditionierung (Serafino *et al.*, 2004) sowie Gutta-percha- und Sealerreste (Perdigao *et al.*, 2007) im Kanallumen verbleiben und damit die Ausbildung einer Adhäsivschicht beeinträchtigen. In der zweiten Originalarbeit sollte daher der Einfluss neuerer Maßnahmen zur zusätzlichen Desinfektion des Wurzelkanals wie die Anwendung gasförmigen Ozons (Estrela *et al.*, 2007; Hems *et al.*, 2005; Noetzel *et al.*, 2009) und des Erbium:Yttrium-Aluminium-Garnet-Lasers (Kimura *et al.*, 2000; Mehl *et al.*, 1999; Noetzel *et al.*, 2009) auf den adhäsiven Verbund im Wurzelkanal untersucht werden. Die Fragestellung dieser Arbeit war, ob die Vorbehandlung des Wurzelkanalentin einen Effekt auf die Haftung faserverstärkter Wurzelkanalstifte hat, die mit vier Befestigungsmaterialien eingesetzt wurden.

Die Visualisierung des adhäsiven Verbundes im Wurzelkanal mit allen beteiligten Komponenten im Dualfluoreszenzmodus mit dem CLSM war Gegenstand der dritten und vierten Originalarbeit. Im ersten Teil wurde ein Vergleich der Visualisierungsmethoden mit dem REM und dem CLSM an identischen Proben vorgenommen, um die beschriebene CLSM-Methode mit dem Goldstandard REM zu vergleichen und zu validieren. Des Weiteren sollte das Risiko von möglichen Fehlinterpretationen beider Methoden bei der Beurteilung der Verbundschicht evaluiert werden. Im zweiten Teil erfolgte eine Analyse des morphologischen Charakters der Verbundschicht verschiedener Befestigungsmaterialien zum Wurzelkanalentin mit dem CLSM im Dualfluoreszenzmodus im Hinblick auf eine mögliche Durchmischung der Komponenten. Die zusätzliche Bestimmung der Haftwerte sollte Aufschluss über mögliche Schwachstellen des Verbundes zum Wurzelkanalentin der einzelnen Befestigungssysteme geben.

Die fünfte Originalarbeit widmete sich einer klinischen Fragestellung und wendete zuvor *in vitro* getestete Materialkombinationen *in vivo* an. In dieser prospektiven, randomisierten klinischen Studie sollte der Einfluss der verbliebenen Restzahnhartsubstanz und der Einfluss der Stiftinsertion auf die Versagensrate postendodontischer Restaurationen analysiert werden.

4. VORSTELLUNG DER ORIGINALARBEITEN

K. Bitter, K. Neumann, A. M. Kielbassa. Effect of pretreatment and thermocycling on bond strengths of resin core materials to various fiber reinforced composite posts. *Journal of Adhesive Dentistry* 2008, 10:481-489.

K. Bitter, J. Noetzel, C. Volk, K. Neumann, A. M. Kielbassa. Bond strength of fiber posts after the application of Erbium:Yttrium-Aluminum-Garnet laser treatment and gaseous ozone to the root canal. *Journal of Endodontics* 2008;34:306-9.

K. Bitter, S. Paris, J. Mueller, K. Neumann, A. M. Kielbassa. Correlation of scanning electron and confocal laser scanning microscopic analyses for visualization of dentin/adhesive interfaces in the root canal. *Journal of Adhesive Dentistry* 2009, 11:7-14.

K. Bitter, S. Paris, C. Pfuertner, K. Neumann, A. M. Kielbassa. Morphological and bond strength evaluation of different resin cements to root dentin. *European Journal of Oral Science* 2009, 117:326-333.

K. Bitter, J. Noetzel, O. Stamm, J. Vaudt, H. Meyer-Lueckel, K. Neumann, A. M. Kielbassa. Randomized clinical trial comparing the effects of post placement on the failure rate of postendodontic restorations – preliminary results of a mean period of 32 months. *Journal of Endodontics* 2009, 35(11):1477-82

5. DISKUSSION

5.1. EINFLUSS VON VORBEHANDLUNG UND THERMOZYKLISCHER WECHSELBELASTUNG AUF DIE HAFTUNG VON AUFBAUKOMPOSITMATERIALIEN ZU VERSCHIEDENEN FASERVERSTÄRKTEN WURZELKANALSTIFTEN

Aufgrund der unmittelbaren Belastung nach der Stiftinsertion und Herstellung des plastischen Aufbaus durch die Präparation für die definitive koronale Restauration bzw. das Provisorium ist der Verbund zwischen Aufbaumaterial und faserverstärktem Wurzelkanalstift von Bedeutung für die Stabilität der postendodontischen Versorgung. In der vorliegenden Arbeit zeigten die Vorbehandlung der Stiftoberfläche mit einem Silan, der Stifttyp und die thermozyklische Wechsellast signifikante Effekte auf die Haftung zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften und Aufbauposit.

Mit der Silanapplikation soll die Benetzbarkeit der Oberfläche erhöht und ein chemischer Verbund zwischen den anorganischen Bestandteilen des Faserstiftes (Fasern und Füllkörpern) und den organischen Bestandteilen der Polymermatrix des Komposits erreicht werden (Matinlinna *et al.*, 2004). Organosilane weisen die Formel $R^3\text{-Si}(\text{OR})_3$ auf, wobei R^3 der funktionellen organischen Gruppe entspricht und R den drei Alkoxygruppen. Die chemische Reaktion beginnt mit einer Hydrolyse der Alkoxygruppen (R) in Silanole (SiOH), die unter Wasserabspaltung Siloxanverbindungen eingehen (Monticelli *et al.*, 2008b). Um diesen Effekt mit einem Methacryloxypropyltrimethoxysilan (MPS) erreichen zu können, müssen Fasern oder Füllkörper der Polymermatrix des Faserstiftes auf der Oberfläche des Stiftes erreichbar sein. In der vorliegenden Untersuchung wurden neben den Haftwertmessungen zusätzlich REM-Aufnahmen der Oberfläche der drei untersuchten Stifttypen vorgenommen. Die beiden konfektionierten faserverstärkten Wurzelkanalstifte zeigten sowohl freiliegende Fasern als auch Füllkörper an ihrer Oberfläche, wohingegen der individuell formbare IPN-Stift erwartungsgemäß eine dünne Kunststoffschicht an seiner Oberfläche aufwies. Die Applikation des Silans führte zu einer signifikanten Haftwertsteigerung, die im Mittel jedoch nur 2 MPa betrug. Folglich erscheint die klinische Relevanz dieser Haftwerterhöhung fraglich. Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit der beiden untersuchten konfektionierten Faserstifte konnten nicht festgestellt werden. Es zeigten sich auch keine signifikanten Interaktionen zwischen den Faktoren Vorbehandlung und Stifttyp.

Um den Verbund zwischen Stiftoberfläche und Komposit zu optimieren, wurden weitere Vorbehandlungen vorgeschlagen, die eine Erhöhung der Mikrorauigkeit der Stiftoberfläche durch Sandstrahlen oder Ätzen anstreben oder eine Kombination aus Sandstrahlen und chemischem Verbund zur Stiftoberfläche (Co-Jet System, 3M Espe) beinhalten (Sahafi *et al.*, 2003; Sahafi *et al.*, 2004a; Valandro *et al.*, 2006; Vano *et al.*, 2006). Das Aufrauen der Oberfläche mit Flusssäure führte in Abhängigkeit von Applikationsdauer und Fasertyp zum Teil zu starken Beschädigungen der Stiftoberfläche, die die Stabilität des Stiftes und damit auch die Stabilität der postendodontischen Versorgung beeinträchtigen können (Valandro *et al.*, 2006). Sandstrahlen mit 50 μm Aluminiumoxid- oder Siliziumdioxid-Partikeln (Co-Jet) der Stiftoberfläche führte zu einer vielversprechenden Steigerung der Haftwerte (Asmussen *et al.*, 2005; Sahafi *et al.*, 2004b). Dennoch wiesen diese Vorbehandlungen ebenfalls den Nachteil auf, dass sowohl die Matrix als auch die Fasern des Stiftes angegriffen werden und die Integrität des Stiftes so beeinträchtigt werden kann (Bitter *et al.*, 2006b; Monticelli *et al.*, 2008b). Hieraus entwickelte sich die Forderung nach einer selektiven Vorbehandlung der Stiftoberfläche, die eine Anlösung der Kunststoffmatrix erreichen, aber die Integrität der Fasern nicht beeinflussen sollte (Monticelli *et al.*, 2008b). So wurden bspw. mit der Applikation von H_2O_2 auf die Stiftoberfläche und

anschließender Silanisierung signifikante Haftwertsteigerungen im Vergleich zu Stiften ohne Vorbehandlung erzielt (Monticelli *et al.*, 2006; Vano *et al.*, 2006). Dennoch ist die Praktikabilität dieser Vorbehandlungsmethoden für den praktisch tätigen Zahnarzt sowie die klinische Relevanz der erhöhten Haftwerte zum jetzigen Zeitpunkt fraglich. Die Verwendung von industriell vorbehandelten Faserstiften für einen optimierten Verbund zwischen Stiftoberfläche und Befestigungsmaterial erscheint sinnvoller (Edelhoff *et al.*, 2006; Radovic *et al.*, 2008). Einige Hersteller bieten bereits vorbehandelte Faserstifte an, die eine Silikat- und Silanbeschichtung aufweisen (DT Light Post SL, VDW, München; ER Dentin Post Coated, Komet, Lemgo). Die industriell optimierte Oberfläche soll bei Einprobe des Stiftes durch eine dünne, transparente und schmutzabweisende Schutzschicht aus vorwiegend Methylmethacrylat geschont werden (Edelhoff *et al.*, 2006).

Bei der Verwendung des individuell formbaren faserverstärkten Wurzelstiftes aus einem zu interpenetrierenden Polymernetzwerk (IPN Ever Stick Post; Stick Tech) wurden signifikant höhere Haftwerte gezeigt als zu den untersuchten konfektionierten Glas- und Quarzfaserstiften. Diese Ergebnisse wurden in weiteren In-vitro-Studien bestätigt (Bell *et al.*, 2004; Bell *et al.*, 2005; Bitter *et al.*, 2007). Eine kürzlich publizierte prospektive klinische Studie zeigte jedoch für den IPN Post Ever Stick eine niedrigere Erfolgsrate im Vergleich zu dem quarzfaserverstärkten Wurzelstiftsystem DT Light Post (Cagidiaco *et al.*, 2008a). Bisher liegen keine In-vitro-Studien vor, die einen direkten Vergleich der Biegefestigkeit dieser beiden Stiftypen vorgenommen haben. Ergebnisse eines 3-Punkt-Biegeversuchs konnten für den DT Light Post (getesteter Durchmesser: 1,225 mm) 90 N (Seefeld *et al.*, 2007) und in einer anderen Untersuchung für den IPN Post (Durchmesser 1,55 mm) 155 N nachweisen (Lassila *et al.*, 2004). Für die klinische Überlegenheit des DT Light Post vermuten die Autoren verbesserte mechanische Eigenschaften durch den Fertigungsprozess dieses Stiftyps (Cagidiaco *et al.*, 2008a). Die Fasern werden auf Zug belastet in die Matrix eingebracht und erst bei der endgültigen Polymerisation entlastet, sodass die Oberfläche der Kunststoffmatrix unter Druck belassen wird und zu einer erhöhten Absorption der auftretenden Zugkräfte durch den Stift beitragen soll. Ob es trotz des nachgewiesenen verbesserten Verbundes zwischen den IPN Stiften und dem Aufbaumaterial im Vergleich zu anderen Stiftsystemen aufgrund der vermuteten geringeren Biegefestigkeit klinisch zu einer schlechteren Überlebensrate kommt, sollte in weiteren Untersuchungen analysiert werden.

In der vorliegenden Studie könnte die beobachtete signifikante Reduktion der Haftkraft nach der künstlichen Alterung durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der untersuchten Materialien verursacht worden sein. So zeigte eine Studie große Unterschiede zwischen den Ausdehnungskoeffizienten der Fasern und der Polymermatrix bei verschiedenen untersuchten Faserstiften (Lassila *et al.*, 2004). Des Weiteren kann es durch Wasseraufnahme und Quellung der Polymere zu einer Beeinflussung der Materialeigenschaften und damit verbunden zu einer Reduktion der Haftwerte kommen (Lassila *et al.*, 2002; Vallittu, 2000). Die Wasserexposition kann ferner zu einer partiellen Hydrolyse des Silans führen, die eine Schwächung des Verbundes zwischen silanisierten Stiften und Komposit sowie eine Schwächung des Stiftes selbst zur Folge haben kann (Meyer *et al.*, 1994). Daraus ergibt sich für das klinische Vorgehen die Empfehlung, dass der Stift auch nach der Präparation von Aufbaumaterial bedeckt sein sollte, um eine Beeinträchtigung der Biegefestigkeit des Stiftes zu vermeiden.

Die Haftung der Stifte zu den Aufbaumaterialien wurde in der vorliegenden Arbeit mit Ausstoßversuchen, den sogenannten Push-out-Tests vorgenommen. Im Vergleich zu Mikrozugfestigkeitsversuchen zur Haftwertmessung wurde für den Push-out-Test am Wurzelkanalentin eine homogene

Verteilung der gemessenen Werte gezeigt sowie keine Versagen bei der Probenherstellung (Goracci *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2008). Auch mit einer Finite-Elemente-Analyse konnte für den Push-out-Test eine homogenere Stressverteilung im Vergleich zum Mikrozugfestigkeitstest mit der Uhrglas- oder der Stickform gezeigt werden (Soares *et al.*, 2008). Der Push-out-Test kann infolgedessen als geeignete Methode bezeichnet werden, um die Retention von faserverstärkten Wurzelkanalstiften *in vitro* zu bestimmen.

5.2. HAFTUNG VON FASERSTIFTEN NACH DER APPLIKATION DES ERBIUM:YTTRIUM-ALUMINIUM-GARNET-LASERS UND GASFÖRMIGEN OZONS IM WURZELKANAL

Das Ziel einer Wurzelkanalaufbereitung ist die Elimination der Mikroorganismen im Wurzelkanal vor der Wurzelkanalfüllung (Law und Messer, 2004). Der chemo-mechanischen Aufbereitung des Wurzelkanals sind jedoch häufig Grenzen gesetzt, da Mikroorganismen in Dentintubuli, Ramifikationen, Isthmen sowie Irregularitäten des Wurzelkanals trotz Aufbereitung überleben können (Peters *et al.*, 2001). Intrakanaläre medikamentöse Einlagen mit antibakteriellen Eigenschaften sollen die Desinfektion des Wurzelkanals optimieren. Hier gilt Kalziumhydroxid als effektive intrakanaläre Einlage (Law und Messer, 2004). Die Anwendung von gasförmigem Ozon (Estrela *et al.*, 2007; Hems *et al.*, 2005; Noetzel *et al.*, 2009) sowie des Er:YAG-Lasers (Kimura *et al.*, 2000; Mehl *et al.*, 1999) wurde vorgeschlagen, um den Reinigungseffekt einer Wurzelkanalbehandlung, die in einer Sitzung durchgeführt werden soll, zu erhöhen. Bei Zähnen mit einem hohen koronalen Zerstörungsgrad kann in diesen Fällen die anschließende Insertion eines faserverstärkten Wurzelstiftes notwendig werden. Mögliche Effekte der genannten Reinigungsmethoden auf den Verbund zwischen Befestigungsmaterial und Wurzelkanaldentin sollten in der vorliegenden Untersuchung analysiert werden. In dieser Studie wurde die Haftung faserverstärkter Wurzelkanalstifte im Kanal von der Art des verwendeten Befestigungsmaterials, nicht jedoch von der Vorbehandlung (Applikation gasförmigen Ozons, Er:YAG-Laser-Anwendung, Kontrolle: Spülung mit Chlorhexidindiglyconat 0,2 %) beeinflusst. Es zeigten sich jedoch signifikante Interaktionen zwischen den Faktoren Vorbehandlung und Befestigungsmaterial.

Die Applikation des Er:YAG-Lasers führt durch eine thermo-mechanische Ablation zu einem Verdampfen des Wassers im Gewebe und damit zu einer Expansion und zu Mikroexplosionen, die sowohl organische als auch inorganische Gewebestandteile entfernen (Gurgan *et al.*, 2009). Für die antimikrobielle Wirkung der Laseranwendung im Wurzelkanal werden sowohl eine thermische Zerstörung von Mikroorganismen sowie photodynamische und photodisruptive Effekte diskutiert (Mehl *et al.*, 1999; Stabholz *et al.*, 1993). Eine Analyse der Dentinoberfläche nach Er:YAG-Laserapplikation zur Kavitätenpräparation zeigte im REM die vollständige Entfernung der Schmierschicht mit geöffneten Dentintubuli sowie eine irreguläre Oberfläche (Curti *et al.*, 2004). Eine frühere Studie sah in dieser veränderten Dentinstruktur die Gründe für erhöhte Haftwerte von Kompositen nach der Laserapplikation (Visuri *et al.*, 1996). Neuere Untersuchungen wiesen nach der Er:YAG-Laserapplikation eine bis zu 3 - 4 µm tiefe veränderte Dentinoberfläche nach, die durch Denaturierung veränderte Kollagenfibrillen ohne Vernetzung sowie interfibrilläre Räume zeigte (Ceballo *et al.*, 2002). Ebenso wurden Mikrorisse kurz unterhalb der Hybridschicht bei der Analyse des Verbundes nach der Er:YAG-Laserapplikation beschrieben (De Munck *et al.*, 2002).

In der vorliegenden Untersuchung konnte für das Etch-and-Rinse-System Excite DSC/Variolink II durch die Laserapplikation eine signifikante Erhöhung der Haftwerte nachgewiesen werden. Dies steht im Gegensatz zu bereits publizierten Daten (Ceballo *et al.*, 2002; De Munck *et al.*, 2002), die redu-

zierte Haftwerte nach der Laserapplikation im Vergleich zu einer mit dem Diamantschleifer bearbeiteten koronalen Dentinoberfläche nachwies. Die Applikation des Er:YAG-Lasers im Wurzelkanal zeigte in der vorliegenden Studie ebenfalls geöffnete Dentintubuli sowie eine leicht irreguläre Oberfläche mit dem REM. Eine tiefere Wirkung des Lasers auf das Gewebe konnte mit der verwendeten Methode nicht dargestellt werden. Die Laserapplikation im Kanal könnte andere Auswirkungen auf das Wurzelkanalentin haben als die Anwendung des Lasers am koronalen Dentin. Auch zeigte eine REM-Analyse des Verbundes eines Etch-and-Rinse-Systems nach der Behandlung des Dentins mit dem Er:YAG-Laser eine vergleichbare Ausprägung der Hybridschicht und Kunststofftags wie bei der Bearbeitung des Dentins mit einem Diamantschleifer (Bertrand *et al.*, 2004). Die beschriebenen Veränderungen der Dentinoberfläche bis in eine Tiefe von 3 - 4 μm wurden als Gründe für signifikant niedrigere Haftwerte eines selbstkonditionierenden Systems nach der Er:YAG-Laserapplikation am koronalen Dentin im Vergleich zu einer mit dem Diamantschleifer bearbeiteten Dentinoberfläche beschrieben (De Munck *et al.*, 2002). Darüber hinaus wurde diskutiert, dass die fehlende Schmierschicht nicht in die Verbundschicht integriert werden kann und somit keine globulären Untereinheiten in der Hybridschicht gebildet werden können, die als mineralisierte Füller wirken sollen (Tay *et al.*, 2000). Die vorliegende Studie zeigte ebenfalls geringere Haftwerte für Systeme ohne separate Phosphorsäurekonditionierung nach der Laserbehandlung im Vergleich zur Kontrolle, die jedoch nur für den selbstadhäsiven Befestigungszement RelyX Unicem signifikant waren.

Ozon besitzt bakterizide, fungizide und antivirale Eigenschaften (Kim *et al.*, 1999), die den Einsatz in der Zahnmedizin im Bereich der Kariestherapie sowie der Endodontie und Parodontologie sinnvoll erscheinen lassen. Im Rahmen der Kariestherapie wird die hohe Reaktivität des Ozons ausgenutzt, die zu Oxidationsprozessen und der Zerstörung von Zellwänden, Membranen und Enzymen von Mikroorganismen führt (Yamayoshi und Tatsumi, 1993). Um eine suffiziente Keimelimination im Wurzelkanal zu erreichen, wurde in jüngster Vergangenheit zunehmend die Anwendung von Ozon diskutiert, welches sowohl in gasförmiger als auch in flüssiger Form (gelöst in Wasser) appliziert werden kann (Estrela *et al.*, 2007; Huth *et al.*, 2009; Noetzel *et al.*, 2009). Hier erscheint eine Wirkung gegen *E. faecalis* von besonderer Bedeutung, da dieser Keim häufig als Ursache für Misserfolge in der Endodontie diskutiert wurde und somit zusätzliche desinfizierende Agenzien erfordert (Peculione *et al.*, 2000). Die alleinige Applikation von gasförmigem Ozon ohne eine chemo-mechanische Aufbereitung des Kanals führte zu einer Reduktion der Keimzahl (5×10^4) von *E. faecalis* (Noetzel *et al.*, 2009). Bei Anwendung hoher Konzentrationen wurde in einer Untersuchung auch eine Elimination der Zellkulturen nachgewiesen (Huth *et al.*, 2009). Die Wirksamkeit gasförmigen Ozons im Wurzelkanal hängt wesentlich von der Applikationsart, dem verwendeten Gerät, der Applikationsdauer sowie von der Fließrate und der Konzentration ab (Huth *et al.*, 2009; Noetzel *et al.*, 2009). Zum jetzigen Zeitpunkt liegen keine weiteren Studien vor, die den adhäsiven Verbund im Wurzelkanal nach der Ozonapplikation untersuchen. Die Applikation gasförmigen Ozons für 60 s mit dem HealOzone Gerät (KaVo, Biberach, Deutschland) am Rinderdentin zeigte im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle keinen Einfluss auf die Scherhaftung eines 3-Schritt-Adhäsivsystems (Syntac Classic, Ivoclar Vivadent) (Schmidlin *et al.*, 2005). In der vorliegenden Untersuchung reduzierte sich die Haftung des selbstadhäsiven Befestigungszements RelyX Unicem signifikant nach der Ozonapplikation im Vergleich zur Kontrollgruppe. Ozon gilt als ein starkes Oxidationsmittel; daher erscheint eine Interaktion mit den Initiatorbestandteilen des dualhärtenden Befestigungszements mit einer daraus folgenden verringerten Polymerisationsrate denkbar, wodurch die Reduktion der Haftwerte erklärt werden könnte.

Aufgrund der ungünstigen Bedingungen für den adhäsiven Verbund im Wurzelkanal wurde die Anwendung konventioneller Befestigungszemente wie Glasionomierzement (GIZ) oder kunststoffmodifizierter GIZ zur Befestigung von faserverstärkten Wurzelstiften vorgeschlagen (Cury *et al.*, 2006; Sadek *et al.*, 2006). Der Verbund zur Zahnhartsubstanz von GIZ entsteht durch mikromechanische Retention sowie über einen chemischen Verbund zur Zahnhartsubstanz (Yiu *et al.*, 2004). Die viskoelastischen Eigenschaften von GIZ erscheinen für den Einsatz im Wurzelkanal und die Integrität des Verbundes zur Zahnhartsubstanz günstiger im Vergleich zu den steiferen Befestigungskompositen (Dauvillier *et al.*, 2000). So wies eine Untersuchung signifikant höhere Haftwerte für Ketac Cem nach Wasserlagerung verglichen mit den Haftwerten von zwei getesteten Befestigungskompositen nach (Cury *et al.*, 2006). Die Autoren vermuten, dass es durch die verbliebene Feuchtigkeit im Wurzelkanal in den Dentinkanälchen, die nicht durch die Trocknung mit Papierspitzen beseitigt werden kann, zu einer hygrokopischen Expansion von GIZ kommen könnte, was die Haftung der Wurzelkanalstifte im Kanal durch Friktion erhöhen könnte.

Im Widerspruch zu diesen Ergebnissen resultierte die Befestigung faserverstärkter Wurzelkanalstifte mit GIZ in der vorliegenden Untersuchung in signifikant niedrigeren Haftwerten als die Befestigung mit Kompositen. Die Proben wurden hier jedoch bereits 24 h nach der Stifteinsetzung getestet, sodass eine Erhöhung der Haftung durch die vermutete hygrokopische Expansion unwahrscheinlich ist. Die sofortige Belastbarkeit der mit Wurzelkanalstiften restaurierten Zähne ist jedoch für den klinischen Erfolg ein wesentlicher Faktor, weshalb die Befestigung der Stifte mit GIZ kritisch betrachtet werden sollte. Die Analyse der Versagensmodi zeigte für GIZ im Gegensatz zu den anderen untersuchten Befestigungskompositen vorrangig adhäsive Versagen zwischen Stiftoberfläche und Befestigungsmaterial, sodass der Schwachpunkt des Verbundes für die untersuchte Materialkombination hier zu vermuten ist. Die anderen getesteten Materialien zeigten überwiegend gemischte Versagen sowie Versagen zwischen Dentin und Befestigungsmaterial. Dies steht im Einklang mit anderen Untersuchungen über den adhäsiven Verbund im Wurzelkanal (Zicari *et al.*, 2008). Eine weitere In-vitro-Untersuchung weist ebenfalls darauf hin, dass die adhäsive Befestigung glasfaserverstärkter Wurzelkanalstifte zu einer erhöhten Frakturresistenz im Vergleich zur konventionellen Befestigung führt (Naumann *et al.*, 2008b).

5.3. VALIDIERUNG DER KONFOKALEN LASER-RASTERMIKROSKOPIE MIT DER RASTER-ELEKTRONENMIKROSKOPIE ZUR VISUALISIERUNG DES ADHÄSIVEN VERBUNDES IM WURZELKANAL

Die Visualisierung der adhäsiven Verbundschicht zum Dentin mit dem REM ist eine weitverbreitete und anerkannte Methode, um die Mikromorphologie des Verbundes darzustellen (Van Meerbeek *et al.*, 2000). Die aufwändige Probenherstellung für die REM-Analyse des Verbundes erfordert jedoch die vollständige Trocknung der Proben und partielle Auflösung der Zahnhartsubstanz. Dies kann zu Fehlinterpretationen bei der Betrachtung der Verbundschicht führen (Arrais *et al.*, 2009). Als Vorteile der konfokalen Laser-Rastermikroskopie im Vergleich zur Rasterelektronenmikroskopie wird die getrennte Visualisierung einzelner Bestandteile von Adhäsivsystemen gesehen, die durch die Beimischung von verschiedenen fluoreszierenden Farbstoffen möglich ist und überdies Informationen liefern kann, welche Komponenten bei der Ausbildung von Kunststofftags und der Hybridschicht beteiligt sind (Pióch *et al.*, 1997). Wegen der vergleichsweise einfachen Probenherstellung für die konfokale Laser-Rastermikroskopie und der Möglichkeit, Proben in einem feuchten Milieu zu analysieren, wird zudem das Risiko von Trocknungs- oder

Schrumpfungsartefakten reduziert (D'Alpino *et al.*, 2006a); dieselben Proben können nach der Analyse mit dem CLSM auch mit anderen mikroskopischen Methoden untersucht werden (D'Souza *et al.*, 1999; Pioch *et al.*, 1997). Zusätzlich bietet das CLSM die Möglichkeit, Bereiche unterhalb der Oberfläche zu visualisieren (Watson, 1997) und damit dreidimensional darzustellen. Dadurch werden Fehlinterpretationen durch oberflächliche Artefakte, welche durch das Sägen und die Politur der Proben entstehen können, umgangen. Eine Korrelation von Messungen mit dem CLSM und dem REM an identischen Proben des Wurzelkanal Dentins wurde bislang nicht publiziert und sollte Aufschluss über mögliche Unterschiede bei der Analyse der Verbundschicht zum Wurzelkanal Dentin geben.

In der vorliegenden Studie wurde die Verbundschicht eines Etch-and-Rinse-Systems in Verbindung mit einem chemisch härtenden Komposit (Polymerisation durch die Beimengung eines Katalysators) zum Wurzelkanal Dentin analysiert, um die morphologische Darstellung der Hybridschicht und die Anzahl der mit Komposit gefüllten Dentintubuli vergleichen zu können. Die Messung der Hybridschichtdicken zeigte eine gute Korrelation der beiden Methoden. Die Werte, die mit dem CLSM erzielt wurden, lagen signifikant höher als die Messungen mit dem REM. Darüber hinaus wurden signifikant mehr Dentintubuli, die mit Befestigungskomposit gefüllt waren, mit der CLSM Analyse festgestellt. Dies wurde auch in einer kürzlich publizierten Arbeit bestätigt (Arrais *et al.*, 2009).

Ein Übersichtsartikel über die Anwendung fluoreszierender Farbstoffe bei der Darstellung des adhäsiven Verbundes zur Zahnhartsubstanz verdeutlicht, in welchen Bereichen es bei der Anwendung des Dualfluoreszenzmodus mit dem CLSM zu möglichen Fehlinterpretationen bei der Analyse der Verbundschicht kommen kann, und dass die Vergleichbarkeit bisher publizierter Untersuchungen durch das Fehlen einer standardisierten Methode erheblich erschwert ist (D'Alpino *et al.*, 2006a). Die Vermischung von Adhäsivsystemen oder Befestigungskompositen mit fluoreszierenden Farbstoffen führt nicht zu einem chemischen Verbund zwischen den Komponenten, und eine Diffusion der Farbstoffe in das hydrophile Dentin kann nicht vollständig ausgeschlossen werden (Watson, 1997). So kann es zu Fehleinschätzungen bei der Verteilung der Komponenten kommen, wie bspw. einer Überinterpretation der Hybridschichtausprägung, da dann zusätzlich die Diffusion des Farbstoffes in die Zahnhartsubstanz in die Messung miteinbezogen wird. Das Ausmaß der Diffusion des Farbstoffes Rhodamin B, welches einem Komposit beigemischt war, zeigte eine Abhängigkeit vom Lagerungsmedium sowie von der Lagerungszeit (D'Alpino *et al.*, 2006b).

Bei der Anwendung von Etch-and-Rinse-Systemen konnte ein Unterschied in der Konversionsrate der Monomere festgestellt werden, die in Richtung des demineralisierten Dentins abnahm (Spencer *et al.*, 2000). Durch eine unvollständige Polymerisation der Adhäsivsysteme kann ein Herausdiffundieren der fluoreszierenden Farbstoffe ebenfalls ermöglicht werden, was wiederum Fehlinterpretationen bei der Analyse der Verbundschicht zur Folge haben kann. Neben der möglichen Überinterpretation der Schicht durch die oben beschriebene Diffusion von Farbstoffen aus dem Adhäsivsystem in das Dentin wurde diskutiert, dass es bei der REM-Analyse der Verbundschicht zu einer Schrumpfung der Hybridschicht in den weniger stark mit Adhäsiv infiltrierten Bereichen kommen kann (Doerfer *et al.*, 2000). Beide Faktoren könnten zu den unterschiedlichen Messungen beigetragen haben.

Den Ergebnissen der vorliegenden Studie kann entnommen werden, dass die Visualisierung von Befestigungskomposit in den Dentintubuli mit dem REM erschwert war. Dies kann durch die

ähnliche Zusammensetzung der Komponenten der Verbundschicht begründet sein, die zu einem geringen Kontrast bei REM-Bildern führen. Durch die Anfärbung des Komposits mit dem fluoreszierenden Farbstoff Rhodamin-B-Isothiocyanat (RITC) konnte das Komposit auch ohne die Anwesenheit von Füllkörpern in den Dentintubuli mit dem CLSM visualisiert werden. Die Anwesenheit von Füllkörpern an der Oberfläche der Probe war für eine Detektion mit dem REM in der vorliegenden Arbeit notwendig, da die Zahnhartsubstanz nicht entfernt und eine Analyse mit dem Niedrigvakuum ohne Beschichtung der Probe vorgenommen wurde. Dies sollte die Vergleichbarkeit der beiden Methoden erhöhen, da die Proben nicht durch zusätzliche präparatorische Maßnahmen verändert wurden.

5.4. MORPHOLOGISCHE ANALYSE UND HAFTWERTMESSUNGEN VERSCHIEDENER BEFESTIGUNGSKOMPOSITE ZUM WURZELKANALDENTIN

Die zuvor validierte Methode zur Visualisierung des adhäsiven Verbundes im Wurzelkanal mit dem CLSM wurde in der vorliegenden Arbeit zur Untersuchung von verschiedenen Befestigungssystemen zur Insertion von faserverstärkten Wurzelkanalstiften angewendet. So sollten Informationen über die Verteilung der einzelnen Komponenten der Befestigungssysteme im Wurzelkanal nach der Stiftinsertion gewonnen werden. Eine Polymerisation der Adhäsivsysteme im Kanal vor der Stiftinsertion wird nicht empfohlen, um die Stiftpassung nicht zu gefährden. Es wurde jedoch beschrieben, dass es bei der adhäsiven Eingliederung von Restaurationen und dem hierbei auftretenden Druck zu einem Kollaps des Kollagennetzwerkes kommen kann (Dietschi und Spreafico, 1998). Aufgrund des auftretenden Drucks bei der Stiftinsertion ist eine Durchmischung der Komponenten Adhäsivsystem und Befestigungskomposit sowie eine Penetration der Befestigungskomposite in die Dentintubuli denkbar. Dies wurde bereits an anderer Stelle für die Befestigung von experimentellen Kunststoffblöckchen am koronalen Dentin gezeigt (Arrais *et al.*, 2009). Informationen über eine mögliche Durchmischung der Komponenten der Befestigungssysteme im Wurzelkanal anhand der Bestimmung morphologischer Charakteristika der Verbundschicht in Verbindung mit Haftwertmessungen derselben Proben sollten in der vorliegenden Untersuchung mögliche Auswirkungen auf die Haftung der einzelnen Systeme nachweisen. Die Studie zeigte einen signifikanten Einfluss der fünf untersuchten Materialien zur adhäsiven Befestigung von faserverstärkten Wurzelkanalstiften sowohl auf die Haftung als auch auf die morphologischen Charakteristika der Verbundschicht.

Die Anwendung von Befestigungssystemen im Wurzelkanal mit einer Konditionierung des Dentins mit Phosphorsäure führte zu einer mit dem CLSM darstellbaren homogenen Hybridschicht mit einer Ausprägung von 2 - 4 μm sowie zur Ausbildung von zahlreichen Kunststofftags. Diese waren vermehrt mit Befestigungskomposit gefüllt, welches durch die Anfärbung des Komposits mit dem rot fluoreszierenden Farbstoff RITC sowie der Anwesenheit von Füllkörpern in den Dentintubuli nachgewiesen werden konnte. Gleiches wurde auch in anderen Untersuchungen festgestellt (Arrais *et al.*, 2009; Pirani *et al.*, 2005). Darüber hinaus wird spekuliert, dass es durch die verlängerte Polymerisationsreaktion bei chemisch härtenden Kompositen eher zu einer Penetration des Komposits in das demineralisierte Dentin und zu einer Vermischung mit den Komponenten des Adhäsivsystems kommen kann (Arrais *et al.*, 2009). Eine solche Vermischung könnte zu einem erhöhten Anteil hydrophober Monomere in der Hybridschicht beitragen, der einen positiven Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Verbundschicht haben soll (De Munck *et al.*, 2003).

Bei den untersuchten Etch-and-Rinse-Systemen wurden bis auf das Material Clearfil Core/New Bond auch Frakturen innerhalb der mit Befestigungskomposit gefüllten Dentintubuli beobachtet. Dieses Phänomen wurde bislang noch nicht beschrieben. Es kann zum jetzigen Zeitpunkt nur vermutet werden, dass die Demineralisation des Dentins durch die Phosphorsäure eine tiefe Penetration der Komposite in die Dentintubuli ermöglicht und die Polymerisationsschrumpfung der Materialien zu einem Abriss der Komposite in den langen schmalen Tubuli führt. Das Auftreten von Blasen innerhalb der mit Komposit gefüllten Tubuli anstatt der vermuteten Frakturen erscheint durch die visualisierte Struktur unwahrscheinlich, ist aber nicht generell auszuschließen. Im Gegensatz zu den untersuchten dualhärtenden Befestigungskompositen traten die beobachteten Abrisse des Komposits in den Dentintubuli nicht bei dem dunkel härtenden Komposit Clearfil Core auf. Hierfür könnten die besseren Fließigenschaften chemisch härtender Komposite bei der im Vergleich zur Lichtinitiation langsameren Polymerisationsreaktion verantwortlich sein (Feilzer *et al.*, 1993).

Durch die Beimischung der fluoreszierenden Farbstoffe in die einzelnen Komponenten der Befestigungssysteme können mögliche Einflüsse auf die Konversionsrate der Komposite sowie die Haftung zur Zahnhartsubstanz (D'Alpino *et al.*, 2006b) und auf den pH-Wert der Adhäsivsysteme (Sidhu und Watson, 1998) nicht ausgeschlossen werden. Bei einem Vergleich mit früheren publizierten Ergebnissen zur Retention faserverstärkter Wurzelkanalstifte (Bitter *et al.*, 2006a; Bitter *et al.*, 2008b) wurden jedoch ähnliche Haftwerte der einzelnen untersuchten Befestigungssysteme ohne Farbstoffbeimengung nachgewiesen. Dennoch zeigten sich Unterschiede zu publizierten Daten anderer Autorengruppen. So wurden zum Teil geringere Werte für RelyX Unicem im Vergleich zum Etch-and-Rinse-System Variolink II/Excite DSC gefunden (Goracci *et al.*, 2004; Goracci *et al.*, 2005c). Eine weitere Studie wies höhere Werte für den selbstkonditionierenden ED Primer mit Panavia 21 und Clearfil Esthetic Cement als für RelyX Unicem und Variolink/Excite DSC nach (Zicari *et al.*, 2008).

In der zitierten sowie in der vorliegenden Studie wurde der selbstadhäsive Befestigungszement RelyX Unicem mit dem vom Hersteller mitgelieferten „Elongationtip“ in den Kanal appliziert - eine Applikationsmethode, die in einer homogeneren Zementschicht im Vergleich zu herkömmlichen Techniken, wie der Applikation des Zements auf den Stift, resultierte (Watzke *et al.*, 2008). Eine mögliche Beeinflussung der Ergebnisse kann durch die Verwendung verschiedener Glasfaserstifte in den jeweiligen Studien zustande kommen, da die Lichttransmission von glasfaserverstärkten Stiften signifikante Unterschiede aufweist (Goracci *et al.*, 2008) und dies Auswirkungen auf die Polymerisation bzw. Konversionsrate der einzelnen Systeme haben kann (Faria e Silva *et al.*, 2007; Roberts *et al.*, 2004).

Die zusätzliche Untersuchung der Versagensmodi mit dem CLSM analysierte identische Bildausschnitte vor und nach dem Ausstoßversuch. Die mit dem Stereomikroskop als adhäsive Versagen zwischen Dentin und Befestigungskomposit eingeordneten Proben zeigten unter dem CLSM einen Abriss zwischen dem infiltrierten Dentin mit einer darstellbaren Hybridschicht sowie mit Adhäsiv und Komposit gefüllten Dentintubuli und der Zementschicht (Abb. 3 a u. b). Eine weitere exemplarische Aufnahme des Adhäsivsystems Excite DSC ermöglichte nach dem Ausstoßversuch die Aussage über ein kohäsives Versagen im mit Adhäsiv und Komposit infiltrierten Dentin (Abb. 4 a u. b).

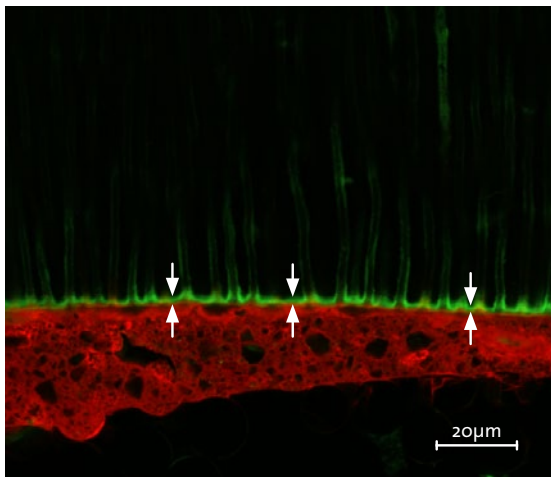


Abb. 3a:
Aufnahme mit dem konfokalen Laser-Rastermikroskop eines mit dem selbstkonditionierendem Adhäsivsystem ED Primer und dem Befestigungskomposit Panavia F 2.0 (Kuraray) befestigten Glasfaserstiftes im Wurzelkanal. Die Hybridschicht (grün) ist mit Pfeilen gekennzeichnet. Das Befestigungskomposit ist rot angefärbt.

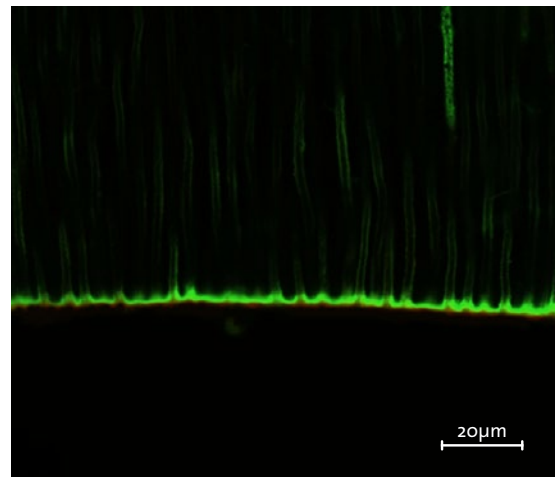


Abb. 3b:
Der Ausschnitt derselben Probe nach dem Ausstoßversuch verdeutlicht, dass das Versagen in diesem Fall zwischen Befestigungskomposit und mit Adhäsiv infiltriertem Dentin auftrat.

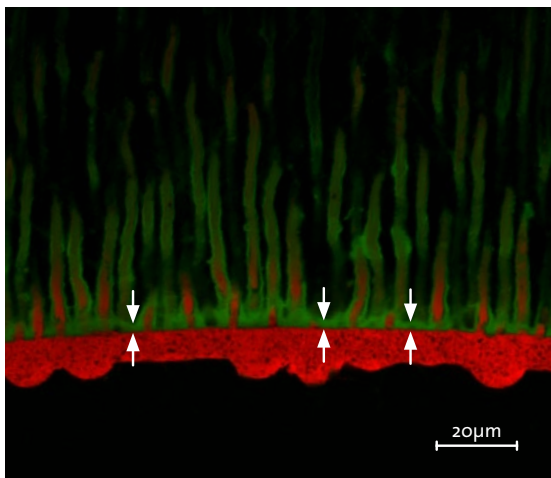


Abb. 4a:
Die Befestigung des faserverstärkten Wurzelstiftes erfolgt bei dieser konfokalen laser-rastermikroskopischen Aufnahme mit dem Adhäsivsystem Excite DSC (grün) und dem Befestigungskomposit Variolink II (rot) (Vivadent Ivoclar), welches eine Konditionierung des Dentins mit Phosphorsäure erfordert.

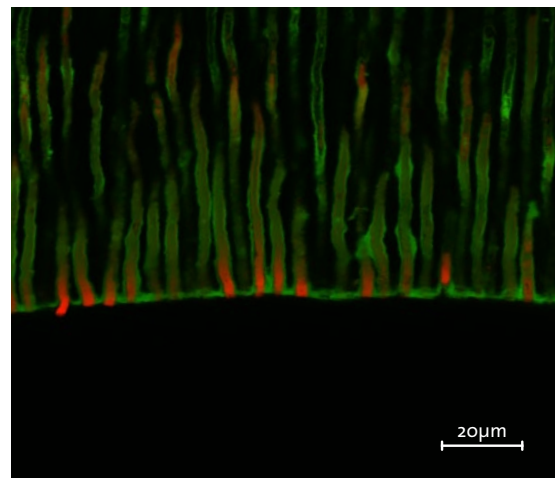


Abb. 4b:
Die Abbildung nach dem Ausstoßversuch belegt, dass ein Großteil der Hybridschicht und mit Adhäsiv und Komposit infiltrierten Dentintubuli fehlt, was somit auf ein kohäsives Versagen im infiltrierten Dentin hindeutet.

5.5. RANDOMISIERTE KLINISCHE STUDIE ÜBER DEN EINFLUSS DER STIFTINSERTION AUF DIE VERSAGENSRATE POSTENDODONTISCHER VERSORGUNGEN

In einer Übersichtsarbeit der Cochrane Library aus dem Jahr 2007 wurde hervorgehoben, dass zum besagten Zeitpunkt keine definitiven Aussagen über den Einfluss des Stifttyps sowie der verbliebenen Restzahnhartsubstanz auf der Basis prospektiver randomisierter klinischer Studien getroffen werden könnten (Bolla *et al.*, 2007). Nur eine Studie konnte ausgewählt werden, in der die Überlegenheit von Karbonfaserstiften gegenüber metallischen laborgefertigten Stiftaufbauten nachgewiesen wurde (Ferrari *et al.*, 2000a). Darüber hinaus wurde gefordert, die verbliebene koronale Restzahnhartsubstanz anhand der verbliebenen Dentinwände zu klassifizieren. Eine weitere Übersichtsarbeit (Cagidiaco *et al.*, 2008b) betonte ebenfalls, dass die Datenlage nicht für einen systematischen Übersichtsartikel bzw. eine Metaanalyse ausreichte, da die einzelnen klinischen Studien über postendodontische Restaurationen mit faserverstärkten Wurzelkanalstiften unterschiedliche Zielsetzungen verfolgten wie einen Vergleich mit metallischen Stiftsystemen (Ferrari *et al.*, 2000b; Naumann *et al.*, 2007b; Schmitter *et al.*, 2007) oder mit Restaurationen ohne intrakanaläre Verankerung (Cagidiaco *et al.*, 2008a; Ferrari *et al.*, 2007).

Die vorliegende randomisierte prospektive klinische Studie reiht sich in die zuletzt erwähnten Studien ein und wurde entsprechend der Richtlinien der CONSORT-Gruppe durchgeführt (Moher *et al.*, 2001). Zielsetzung war es, den Einfluss der Stiftinsertion mit faserverstärkten Wurzelkanalstiften sowie der koronalen Restzahnhartsubstanz auf die Versagensrate postendodontischer Versorgungen zu untersuchen. Über einen Zeitraum von knapp drei Jahren wurden endodontisch behandelte Zähne in der Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie des CharitéCentrum 3 der Charité - Universitätsmedizin Berlin in diese Studie eingeschlossen und je nach koronalem Zahnhartsubstanzverlust in drei Gruppen eingeteilt. In diesen Gruppen erfolgte die randomisierte Zuteilung in eine Stiftgruppe und eine Gruppe, in denen die Aufbaufüllungen und anschließenden postendodontischen Versorgungen ohne Wurzelkanalstift angefertigt wurden. Die Ergebnisse zeigten nach einer mittleren Beobachtungsdauer von $32 \pm 13,7$ Monaten bei Betrachtung aller Gruppen keinen signifikanten Einfluss der Stiftinsertion auf die Versagensrate. Lediglich in der Gruppe mit dem höchsten koronalen Zahnhartsubstanzverlust (keine verbliebene Dentinwand von 2 mm oberhalb des Gingivalsaums) zeigte sich eine signifikant höhere Versagensrate (31 %) für postendodontische Versorgungen, die ohne Wurzelstift angefertigt wurden, im Vergleich zu stiftverankerten Restaurationen (7 %). Dies bestätigt die Ergebnisse der oben genannten Studien (Cagidiaco *et al.*, 2008a; Ferrari *et al.*, 2007). Diese zeigten jedoch zusätzlich bereits ein erhöhtes Versagensrisiko für endodontisch behandelte Zähne mit ein oder zwei verbliebenen Dentinwänden, die verglichen mit stiftverankerten Restaurationen ohne Wurzelstift restauriert wurden. Der Unterschied zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie könnte in der Auswahl der unterschiedlichen Restaurationsformen begründet sein. In den zitierten Studien wurden alle Zähne unabhängig vom Destruktionsgrad mit einer Metallkeramik-Verblendkrone versorgt (Cagidiaco *et al.*, 2008a; Ferrari *et al.*, 2007), wohingegen die Zähne in der vorliegenden Studie unter dem Aspekt der größtmöglichen Zahnhartsubstanzschonung restauriert wurden. Der zusätzliche Zahnhartsubstanzverlust durch die Präparation der Krone könnte zu einer Schwächung der Zähne in den zitierten Arbeiten geführt haben.

Das in der vorliegenden Studie verwendete chemisch härtende Stiftbefestigungs- und Aufbaumaterial Clearfil Core mit dem Adhäsivsystem New Bond (Kuraray) wurde auch in den vorgestellten In-vitro-Studien dieser Habilitationsschrift untersucht. Es zeigte sowohl zur Stiftoberfläche eines Quarzfaserstiftes (Bitter *et al.*, 2008a) sowie zum Wurzelkanalentin (Bitter *et al.*, 2009) Haftwerte, die einen

erfolgreichen klinischen Einsatz versprechen. Darüber hinaus ergab die morphologische Analyse der Verbundschicht eine homogene Hybridschicht und zahlreiche mit Adhäsiv und Komposit gefüllte Dentintubuli; gebrochene Kunststofftags traten bei diesem Befestigungssystem nicht auf (Bitter *et al.*, 2009). Der eingesetzte Wurzelstift DT Light Post (VDW) hat bereits in anderen klinischen Studien gute Ergebnisse erzielt (Cagidiaco *et al.*, 2008a; Ferrari *et al.*, 2007; Grandini *et al.*, 2005), die auch in dieser Studie mit einer Versagensrate von 8 % nach 32 Monaten bestätigt werden konnten. Darüber hinaus wurde die durchgeführte positive In-vitro-Testung des Materials Clearfil Core sowohl für die Herstellung des plastischen Aufbaus als auch für die Stiftinsertion im klinischen Einsatz bestätigt.

Die koronale Restauration wurde entsprechend der klinischen Situation ausgewählt, wie es dem Vorgehen im klinischen Alltag entspricht. Hier wurden sowohl der koronale Zahnhartsubstanzenverlust als auch die ästhetischen Ansprüche des Patienten, die Position im Zahnbogen sowie die Funktion berücksichtigt; es sollte möglichst wenig gesunde Zahnhartsubstanz geopfert werden. Dieses Vorgehen führte dazu, dass sechs definitive koronale Restaurationsformen [Metallkeramik-Verblendkrone (n=75), Goldteilkrone (n=11), Goldkrone (n=5), Keramikteilkrone (n=7), Vollkeramikkrone (n=14), direkte Kompositfüllung (n=8)] eingeschlossen wurden. Die ungleiche Verteilung der Restaurationsarten ermöglichte einerseits keinen Rückschluss von der Restaurationsart auf die Versagensrate, andererseits erhöhte der Einschluss der verschiedenen Restaurationsformen jedoch die externe Validität der vorliegenden Studie.

Die in der Übersichtsarbeit der Cochrane Library geforderte Nachuntersuchungsperiode prospektiver Studien von mindestens drei Jahren konnte in der vorliegenden Studie nicht ganz eingehalten werden; die mittlere Beobachtungsdauer lag bei $32 \pm 13,7$ Monaten. Obwohl einige Patienten demzufolge weniger als drei Jahre unter Beobachtung standen, kann mit dem Kaplan-Meier-Schätzer in der vorliegenden Studie eine Aussage über die Drei-Jahres-Versagensrate getroffen werden, da auch bei einem hohen Anteil zensierter Daten der Kaplan-Meier-Schätzer asymptotisch unverzerrt bleibt.

6. SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die Applikation eines Silans auf die Oberfläche faserverstärkter Wurzelstifte führte in der ersten Originalarbeit nur zu einer geringen und folglich keiner klinisch relevanten Erhöhung der Stiftretention. Auf der Basis dieser Ergebnisse kann eine routinemäßige Silanisierung der Stifte vor dem Einsetzen nicht empfohlen werden. Vielmehr ist bei der Verwendung nicht vorbehandelter Faserstifte die Reinigung der Stifte vor dem Einsetzen und die daraus resultierende Benetzbarkeit ein wesentlicher Faktor für einen stabilen Verbund zum Befestigungsmaterial. Je nach Hersteller des Stiftsystems werden hier Phosphorsäure oder Alkohol empfohlen. Insgesamt betrachtet erscheint die Verwendung konfektionierter faserverstärkter Wurzelkanalstifte mit einer industriell optimierten Oberfläche zur Verbesserung des Verbundes klinisch praktikabler als „chairside“ durchgeführte Vorbehandlungen des Stiftes.

Weitere In-vitro- als auch In-vivo-Untersuchungen sind jedoch notwendig, um endgültige Empfehlungen hinsichtlich der Verwendung von faserverstärkten Wurzelstiften mit einer industriell optimierten Oberfläche geben zu können. Dennoch sollte in diesem Zusammenhang beachtet werden, dass eine Vielzahl von Studien den Verbund zwischen Befestigungskomposit und Wurzelkanalentin als den kritischen Punkt bei der angestrebten funktionellen Einheit im Wurzelkanal betrachtet und damit die klinische Relevanz einer Optimierung des Verbundes zwischen Komposit und Faserstift zum jetzigen Zeitpunkt ungeklärt ist.

Die nachgewiesene Reduktion der Haftwerte zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften und Aufbaumaterialien nach Wasserlagerung und thermozyklischer Wechsellast weist darauf hin, dass der Stift auch nach der Präparation von Aufbaumaterial bedeckt sein sollte, um eine mögliche negative Beeinflussung der Biegefestigkeit des Stiftes sowie des Verbundes zwischen Stift und Aufbaumaterial zu verhindern.

Die Ergebnisse der ersten Originalarbeit belegten signifikante Unterschiede zwischen den drei untersuchten Stifttypen sowie signifikante Interaktionen zwischen den Faktoren Stifttyp und Aufbaumaterial bei den Haftwertuntersuchungen. Das bedeutet, dass die Auswahl der Materialkombination Auswirkungen auf die Stabilität der postendodontischen Restauration haben kann. Die Kombination eines dünnfließenden Aufbaumaterials mit dem individuell formbaren Stift mit einer zu interpenetrierenden Polymermatrix zeigte signifikant höhere Haftwerte als die anderen Materialkombinationen. Doch auch die Kombination zwischen einem quarzfaserverstärkten Wurzelstift mit einer Epoxidharzmatrix und dem chemisch härtenden Material Clearfil Core wies *in vitro* Verbundwerte auf, die einen erfolgreichen klinischen Einsatz versprechen.

Die Anwendung zusätzlicher Reinigungsmethoden des Wurzelkanals wie dem Er:YAG-Laser oder gasförmigen Ozons vor der adhäsiven Insertion von faserverstärkten Wurzelstiften sollten auf das zu wählende Befestigungssystem abgestimmt werden, da einzelne Komponenten, wie die Initiatoren durch verbliebenen Sauerstoff im Kanal in ihrer Reaktivität eingeschränkt werden könnten oder eine Veränderung der Dentinoberfläche und die Entfernung des Smear Layers durch die Laserapplikation die Interaktion selbstkonditionierender Adhäsivsysteme mit der Zahnhartsubstanz beeinflussen könnten.

Die in anderen Studien beschriebenen Vorteile der Befestigung von faserverstärkten Wurzelstiften mit GIZ konnten in der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden. Die nachgewiesenen

geringen Haftwerte lassen den klinischen Einsatz kritisch erscheinen. Dennoch sollten weitere Untersuchungen abgewartet werden, bevor endgültige Empfehlungen gegeben werden können.

Die Analyse der Verbundschicht zum Wurzelkanalentin mit dem Dualfluoreszenzmodus des CLSMs ermöglichte in der dritten Originalarbeit eine detaillierte Beurteilung der Verteilung der beteiligten Komponenten. Zudem konnte eine gute Korrelation zwischen dem aktuellen Goldstandard REM und dem CLSM bei der Betrachtung der Hybridschicht nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu war die Darstellung mit Komposit gefüllter Dentintubuli mit dem REM erschwert. Beide mikroskopischen Methoden bergen jedoch Risiken von möglichen Fehlinterpretationen bei der Verbundschichtanalyse, die vor allem bei der Beurteilung quantitativer Analysen der Verbundschicht berücksichtigt werden sollten.

Die Ergebnisse der CLSM-Analyse der Verbundschicht zum Wurzelkanalentin mit Haftwertmessungen derselben Proben in der vierten Originalarbeit belegen, dass die Hybridisierung des Wurzelkanalentin sowie die Ausbildung von Kunststofftags nicht zwingend zu erhöhten mit Ausstoßversuchen ermittelten Haftwerten beitragen. Die signifikant höheren Haftwerte von RelyX Unicem im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien bei einer kaum nachzuweisenden Hybridisierung des Dentins deuten darauf hin, dass die ermittelten Werte in diesem Fall vorrangig aus Friktion und chemischer Interaktion dieses Materials mit dem Hydroxylapatit resultieren. Es sollte in diesem Zusammenhang zusätzlich berücksichtigt werden, dass die Haftung der Materialien sowie deren Festigkeit auch von der Homogenität der Zementfuge abhängt, die wesentlich von der Applikationsmethode bestimmt wird. Denkbar ist auch, dass die Fließeigenschaften der Befestigungszemente die Bildung von Inhomogenitäten wie Blasen und Spalten in der Zementfuge beeinflussen. Dieser Aspekt sollte in weiteren Studien, die sich mit der Haftung verschiedener Materialien im Wurzelkanal beschäftigen, eingehender analysiert und berücksichtigt werden.

Die Versorgung von endodontisch behandelten Zähnen mit quarzfaserverstärkten Wurzelstiften führte in der prospektiven, randomisierten klinischen Studie nur bei Zähnen mit äquigingivalen Defekten zu einer verringerten Versagensrate im Vergleich zur Versorgung ohne Wurzelstift. Auf der Basis dieser Ergebnisse ist eine Stiftinsertion bei äquigingivalen Defekten anzuraten. Ob die Stiftinsertion ebenfalls bei Zähnen mit einer verbliebenen Restdentinwand nach einer längeren Beobachtungsdauer zu einer Verringerung der Versagensrate beiträgt, sollte nach einer längeren Beobachtungsdauer abschließend beurteilt werden.

Um nachzuweisen, ob bei einem Zahnhartsubstanzverlust mit einer oder mehr verbliebenen Dentinwänden kein Wurzelstift erforderlich ist, wurde in der Diskussion der vorliegenden Originalarbeit eine weitere Fallzahlschätzung vorgenommen und bei einer Aufnahmezeit von drei Jahren und einem weiteren Jahr Nachbeobachtungsdauer eine Zahl von 630 einzuschließenden Zähnen errechnet. Diese Fallzahl ist vermutlich nur in einer Multicenter-Studie zu erreichen. Eine detaillierte Analyse der Defektausdehnung (Naumann *et al.*, 2002; Naumann *et al.*, 2006a) vor der Rekonstruktion der zu behandelnden Zähne im Vergleich zur vorgenommenen Klassifikation anhand fehlender Dentinwände könnte zur Definition weiterer Risikofaktoren bei der Versorgung endodontisch behandelter Zähne führen. So wurde in der vorliegenden Studie nicht die Restwandstärke des Dentins am Kanaleingang gemessen. Eine starke Ausschachtung des Kanals jedoch kann den Zahn zusätzlich schwächen und somit Auswirkungen auf die Frakturresistenz haben. Eine genauere Analyse der Defektausdehnung wäre in weiteren klinischen Studien wünschenswert.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Habilitationsschrift war es, die angestrebte funktionelle Einheit zwischen Wurzelkanalentin, Befestigungskomposit und faserverstärktem Wurzelkanalstift *in vitro* eingehend zu beleuchten. Darüber hinaus sollte in einer prospektiven, randomisierten klinischen Studie dem Einfluss der Stiftinsertion sowie der koronalen Restzahnhartsubstanz auf die Versagensrate endodontisch behandelter Zähne nachgegangen werden.

Die erste Originalarbeit beschäftigte sich mit der Analyse des Verbundes zwischen Befestigungskomposit und Stiftoberfläche. Dabei wurde die Haftung von drei verschiedenen Stiftsystemen unter Berücksichtigung der Faktoren Aufbaumaterial, Vorbehandlung (Silanapplikation) und thermozyklischer Wechselbelastung untersucht. Die Ergebnisse belegten signifikante Effekte der Vorbehandlung der Stiftoberfläche mit einem Silan, des Stifttyps und der thermozyklischen Wechsellast auf die Haftung zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften und Aufbaukomposit. Die Vorbehandlung der Stiftoberfläche mit einem Silan resultierte in einer signifikanten Haftwertsteigerung. Diese betrug im Mittel jedoch nur 2 MPa, was eine klinische Relevanz somit fraglich erscheinen lässt. Die künstliche Alterung der Proben in dieser Studie führte zu einer signifikanten Reduktion der Haftkraft, die durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der untersuchten Materialien sowie durch Wasseraufnahme, der daraus resultierenden Quellung der Polymere und einer partielle Hydrolyse des Silans verursacht worden sein kann. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich die klinische Empfehlung, dass faserverstärkte Wurzelkanalstifte auch nach der Präparation von Aufbaumaterial bedeckt sein sollten, um eine Beeinträchtigung der Biegefestigkeit des Stiftes zu vermeiden.

In der zweiten Originalarbeit wurde der Verbund zum Wurzelkanalentin unter Berücksichtigung verschiedener Vorbehandlungen für einen zusätzlichen Reinigungseffekt des Kanals analysiert. Die Retention glasfaserverstärkter Wurzelstifte, eingesetzt mit vier verschiedenen Befestigungsmaterialien in extrahierte obere mittlere Frontzähne, wurde nach der Applikation eines Er:YAG-Lasers, der Anwendung gasförmigem Ozons und einer Spülung des Wurzelkanals mit CHX (Kontrolle), getestet. Es zeigte sich ein signifikanter Effekt des Befestigungsmaterials auf den Haftverbund. Die Vorbehandlungsmaßnahmen hatten keinen signifikanten Einfluss. Es traten jedoch signifikante Interaktionen zwischen den Faktoren Vorbehandlung und Befestigungsmaterial auf. Die Anwendung gasförmigen Ozons zeigte bspw. eine signifikante Schwächung der Haftung des selbstadhäsiven Befestigungszementes RelyX Unicem im Vergleich zur Kontrolle. In diesem Zusammenhang ist eine Interaktion mit den Initiator Komponenten des dualhärtenden Befestigungszements mit einer daraus folgenden verringerten Polymerisationsrate aufgrund der starken Oxidationswirkung des Ozons denkbar.

Die Verwendung des Er:YAG-Lasers im Wurzelkanal wies konträre Effekte auf die Haftung der einzelnen Befestigungssysteme nach. Die Haftwerte eines Etch-and-Rinse-Systems zeigten signifikante Haftwertsteigerungen, wohingegen die Haftung von Systemen ohne separate Phosphorsäureätzung im Vergleich zur Kontrolle abnahm. Dies war jedoch nur für den selbstadhäsiven Befestigungszement RelyX Unicem signifikant. Demzufolge kann die Veränderung der Dentinoberfläche und die Entfernung des Smear Layers durch die Laserapplikation die Interaktion selbstkonditionierender Adhäsivsysteme mit der Zahnhartsubstanz beeinflussen. Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass die Anwendung der beschriebenen Methoden für eine zusätzliche Desinfektion des Wurzelkanals auf das verwendete Befestigungssystem abgestimmt werden sollte.

Einige Studien empfehlen aufgrund der erschwerten Bedingungen für die Adhäsivtechnik im Wurzelkanal die Anwendung konventioneller Befestigungszemente wie Glasionomerzement, da hiermit nach Wasserlagerung höhere Haftwerte im Wurzelkanal im Vergleich zur Anwendung der Adhäsivtechnik erzielt werden konnten. In der vorliegenden Originalarbeit zeigten sich signifikant niedrigere Haftwerte für den Glasionomerzement im Vergleich zu Befestigungskompositen; das beobachtete Versagen lag vorrangig zwischen Stiftoberfläche und Befestigungszement. Auf der Basis dieser Ergebnisse erscheint die Insertion von faserverstärkten Wurzelstiften mit Glasionomerzement nicht empfehlenswert.

Die dritte Originalarbeit stellte eine bislang nicht publizierte Korrelation von Messungen morphologischer Ausprägungen der Verbundschicht zum Wurzelkanalentin mit dem CLSM und dem REM dar, um die CLSM-Darstellung im Dualfluoreszenzmodus zu validieren. So sollten Informationen über mögliche Unterschiede der beiden Visualisierungsmethoden bei der Analyse der Verbundschicht zum Wurzelkanalentin gewonnen werden. Es wurde die Verbundschicht eines Etch-and-Rinse-Systems in Verbindung mit einem dunkel härtenden Komposit (Clearfil Core, New Bond; Kuraray) zum Wurzelkanalentin bei identischen Proben sowohl mit dem CLSM als auch mit dem REM analysiert, um die Ausprägung der Hybridschicht und die Anzahl der mit Komposit gefüllten Dentintubuli vergleichen zu können. Die Messung der Hybridschichtausprägung zeigte eine gute Korrelation der beiden Methoden. Die Werte, die mit dem CLSM erzielt wurden, lagen jedoch signifikant höher als die Messungen mit dem REM. Darüber hinaus wurden mit der CLSM-Analyse signifikant mehr Dentintubuli, die mit Befestigungskomposit gefüllt waren, beobachtet. Diese Untersuchung veranschaulichte, dass beide untersuchten Methoden das Risiko von Fehlinterpretationen aufweisen und bei der Beurteilung der entsprechenden Bilder berücksichtigt werden sollten. So besteht bei der CLSM-Analyse die Gefahr einer Überinterpretation der Hybridschichtausdehnung durch eine mögliche Penetration der fluoreszierenden Farbstoffe in das hydrophile Dentin. Bei der REM-Analyse der Verbundschicht kann es zu einer Schrumpfung der Hybridschicht in den weniger stark mit Adhäsiv infiltrierten Bereichen kommen, die in einer verringerten Ausdehnung resultieren kann. Insgesamt ermöglichte die Analyse mit dem CLSM bei dem vorliegenden Vergleich eine detaillierte Beurteilung der Verteilung der beteiligten Komponenten an der Verbundschicht im Wurzelkanal.

Die vierte Originalarbeit wendete die beschriebene Visualisierungsmethode im Dualfluoreszenzmodus mit dem CLSM für die Analyse der Verbundschicht zum Wurzelkanalentin an. Die Bestimmung morphologischer Charakteristika der Verbundschicht von fünf verschiedenen Befestigungssystemen im Wurzelkanal sollte Informationen über eine mögliche Durchmischung der Komponenten veranschaulichen. Darüber hinaus sollten Haftwertmessungen derselben Proben mögliche Zusammenhänge zwischen der Morphologie und den Haftwerten der einzelnen Systeme aufzeigen.

Befestigungssysteme, die eine Konditionierung des Wurzelkanalentin mit Phosphorsäure erfordern, wiesen eine deutliche Hybridschicht sowie zahlreiche mit Adhäsiv und Komposit infiltrierte Dentintubuli auf. Die ermittelten Haftwerte des selbstadhäsiven Befestigungszements RelyX Unicem und die des selbstkonditionierenden ED Primers von Panavia F 2.0 lagen jedoch mit Ausnahme des Materials Clearfil Core/New Bond über denen der untersuchten Etch-and-Rinse-Systeme. Dieses unterschied sich nicht signifikant von Panavia F 2.0. Somit scheinen die effektive Hybridisierung des Wurzelkanalentin sowie die Ausbildung von Kunststofftags nicht zwingend zu erhöhten, mit Ausstoßversuchen ermittelten Haftwerten beizutragen. Die Dentintubuli waren bei den Etch-and-Rinse-Systemen vermehrt mit Befestigungskomposit gefüllt. Mit Ausnahme des Materials Clearfil

Core/New Bond wurden bei diesen Systemen Frakturen innerhalb der mit Befestigungskomposit gefüllten Dentintubuli beobachtet. Die Phosphorsäure ermöglichte eine tiefe Penetration der Komposite in die Dentintubuli durch die Demineralisation des Dentins. Durch die Polymerisations-schrumpfung der Materialien könnte dies zu einem Abriss der Komposite in den langen schmalen Tubuli geführt haben.

Die fünfte Originalarbeit stellte eine prospektive randomisierte kontrollierte klinische Studie dar, welche die Versagensrate postendodontischer Restaurationen unter Berücksichtigung der Parameter Stiftinsertion sowie koronaler Zahnhartsubstanzverlust untersuchte und anhand der CONSORT Richtlinien durchgeführt wurde. Über einen Zeitraum von drei Jahren wurden endodontisch behandelte Zähne in diese Studie eingeschlossen und entsprechend des koronalen Zahnhartsubstanzverlustes in drei Gruppen eingeteilt. In diesen Gruppen wurde randomisiert über eine Stiftinsertion entschieden. Die Zähne wurden anschließend mit definitiven Restaurationen versorgt. Die Ergebnisse zeigten bei Betrachtung aller Gruppen keinen signifikanten Einfluss der Stiftinsertion auf die Drei-Jahres-Versagensrate. Lediglich in der Gruppe mit dem höchsten koronalen Zahnhartsubstanzverlust (äquigingivale Defekte) zeigte sich eine signifikant höhere Versagensrate (31 %) für postendodontische Versorgungen, die ohne Wurzelstift angefertigt wurden im Vergleich zu stiftverankerten Restaurationen (7 %).

Der Verbund des Aufbaumaterials Clearfil Core zu einem Quarzfaserstift war in der ersten Originalarbeit einem dünnfließenden Aufbaumaterial überlegen. Auch wies die vierte Originalarbeit für die Stiftinsertion mit Clearfil Core im Wurzelkanal eine homogen ausgeprägte Hybridschicht sowie zahlreiche mit Adhäsiv und Komposit gefüllte Dentintubuli, die nicht frakturiert waren sowie hohe Haftkräfte nach. Demnach erfolgte in der klinischen Studie die Anwendung des Materials Clearfil Core sowohl als Aufbaumaterial als auch als Stiftbefestigungsmaterial. Aufgrund des beobachteten geringen Effektes der Silanisierung auf die Stiftretention wurde auf die Stiftoberfläche in der klinischen Studie kein Silan appliziert. In dem vorliegenden Beobachtungszeitraum von $32 \pm 13,7$ Monaten wurden keine Retentionsverluste des Stiftes beobachtet, die auf ein Versagen zwischen Stift und Befestigungsmaterial hindeuteten. Insgesamt konstatierte die prospektive randomisierte klinische Studie für die Restauration endodontisch behandelter Zähne mit quarzfaserverstärkten Wurzelkanalstiften und einem dunkel härtenden Aufbaumaterial eine Drei-Jahres-Versagensrate von 8 %. Damit konnten vielversprechende Ergebnisse für die beschriebene Behandlungsmethode auch bei Zähnen mit einem hohen koronalen Zahnhartsubstanzverlust nachgewiesen werden. Die Versorgung endodontisch behandelter Zähne ohne Wurzelkanalstift bei äquigingivalen Defekten kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht empfohlen werden, jedoch bestätigen die vorläufigen Ergebnisse der klinischen Studie die gängigen Empfehlungen, dass bei zwei oder mehr vorhandenen Dentinwänden auf einen Wurzelstift verzichtet werden kann. Ob sich diese Beobachtung auch für Zähne mit einer noch bestehenden Dentinwand bestätigt, sollte erst nach einer längeren Beobachtungsdauer sowie weiteren klinischen Untersuchungen abschließend beurteilt werden.

Die Ergebnisse der vorgelegten Originalarbeiten verdeutlichen, dass die Erfolgsrate postendodontischer Restaurationen sowohl von einer bestehenden funktionellen Einheit zwischen Wurzelkanaldentin, Befestigungskomposit und Stiftoberfläche sowie von der verbliebenen Restzahnhartsubstanz und der Stiftinsertion abhängen. Die *in vitro* erzielten Haftwerte der getesteten Befestigungskomposite deuten auf einen erfolgreichen klinischen Einsatz hin. Dennoch sollten in diesem Zusammenhang die ungünstigen klinischen Bedingungen berücksichtigt werden, welche die angestrebte funktionelle

Einheit zwischen allen beschriebenen Komponenten erschweren könnten. Daher erscheint vor allem der Einsatz vereinfachter Befestigungssysteme vielversprechend, um Anwendungsfehler möglichst zu minimieren. Aufgrund der zum jetzigen Zeitpunkt nur vereinzelt vorliegenden klinischen Daten erscheint es dringend angezeigt, weitere Einflüsse auf die Erfolgsrate postendodontischer Restaurationen mit faserverstärkten Wurzelkanalstiften, wie die koronale Versorgung, den Zahntyp und den Wurzelkanalstifttyp, in weiterführenden Studien eingehender zu analysieren.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- Adolphi G, Zehnder M, Bachmann LM, Gohring TN (2007). Direct resin composite restorations in vital versus root-filled posterior teeth: a controlled comparative long-term follow-up. *Oper Dent* 32:437-442.
- Aksornmuang J, Foxton RM, Nakajima M, Tagami J (2004). Microtensile bond strength of a dual-cure resin core material to glass and quartz fiber posts. *J Dent* 32:443-450.
- Aquilino SA, Caplan DJ (2002). Relationship between crown placement and the survival of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* 87:256-263.
- Arrais CA, Miyake K, Rueggeberg FA, Pashley DH, Giannini M (2009). Micromorphology of resin/dentin interfaces using 4th and 5th generation dual-curing adhesive/cement systems: a confocal laser scanning microscope analysis. *J Adhes Dent* 11:15-26.
- Asmussen E, Peutzfeldt A, Heitmann T (1999). Stiffness, elastic limit, and strength of newer types of endodontic posts. *J Dent* 27:275-278.
- Asmussen E, Peutzfeldt A, Sahafi A (2005). Bonding of resin cements to post materials: influence of surface energy characteristics. *J Adhes Dent* 7:231-234.
- Axelsson P, Lindhe J, Nystrom B (1991). On the prevention of caries and periodontal disease. Results of a 15-year longitudinal study in adults. *J Clin Periodontol* 18:182-189.
- Axelsson P, Nystrom B, Lindhe J (2004). 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* 31:749-757.
- Bachicha WS, DiFiore PM, Miller DA, Lautenschlager EP, Pashley DH (1998). Microleakage of endodontically treated teeth restored with posts. *J Endod* 24:703-708.
- Bateman G, Ricketts DN, Saunders WP (2003). Fibre-based post systems: a review. *Br Dent J* 195:43-48.
- Bell AM, Tanner J, Lassila LV, Kangasniemi I, Vallittu P (2004). Bonding of composite resin luting cement to fiber-reinforced composite root canal posts. *J Adhes Dent* 6:319-325.
- Bell AM, Lassila LV, Kangasniemi I, Vallittu PK (2005). Bonding of fibre-reinforced composite post to root canal dentin. *J Dent* 33:533-539.
- Bertrand MF, Hessleyer D, Muller-Bolla M, Nammour S, Rocca JP (2004). Scanning electron microscopic evaluation of resin-dentin interface after Er:YAG laser preparation. *Lasers Surg Med* 35:51-57.
- Bitter K, Meyer-Lueckel H, Priehn K, Kanjuparambil JP, Neumann K, Kielbassa AM (2006a). Effects of luting agent and thermocycling on bond strengths to root canal dentine. *Int Endod J* 39:809-818.
- Bitter K, Meyer-Lueckel H, Priehn K, Martus P, Kielbassa AM (2006b). Bond strengths of resin cements to fiber-reinforced composite posts. *Am J Dent* 19:138-142.
- Bitter K, Noetzel J, Neumann K, Kielbassa AM (2007). Effect of silanization on bond strengths of fiber posts to various resin cements. *Quintessence Int* 38:121-128.
- Bitter K, Neumann K, Kielbassa AM (2008a). Effects of pretreatment and thermocycling on bond strength of resin core materials to various fiber-reinforced composite posts. *J Adhes Dent* 10:481-489.

- Bitter K, Noetzel J, Volk C, Neumann K, Kielbassa AM (2008b). Bond strength of fiber posts after the application of erbium:yttrium-aluminum-garnet laser treatment and gaseous ozone to the root canal. *J Endod* 34:306-309.
- Bitter K, Paris S, Pfuertner C, Neumann K, Kielbassa AM (2009). Morphological and bond strength evaluation of different resin cements to root dentin. *Eur J Oral Sci* 117:326-333.
- Bolhuis P, de Gee A, Feilzer A (2004). Influence of fatigue loading on four post-and-core systems in maxillary premolars. *Quintessence Int* 35:657-667.
- Bolla M, Muller-Bolla M, Borg C, Lupi-Pegorier L, Laplanche O, Leforstier E (2007). Root canal posts for the restoration of root filled teeth. *Cochrane Database Syst Rev* 1:CD004623.
- Cagidiaco MC, Garcia-Godoy F, Vichi A, Grandini S, Goracci C, Ferrari M (2008a). Placement of fiber prefabricated or custom made posts affects the 3-year survival of endodontically treated premolars. *Am J Dent* 21:179-184.
- Cagidiaco MC, Goracci C, Garcia-Godoy F, Ferrari M (2008b). Clinical studies of fiber posts: a literature review. *Int J Prosthodont* 21:328-336.
- Caplan DJ, Kolker J, Rivera EM, Walton RE (2002). Relationship between number of proximal contacts and survival of root canal treated teeth. *Int Endod J* 35:193-199.
- Ceballo L, Toledano M, Osorio R, Tay FR, Marshall GW (2002). Bonding to Er-YAG-laser-treated dentin. *J Dent Res* 81:119-122.
- Chersoni S, Suppa P, Breschi L, Ferrari M, Tay FR, Pashley DH, Prati C (2004). Water movement in the hybrid layer after different dentin treatments. *Dent Mater* 20:796-803.
- Chersoni S, Acquaviva GL, Prati C, Ferrari M, Grandini S, Pashley DH, Tay FR (2005). In vivo fluid movement through dentin adhesives in endodontically treated teeth. *J Dent Res* 84:223-227.
- Cohen BI, Pagnillo MK, Newman I, Musikant BL, Deutsch AS (1998). Retention of three endodontic posts cemented with five dental cements. *J Prosthet Dent* 79:520-525.
- Curti M, Rocca JP, Bertrand MF, Nammour S (2004). Morpho-structural aspects of Er:YAG-prepared class V cavities. *J Clin Laser Med Surg* 22:119-123.
- Cury AH, Goracci C, de Lima Navarro MF, Carvalho RM, Sadek FT, Tay FR, Ferrari M (2006). Effect of hygroscopic expansion on the push-out resistance of glass ionomer-based cements used for the luting of glass fiber posts. *J Endod* 32:537-540.
- D'Alpino PH, Pereira JC, Svizero NR, Rueggeberg FA, Pashley DH (2006a). Use of fluorescent compounds in assessing bonded resin-based restorations: a literature review. *J Dent* 34:623-634.
- D'Alpino PH, Pereira JC, Svizero NR, Rueggeberg FA, Pashley DH (2006b). Factors affecting use of fluorescent agents in identification of resin based polymers. *J Adhes Dent* 8:285-292.
- D'Souza PD, Duschner H, Staehle HJ, Pioch T (1999). Dentin bonding systems: a comparative study of SEM and CLSM used to visualize the resin-dentin interface. *Acta Med Dent Helv* 4:20-26.
- Dauvillier BS, Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL (2000). Visco-elastic parameters of dental restorative materials during setting. *J Dent Res* 79:818-823.
- de la Fuente JL, Madruga EL (1999). Solvent effects on free-radical copolymerization of butyl acrylate with methyl methacrylate. *Macromol Chem Phys* 200:1639-1643.

- De Munck J, Van Meerbeek B, Yuthira R, Lambrechts P, Vanherle G (2002). Micro-tensile bond strength of two adhesives to Erbium:YAG-lased vs. bur-cut enamel and dentin. *Eur J Oral Sci* 110:322-329.
- De Munck J, Van Meerbeek B, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Suzuki K, Lambrechts P, Vanherle G (2003). Four-year water degradation of total-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res* 82:136-140.
- de Rijk WG (2000). Removal of fiber posts from endodontically treated teeth. *Am J Dent* 13:19B-21B.
- Dietschi D, Spreafico R (1998). Current clinical concepts for adhesive cementation of tooth-colored posterior restorations. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 10:47-54; quiz 56.
- Doerfer CE, Staehle HJ, Wurst MW, Duschner H, Pioch T (2000). The nanoleakage phenomenon: influence of different dentin bonding agents, thermocycling and etching time. *Eur J Oral Sci* 108:346-351.
- Drummond JL (2000). In vitro evaluation of endodontic posts. *Am J Dent* 13:5B-8B.
- Edelhoff D, Heidemann D, Kern M, Weigl P (2003). Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK, der DGZPW und der DGZ. Aufbau endodontisch behandelter Zähne. *Zahnärztl. Mitt.* 93:42-44.
- Edelhoff D, Weber M, Spiekermann H, Marx R (2006). PVD Beschichtung für verbesserte Retention glasfaserverstärkter Stifte. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 116:992-999.
- Estrela C, Estrela CR, Decurcio DA, Hollanda AC, Silva JA (2007). Antimicrobial efficacy of ozonated water, gaseous ozone, sodium hypochlorite and chlorhexidine in infected human root canals. *Int Endod J* 40:85-93.
- Faria e Silva AL, Casselli DS, Ambrosano GM, Martins LR (2007). Effect of the adhesive application mode and fiber post translucency on the push-out bond strength to dentin. *J Endod* 33:1078-1081.
- Feilzer AJ, de Gee AJ, Davidson CL (1993). Setting stresses in composites for two different curing modes. *Dent Mater* 9:2-5.
- Ferrari M, Vichi A, Garcia-Godoy F (2000a). Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. *Am J Dent* 13:15B-18B.
- Ferrari M, Vichi A, Mannocci F, Mason PN (2000b). Retrospective study of the clinical performance of fiber posts. *Am J Dent* 13:9B-13B.
- Ferrari M, Vichi A, Grandini S (2001). Efficacy of different adhesive techniques on bonding to root canal walls: an SEM investigation. *Dent Mater* 17:422-429.
- Ferrari M, Mason PN, Goracci C, Pashley DH, Tay FR (2004). Collagen degradation in endodontically treated teeth after clinical function. *J Dent Res* 83:414-419.
- Ferrari M, Cagidiaco MC, Grandini S, De Sanctis M, Goracci C (2007). Post placement affects survival of endodontically treated premolars. *J Dent Res* 86:729-734.
- Glazer B (2000). Restoration of endodontically treated teeth with carbon fibre posts - a prospective study. *J Can Dent Assoc* 66:613-618.
- Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, Tay F, Ferrari M (2004). The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci* 112:353-361.

- Goracci C, Fabianelli A, Sadek FT, Papacchini F, Tay FR, Ferrari M (2005a). The contribution of friction to the dislocation resistance of bonded fiber posts. *J Endod* 31:608-612.
- Goracci C, Raffaelli O, Monticelli F, Balleri B, Bertelli E, Ferrari M (2005b). The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization. *Dent Mater* 21:437-444.
- Goracci C, Sadek FT, Fabianelli A, Tay FR, Ferrari M (2005c). Evaluation of the adhesion of fiber posts to intraradicular dentin. *Oper Dent* 30:627-635.
- Goracci C, Corciolani G, Vichi A, Ferrari M (2008). Light-transmitting ability of marketed fiber posts. *J Dent Res* 87:1122-1126.
- Grandini S, Goracci C, Tay FR, Grandini R, Ferrari M (2005). Clinical evaluation of the use of fiber posts and direct resin restorations for endodontically treated teeth. *Int J Prosthodont* 18:399-404.
- Griffiths BM, Watson TF (1995). Resin-dentin interface of Scotchbond Multi-Purpose dentin adhesive. *Am J Dent* 8:212-216.
- Gurgan S, Kiremitci A, Cakir FY, Yazici E, Gorucu J, Gutknecht N (2009). Shear bond strength of composite bonded to erbium:yttrium-aluminum-garnet laser-prepared dentin. *Lasers Med Sci* 24:117-122.
- Hems RS, Gulabivala K, Ng YL, Ready D, Spratt DA (2005). An in vitro evaluation of the ability of ozone to kill a strain of *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J* 38:22-29.
- Huth KC, Quirling M, Maier S, Kamereck K, Alkhayer M, Paschos E, Welsch U, Miethke T, Brand K, Hickel R (2009). Effectiveness of ozone against endodontopathogenic microorganisms in a root canal biofilm model. *Int Endod J* 42:3-13.
- Kim JG, Yousef AE, Dave S (1999). Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. *J Food Prot* 62:1071-1087.
- Kimura Y, Wilder-Smith P, Matsumoto K (2000). Lasers in endodontics: a review. *Int Endod J* 33:173-185.
- Krastl G, Zitzmann NU, Weiger R (2008). Adhäsivaufbau bei wurzelkanalgefüllten Zähnen. *Zahnmedizin up2date* 4:323-346.
- KZBV (2008). Jahrbuch 2008 - Statistische Basisdaten zur Vertragszahnärztlichen Versorgung. Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung. Köln.
- Lang H, Korkmaz Y, Schneider K, Raab WH (2006). Impact of endodontic treatments on the rigidity of the root. *J Dent Res* 85:364-368.
- Lassila LV, Nohrstrom T, Vallittu PK (2002). The influence of short-term water storage on the flexural properties of unidirectional glass fiber-reinforced composites. *Biomaterials* 23:2221-2229.
- Lassila LV, Tanner J, Le Bell AM, Narva K, Vallittu PK (2004). Flexural properties of fiber reinforced root canal posts. *Dent Mater* 20:29-36.
- Law A, Messer H (2004). An evidence-based analysis of the antibacterial effectiveness of intracanal medicaments. *J Endod* 30:689-694.
- Malferrari S, Monaco C, Scotti R (2003). Clinical evaluation of teeth restored with quartz fiber-reinforced epoxy resin posts. *Int J Prosthodont* 16:39-44.

- Mannocci F, Sherriff M, Watson TF, Vallittu PK (2005). Penetration of bonding resins into fibre-reinforced composite posts: a confocal microscopic study. *Int Endod J* 38:46-51.
- Matinlinna JP, Lassila LV, Ozcan M, Yli-Urpo A, Vallittu PK (2004). An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. *Int J Prosthodont* 17:155-164.
- McComb D, Smith DC (1975). A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *J Endod* 1:238-242.
- Mehl A, Folwaczny M, Haffner C, Hickel R (1999). Bactericidal effects of 2.94 microns Er:YAG-laser radiation in dental root canals. *J Endod* 25:490-493.
- Meyer MR, Friedman RJ, Del Schutte H, Jr., Latour RA, Jr. (1994). Long-term durability of the interface in FRP composites after exposure to simulated physiologic saline environments. *J Biomed Mater Res* 28:1221-1231.
- Mjör IA, Smith MR, Ferrari M, Mannocci F (2001). The structure of dentine in the apical region of human teeth. *Int Endod J* 34:346-353.
- Moher D, Schulz KF, Altman DG (2001). The CONSORT statement: revised recommendations for improving the quality of reports of parallel-group randomised trials. *Lancet* 357:1191-1194.
- Mondelli J, Steagall L, Ishikiriama A, de Lima Navarro MF, Soares FB (1980). Fracture strength of human teeth with cavity preparations. *J Prosthet Dent* 43:419-422.
- Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Sadek FT, Goracci C, Ferrari M (2006). A simple etching technique for improving the retention of fiber posts to resin composites. *J Endod* 32:44-47.
- Monticelli F, Ferrari M, Toledano M (2008a). Cement system and surface treatment selection for fiber post luting. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 13:E214-221.
- Monticelli F, Osorio R, Sadek FT, Radovic I, Toledano M, Ferrari M (2008b). Surface treatments for improving bond strength to prefabricated fiber posts: a literature review. *Oper Dent* 33:346-355.
- Morgano SM, Hashem AF, Fotoohi K, Rose L (1994). A nationwide survey of contemporary philosophies and techniques of restoring endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* 72:259-267.
- Naumann M, Blankenstein F, Lange K-P (2002). Vorschlag zur Standardisierung von in-vitro-Belastbarkeitsuntersuchungen an endodontisch behandelten Zähnen. *Dtsch Zahnärztl Z* 57:554-557.
- Naumann M, Blankenstein F, Dietrich T (2005a). Survival of glass fibre reinforced composite post restorations after 2 years-an observational clinical study. *J Dent* 33:305-312.
- Naumann M, Blankenstein F, Kiessling S, Dietrich T (2005b). Risk factors for failure of glass fiber-reinforced composite post restorations: a prospective observational clinical study. *Eur J Oral Sci* 113:519-524.
- Naumann M, Blankenstein F, Barthel CR (2006a). A new approach to define defect extensions of endodontically treated teeth: inter- and intra-examiner reliability. *J Oral Rehabil* 33:52-58.
- Naumann M, Kiessling S, Seemann R (2006b). Treatment concepts for restoration of endodontically treated teeth: A nationwide survey of dentists in Germany. *J Prosthet Dent* 96:332-338.
- Naumann M, Preuss A, Frankenberger R (2007a). Reinforcement effect of adhesively luted fiber reinforced composite versus titanium posts. *Dent Mater* 23:138-144.

- Naumann M, Sterzenbach G, Alexandra F, Dietrich T (2007b). Randomized controlled clinical pilot trial of titanium vs. glass fiber prefabricated posts: preliminary results after up to 3 years. *Int J Prosthodont* 20:499-503.
- Naumann M, Reich S, Nothdurft FP, Beuer F, Schirrmeyer JF, Dietrich T (2008a). Survival of glass fiber post restorations over 5 years. *Am J Dent* 21:267-272.
- Naumann M, Sterzenbach G, Rosentritt M, Beuer F, Frankenberger R (2008b). Is adhesive cementation of endodontic posts necessary? *J Endod* 34:1006-1010.
- Naumann M (2009). Adhäsive postendodontische Rekonstruktion mit Glasfaserstiften - was gibt es zu beachten? *Quintessenz* 60:809-820.
- Noetzel J, Nonhoff J, Bitter K, Wagner J, Neumann K, Kielbassa AM (2009). Efficacy of calcium hydroxide, Er:YAG laser or gaseous ozone against *Enterococcus faecalis* in root canals. *Am J Dent* 22:14-18.
- O'Keefe KL, Miller BH, Powers JM (2000). In vitro tensile bond strength of adhesive cements to new post materials. *Int J Prosthodont* 13:47-51.
- Ottl P, Lauer HC (1998). Success rates for two different types of post-and-cores. *J Oral Rehabil* 25:752-758.
- Papa J, Cain C, Messer HH (1994). Moisture content of vital vs endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol* 10:91-93.
- Pearce EI, Nelson DG (1989). Microstructural features of carious human enamel imaged with back-scattered electrons. *J Dent Res* 68:113-118.
- Peciuliene V, Balciuniene I, Eriksen HM, Haapasalo M (2000). Isolation of *Enterococcus faecalis* in previously root-filled canals in a Lithuanian population. *J Endod* 26:593-595.
- Pegoretti A, Fambri L, Zappini G, Bianchetti M (2002). Finite element analysis of a glass fibre reinforced composite endodontic post. *Biomaterials* 23:2667-2682.
- Perdigao J, Gomes G, Lee IK (2006). The effect of silane on the bond strengths of fiber posts. *Dent Mater* 22:752-758.
- Perdigao J, Gomes G, Augusto V (2007). The effect of dowel space on the bond strengths of fiber posts. *J Prosthodont* 16:154-164.
- Peters LB, Wesselink PR, Buijs JF, van Winkelhoff AJ (2001). Viable bacteria in root dentinal tubules of teeth with apical periodontitis. *J Endod* 27:76-81.
- Pioch T, Stotz S, Staehle HJ, Duschner H (1997). Applications of confocal laser scanning microscopy to dental bonding. *Adv Dent Res* 11:453-461.
- Pirani C, Chersoni S, Foschi F, Piana G, Loushine RJ, Tay FR, Prati C (2005). Does hybridization of intraradicular dentin really improve fiber post retention in endodontically treated teeth? *J Endod* 31:891-894.
- Radovic I, Monticelli F, Cury AH, Bertelli E, Vulicevic ZR, Ferrari M (2008). Coupling of composite resin cements to quartz fiber posts: a comparison of industrial and chairside treatments of the post surface. *J Adhes Dent* 10:57-66.

- Randow K, Glantz PO (1986). On cantilever loading of vital and non-vital teeth. An experimental clinical study. *Acta Odontol Scand* 44:271-277.
- Reeh ES, Messer HH, Douglas WH (1989). Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod* 15:512-516.
- Roberts HW, Leonard DL, Vandewalle KS, Cohen ME, Charlton DG (2004). The effect of a translucent post on resin composite depth of cure. *Dent Mater* 20:617-622.
- Rosentritt M, Sikora M, Behr M, Handel G (2004). In vitro fracture resistance and marginal adaptation of metallic and tooth-coloured post systems. *J Oral Rehabil* 31:675-681.
- Sadek FT, Goracci C, Monticelli F, Grandini S, Cury AH, Tay F, Ferrari M (2006). Immediate and 24-hour evaluation of the interfacial strengths of fiber posts. *J Endod* 32:1174-1177.
- Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K (2003). Bond strength of resin cement to dentin and to surface-treated posts of titanium alloy, glass fiber, and zirconia. *J Adhes Dent* 5:153-162.
- Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K (2004a). Effect of surface treatment of prefabricated posts on bonding of resin cement. *Oper Dent* 29:60-68.
- Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K (2004b). Retention and failure morphology of prefabricated posts. *Int J Prosthodont* 17:307-312.
- Salameh Z, Sorrentino R, Papacchini F, Ounsi HF, Tashkandi E, Goracci C, Ferrari M (2006). Fracture resistance and failure patterns of endodontically treated mandibular molars restored using resin composite with or without translucent glass fiber posts. *J Endod* 32:752-755.
- Salameh Z, Sorrentino R, Ounsi HF, Goracci C, Tashkandi E, Tay FR, Ferrari M (2007). Effect of different all-ceramic crown system on fracture resistance and failure pattern of endodontically treated maxillary premolars restored with and without glass fiber posts. *J Endod* 33:848-851.
- Saunders W, Saunders E (1994). Coronal leakage as a cause of failure in root canal therapy: a review. *Endod Dent Traumatol* 10:105-108.
- Schmidlin PR, Zimmermann J, Bindl A (2005). Effect of ozone on enamel and dentin bond strength. *J Adhes Dent* 7:29-32.
- Schmitter M, Rammelsberg P, Gabbert O, Ohlmann B (2007). Influence of clinical baseline findings on the survival of 2 post systems: A randomized clinical trial. *Int J Prosthodont* 20:1173-1178.
- Schwartz RS, Robbins JW (2004). Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review. *J Endod* 30:289-301.
- Sedgley CM, Messer HH (1992). Are endodontically treated teeth more brittle? *J Endod* 18:332-335.
- Seefeld F, Wenz HJ, Ludwig K, Kern M (2007). Resistance to fracture and structural characteristics of different fiber reinforced post systems. *Dent Mater* 23:265-271.
- Serafino C, Gallina G, Cumbo E, Ferrari M (2004). 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* 97:381-387.
- Sidhu SK, Watson TF (1998). Interfacial characteristics of resin-modified glass-ionomer materials: a study on fluid permeability using confocal fluorescence microscopy. *J Dent Res* 77:1749-1759.

- Soares CJ, Santana FR, Castro CG, Santos-Filho PC, Soares PV, Qian F, Armstrong SR (2008). Finite element analysis and bond strength of a glass post to intraradicular dentin: comparison between microtensile and push-out tests. *Dent Mater* 24:1405-1411.
- Sorensen JA, Martinoff JT (1984). Intracoronal reinforcement and coronal coverage: a study of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* 51:780-784.
- Sorensen JA, Engelman MJ (1990). Effect of post adaptation on fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* 64:419-424.
- Spencer P, Wang Y, Walker MP, Wieliczka DM, Swafford JR (2000). Interfacial chemistry of the dentin/adhesive bond. *J Dent Res* 79:1458-1463.
- Stabholz A, Kettering J, Neev J, Torabinejad M (1993). Effects of the XeCl excimer laser on *Streptococcus mutans*. *J Endod* 19:232-235.
- Stankiewicz NR, Wilson PR (2002). The ferrule effect: a literature review. *Int Endod J* 35:575-581.
- Tay FR, Sano H, Carvalho R, Pashley EL, Pashley DH (2000). An ultrastructural study of the influence of acidity of self-etching primers and smear layer thickness on bonding to intact dentin. *J Adhes Dent* 2:83-98.
- Tay FR, Loushine RJ, Lambrechts P, Weller RN, Pashley DH (2005). Geometric factors affecting dentin bonding in root canals: a theoretical modeling approach. *J Endod* 31:584-589.
- Tay FR, Pashley DH (2007). Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod* 33:391-398.
- Tjaderhane L, Hietala EL, Larmas M (1995). Mineral element analysis of carious and sound rat dentin by electron probe microanalyzer combined with back-scattered electron image. *J Dent Res* 74:1770-1774.
- Torbjörner A, Fransson B (2004). A literature review on the prosthetic treatment of structurally compromised teeth. *Int J Prosthodont* 17:369-376.
- Valandro LF, Yoshiga S, de Melo RM, Galhano GA, Mallmann A, Marinho CP, Bottino MA (2006). Microtensile bond strength between a quartz fiber post and a resin cement: effect of post surface conditioning. *J Adhes Dent* 8:105-111.
- Vallittu PK (2000). Effect of 180-week water storage on the flexural properties of E-glass and silica fiber acrylic resin composite. *Int J Prosthodont* 13:334-339.
- Van Meerbeek B, Vargas M, Inoue S, Yoshida Y, Perdigao J, Lambrechts P, Vanherle G (2000). Microscopy investigations. Techniques, results, limitations. *Am J Dent* 13:3D-18D
- Van Nieuwenhuysen JP, D'Hoore W, Carvalho J, Qvist V (2003). Long-term evaluation of extensive restorations in permanent teeth. *J Dent* 31:395-405.
- Vano M, Goracci C, Monticelli F, Tognini F, Gabriele M, Tay FR, Ferrari M (2006). 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* 39:31-39.
- Visuri SR, Gilbert JL, Wright DD, Wigdor HA, Walsh JT, Jr. (1996). Shear strength of composite bonded to Er:YAG laser-prepared dentin. *J Dent Res* 75:599-605.

- Watson TF (1991). Applications of confocal scanning optical microscopy to dentistry. *Br Dent J* 171:287-291.
- Watson TF (1997). Fact and artefact in confocal microscopy. *Adv Dent Res* 11:433-440.
- Watzke R, Blunck U, Frankenberger R, Naumann M (2008). Interface homogeneity of adhesively luted glass fiber posts. *Dent Mater* 24:1512-1517.
- Wrbas KT, Altenburger MJ, Schirrmeister JF, Bitter K, Kielbassa AM (2007a). Effect of adhesive resin cements and post surface silanization on the bond strengths of adhesively inserted fiber posts. *J Endod* 33:840-843.
- Wrbas KT, Schirrmeister JF, Altenburger MJ, Agrafioti A, Hellwig E (2007b). Bond strength between fibre posts and composite resin cores: effect of post surface silanization. *Int Endod J* 40:538-543.
- Yamayoshi T, Tatsumi N (1993). Microbicidal effects of ozone solution on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Drugs Exp Clin Res* 19:59-64.
- Yiu CK, Tay FR, King NM, Pashley DH, Sidhu SK, Neo JC, Toledano M, Wong SL (2004). Interaction of glass-ionomer cements with moist dentin. *J Dent Res* 83:283-289.
- Zicari F, Couthino E, De Munck J, Poitevin A, Scotti R, Naert I, Van Meerbeek B (2008). Bonding effectiveness and sealing ability of fiber-post bonding. *Dent Mater* 24:967-977.

9. DANKSAGUNG

Mein großer Dank gilt Herrn Professor Dr. Andrej Kielbassa, Leiter der Abteilung Zahnerhaltungskunde und Parodontologie, der die Erstellung der Habilitation durch seine langjährige Unterstützung und Förderung sowie sein motivierendes Engagement ermöglicht hat.

Ferner möchte ich mich sehr bei Dr. Sebastian Paris bedanken, der mich immer unkompliziert und mit neuen Ideen bei meiner Arbeit unterstützt hat. Auch möchte ich meinem langjährigen Kollegen PD Dr. Hendrik Meyer-Lückel danken, der mir stets motivierend und mit fachlichem Rat zur Seite stand. Weiterhin danke ich meinen Kolleginnen Dr. Svenja Rogge und Dr. Juliane Vaudt für die kollegiale und entspannte Zusammenarbeit im Büro.

Gleichzeitig bedanke ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. Konrad Neumann für die gute Zusammenarbeit und statistische Beratung sehr herzlich.

Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinen Doktoranden, hier ganz besonders bei Cindy Pfuertner und Dr. Karsten Priehn, sowie bei meinen Koautoren, hier möchte ich Dr. Jörn Noetzel besonders hervorheben, der die Durchführung und Publikation einiger der hier beschriebenen Arbeiten sehr unterstützt hat.

Besonders danke ich meinem Mann Bernhard und meinem Sohn Anton sowie meiner Familie und meinen Freunden für die Geduld und den Rückhalt bei dem Erstellen dieser Arbeit.

10. EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG NACH § 4 ABS. 3 (K) DER HABOMED DER CHARITÉ

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

18.1.2010

Datum



Unterschrift