

Aus dem  
CharitéCentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Institut für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Florian Beuer, MME

## HABILITATIONSSCHRIFT

### **Die post-endodontische Rekonstruktion als sekundärer Monoblock bei ausgeprägtem Zahnhartsubstanzenverlust**

zur Erlangung der Lehrbefähigung für das Fach

Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. dent. Guido Sterzenbach

Eingereicht: März 2016  
Dekan: Prof. Dr. med. Axel R. Pries  
1. Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Heiner Weber  
2. Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Ralph Luthardt

meiner Familie  
und meinen Freunden

## INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungen	4
<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>5</b>
1.1. PROBLEMATIK DER POSTENDODONTISCHEN REKONSTRUKTION	5
1.2. RESTAURATIONSKONZEPTE IN ABHÄNGIGKEIT DES ZAHNHARTSUBSTANZVERLUSTES	6
1.3. KONZEPT DES MONOBLOCKS IN DER POST-ENDODONTISCHEN REKONSTRUKTION	8
1.4. PROBLEMATIK UND STRATEGIEN DES HAFTVERBUNDES ZUM WURZELKANALDENTIN	13
1.5. SELBSTHAFTENDE BEFESTIGUNGSKOMPOSITE	16
<b>2. FRAGESTELLUNGEN</b>	<b>20</b>
<b>3. EIGENE ARBEITEN</b>	<b>21</b>
3.1. EINFLUSS DER AUFBAUKOMPONENTEN AUF DIE GESAMTBELASTBARKEIT	21
3.2. VERGLEICHENDE ANALYSE DER ADHÄSIONSTRATEGIEN IM WURZELKANAL	24
3.3. KLINISCHE EVALUATION ZUM EINFLUSS DES STIFTMATERIALS	25
3.4. SPÜLPROTOKOLLE ZUR FÖRDERUNG DES INTRARADIKULÄREN HAFTVERBUNDES	27
3.5. EIGNUNG DES SAR-KOMPOSIT ALS POST-AND-CORE MATERIAL	30
<b>4. DISKUSSION</b>	<b>66</b>
<b>5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b>	<b>78</b>
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>80</b>
<b>7. LITERATURNACHWEISE</b>	<b>85</b>
<b>8. VOTUM DER ETHIKKOMMISSION</b>	<b>96</b>
<b>9. DANKSAGUNGEN</b>	<b>97</b>

## Abkürzungen

EBZ	endodontisch behandelter Zahn
E-Modul	Elastizitätsmodul
C-Faktor	Verhältnis zwischen der Kontaktfläche zur Kavitätenwand und der freien Oberfläche des Füllungsmaterials bzw. gebundene zu ungebundener Kompositoberfläche (eng.: configuration factor)
E&R	Dentinkonditionierung durch Säureätzung (eng.: etch-and-rinse)
SE	Dentinkonditionierung durch saure Monomere (eng.: self-etch)
SAR	Komposite ohne separate Dentinkonditionierung (eng.: self-adhesive resin)
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
Vol.-%	Volumenprozent
MMP	Matrix-Metalloproteasen
FEM Analyse	Finite Element Analyse
FRC-Stift	faserverstärkter Aufbaustift (eng.: fiber-reinforced composite)
TCML	thermomechanische Wechsellast (eng.: thermal cycling and mechanical loading)
CHX	Chlorhexidindigluconat

Grafikdesign: Benjamin Sterzenbach

# 1. EINLEITUNG

## 1.1. Problematik der postendodontischen Rekonstruktion

Die Komplikationsrate endodontisch behandelter Zähne (EBZ) ist im Vergleich zu vitalen Zähnen deutlich erhöht und hat oftmals den Zahnverlust zur Folge (Heydecke & Peters 2002; Pjetursson Tan et al. 2004; Tan Pjetursson et al. 2004; Adolphi Zehnder et al. 2007; Dittmann & Rammelsberg 2008; Di Febo Bedendo et al. 2015). Zahlreiche Faktoren beeinflussen die Prognose der EBZ. Der Erfolg steigt signifikant, wenn präoperativ keine radiologische Transluzenz vorhanden ist, bei homogener, blasenfreier Wurzelfüllung (WF), wenn die WF bis 2 mm an den radiologisch ermittelten Apex reicht und der Zahn mit einer qualitativ hochwertigen koronalen Restauration versorgt ist (Ng Mann et al. 2008). Während die Heilung der periapikalen Gewebe und damit der initiale Erfolg von der Qualität der mechanischen und chemischen Wurzelkanalreinigung und Obliteration des Endodonts durch eine adäquate Wurzelfüllung bestimmt wird, ist der Langzeiterfolg maßgeblich von der Art und Qualität der koronalen, postendodontischen Restauration abhängig (Ray & Trope 1995; Hommez Coppens et al. 2002; Gillen Looney et al. 2011).

Der einflussreichste zahnbezogene Parameter für die Erfolgswahrscheinlichkeiten postendodontischer Restaurationen ist das Ausmaß der koronalen, residualen Zahnhartsubstanz (Naumann Blankenstein et al. 2006; Bitter Noetzel et al. 2009; Tang Wu et al. 2010; Ferrari Vichi et al. 2012; Naumann Koelpin et al. 2012; Krishan Paque et al. 2014). Mit zunehmendem koronalen Zahnhartsubstanzverlust steigt das Misserfolgsrisiko. Sind umfangreiche restaurative Maßnahmen zum Aufbau verlorener Zahnhartsubstanz notwendig, ist die Versagensrate von EBZ im Vergleich zu vitalen Zähne um das Dreifache erhöht (Van Nieuwenhuysen D'Hoore et al. 2003). Insbesondere das Risiko für Frakturen ist deutlich höher (Tang Wu et al. 2010). Als wesentlicher Grund wird der Verlust des koronalen und radikulären Dentins angesehen (Asundi & Kishen 2001; Schwartz Robbins et al. 2004; Tang Wu et al. 2010). Bereits durch den geringen Substanzverlust infolge der endodontischen Kanalaufbereitung ist in Abhängigkeit vom Zahntyp und der Wurzelkanalkonfiguration das Frakturrisiko erhöht (Lertchirakarn Palamara et al. 2003; Wu van der Sluis et al. 2004) und es können klinisch relevante Wurzeldeformationen schon bei kleinen physiologischen Belastungen provoziert werden (Lang Korkmaz et al. 2006). Größere Kavitationen, die den Verlust der Rand-

leisten zur Folge haben, reduzieren die relative Steifigkeit des EBZ um bis zu 63 % (Reeh Messer et al. 1989). Vor diesem Hintergrund stellt die koronale postendodontische Rekonstruktion eine besondere Herausforderung dar und hat bedeutsamen Einfluss auf den Erhalt dentaler Strukturen.

## **1.2. Restaurationskonzepte in Abhängigkeit des Zahnhartsubstanzverlustes**

Die wesentlichen Ziele der postendodontischen Restauration sind die langfristige bakteriendichte Versiegelung des Endodonts, die Frakturprophylaxe durch höckerstabilisierende und substanzschonende, d.h. Zahnhartsubstanz erhaltende Maßnahmen und die kaufunktionelle und ästhetische Rekonstruktion. In diesem Zusammenhang hat die Entwicklung adhäsiver Restaurationskonzepte die Versorgung endodontisch behandelter Zähne auf bedeutsame Weise verändert (Schwartz & Fransman 2005).

Die Wahl der geeigneten Restaurationsart wird vorrangig vom initialen koronalen Zerstörungsgrad beeinflusst (Naumann & Lange 2003; Kolpin Sterzenbach et al. 2014; Aurelio Fraga et al. 2015). Konservierende direkte, adhäsive Restaurationen sind bei geringem Zerstörungsgrad indiziert, wenn mehr als 50 % der koronalen Zahnhartsubstanz erhalten ist (Juloski Fadda et al. 2014). Obwohl insbesondere im Seitenzahnbereich die Stabilisierung der EBZ durch die vollständige Umfassung der Höckerspitzen als bedeutsamer prognosebestimmender Faktor gewertet wird (Schwartz Robbins et al. 2004), ist nach systematischer Literaturanalyse kein evidenzbasierter Vorteil der indirekten Restaurationen gegenüber der direkten adhäsiven Versorgung zu benennen (Fedorowicz Carter et al. 2012; Sequeira-Byron Fedorowicz et al. 2015).

Bei ausgeprägtem koronalen Substanzverlust, d.h. zwei oder weniger erhaltenen Kavitätenwänden bzw. weniger als 50 % residuale koronale Zahnhartsubstanz, sind endodontisch behandelte Zähne als „stark zerstört“ einzustufen. Die Rekonstruktion mit indirekten Restaurationen als Teilkronen oder Kronenversorgung ist indiziert, während die Füllungstherapie aufgrund der höheren kaufunktionellen Belastung als Alternativtherapie einzustufen ist (Adolphi Zehnder et al. 2007). Steht für die adhäsive Verankerung des Stumpfaufbaus bei notwendiger Kronenversorgung nicht genügend Dentinfläche zur Verfügung, ist für die zusätzliche Aufbauretention die Insertion von

Aufbaustiften im Wurzelkanal (Synonyme sind: Wurzelkanalstift, Stiftstumpfaufbau oder post-endodontische Restauration) indiziert (Schwartz Robbins et al. 2004). Eine evidenzbasierte Indikation für einen Aufbaustift ist bei ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust mit weniger als zwei residualen Kavitätenwänden gegeben. Für diesen Zerstörungsgrad erhöht die adhäsive Stiftinsertion die maximale Belastbarkeit und die klinischen Erfolgsraten (Naumann Reich et al. 2008; Bitter Noetzel et al. 2009; Mangold & Kern 2011; Signore Kaitsas et al. 2011; Ferrari Vichi et al. 2012; Naumann Koelpin et al. 2012; Zicari Van Meerbeek et al. 2013).

Für Pfeilerzähne mit ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust wird die Steigerung der Belastbarkeit durch die adhäsive Stiftinsertion weiterhin erhöht, wenn mit der Kronenstumpfpräparation ein Ferrule-Design angelegt wird (Sorensen & Engelman 1990; Naumann Preuss et al. 2006; Samran El Bahra et al. 2013; Zicari Van Meerbeek et al. 2013). Das Ferrule-Design beschreibt eine zirkumferente 2 mm hohe Dentinmanschette, die apikal der Grenzfläche vom Aufbaukomposit zum Dentin präpariert wird. Nach der definitiven Befestigung der Kronenrestauration wird die Umfassung der Zahnhartsubstanz als Ferrule-Effekt (eng.: ferrule effect) bezeichnet (Stankiewicz & Wilson 2002; Juloski Radovic et al. 2012). Der Einfluss des Ferrule-Effektes auf die belastungsinduzierte Zugspannung um den Aufbaustift ist bedeutsamer als die Stiftlänge (Dejak & Mlotkowski 2013). Die Länge des adhäsiv befestigten Aufbaustiftes kann auf 7 mm im Wurzelkanal reduziert werden, wenn der Ferrule-Effekt ausgeprägt ist, da sich die Stressverteilung innerhalb der Wurzel mit längeren Aufbaustiften nicht verändert (Santos-Filho Verissimo et al. 2014). Bislang liegen nur wenige klinische Daten vor, die den Ferrule-Effekt belegen (Juloski Radovic et al. 2012). Nach drei Jahren unter Risiko wurde für endodontisch behandelte Frontzähne, die im Sinne des sekundären Monoblock restauriert wurden eine signifikant geringere Versagensrate (6,6 %) im Vergleich zu EBZ ohne Ferrule-Design (26,2 %) ermittelt (Mancebo Jimenez-Castellanos et al. 2010). Metaanalysen belegen ein 2-fach höheres Versagensrisiko bei fehlenden koronalen Kavitätenwänden, der Einfluss des Ferrule-Effekts ist jedoch nicht vollständig aufgeklärt (Yang Lamichhane et al. 2015). Obwohl allgemein der Ferrule-Effekt als einer der bedeutsamsten Prognose bestimmenden Faktoren bewertet wird, ist auf der Basis der vorhandenen Literatur aufgrund der unzureichenden Deskription des initialen Zahnhartsubstanzverlustes und des durch die Stumpfpräparation

angelegten Ferrule-Designs der klinische Einfluss des Ferrule-Effekts nicht vollständig darzustellen.

### **1.3. Konzept des Monoblocks in der post-endodontischen Rekonstruktion**

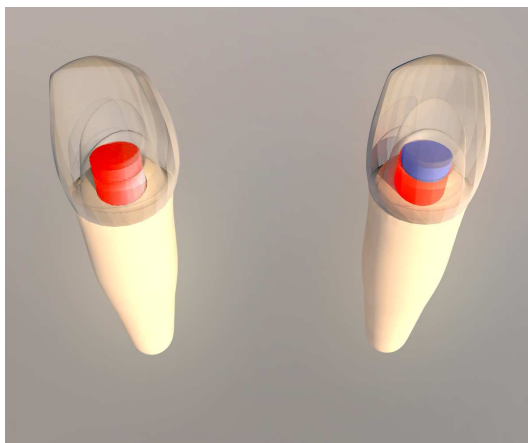
Dentin ist ein mineralisiertes und hydratisiertes Hartgewebe (Kinney Marshall et al. 2003). Der organische Anteil (ca. 30 Vol.-%) besteht hauptsächlich aus Kollagen Typ I als fibröses Polymer. Der anorganische Anteil (ca. 50 Vol.-%) in Form von plättchenförmigen Hydroxylapatit-Kristallen ist in den Kollagenfasern eingelagert und ummantelt als interfibrilläre Zone die Fasern (Kinney Pople et al. 2001). Mit einem Gewichtsanteil von 10 % bildet Wasser eine wesentliche Komponente des Dentins (Marshall 1993; Kishen Ramamurty et al. 2000). Die Hydroxylapatit-Kristalle, das Kollagen als auch Matrixproteine, wie Proteoglykane binden einen Großteil des Wassers, während ungebundenes Wasser die Dentintubuli und andere Porositäten füllt. Die Biomechanischen Eigenschaften ergeben sich aus den Synergieeffekten der einzelnen Substrate unter funktioneller Belastung, weshalb das Dentin als evolutionäres natürliches Komposit betrachtet werden kann. So weist Dentin im Gegensatz zu den mechanischen Eigenschaften seiner einzelnen Substrate eine hohe Festigkeit (Steifheit) und Bruchzähigkeit auf (Kinney Marshall et al. 2003).

Als wesentlicher Faktor für die höhere Frakturanfälligkeit von EBZ wird die Veränderung des E-Moduls in den verschiedenen Wurzelentinregionen angenommen (Kahler Swain et al. 2003), wobei insbesondere der Substanzverlust der weniger mineralisierten, eher flexiblen inneren Dentinareale zu kritischen Belastungsspitzen im Wurzelentin führt (Kishen Ramamurty et al. 2000; Kishen Kumar et al. 2004). Der Wasseranteil kann das viskoelastische, d.h. zeit-, kraftvektor- und frequenzabhängige Verhalten maßgeblich beeinflussen (Jantarat Palamara et al. 2002). In vestibulo-oraler Ausrichtung ist das äußere, intertubuläre Dentin stärker mineralisiert, weniger porös und geringer hydratisiert als das innere Wurzelkanalentin (Kishen Ramamurty et al. 2000; Kruzic Nalla et al. 2003), welches zum Großteil mit der endodontischen Wurzelkanalaufbereitung und Stiftbettkavitation stark reduziert wird. Der Wasseranteil hat neben dem Grad der Mineralisation einen erheblichen Einfluss auf den E-Modul des Dentins und damit auf die Stressverteilung innerhalb der Wurzel (Kruzic Nalla et al. 2003). Die Ausbildung von Spannungsspitzen wird wiederum von



der Steifheit des Aufbaustiftes und des Stumpfaufbaumaterials, dem Vektor der auftreffenden Kraft im Bezug zur Stiftachse und der erhöhten Deformation des residualen Dentins unter Kaulast beeinflusst (Kishen & Asundi 2002).

Das Konzept des Monoblocks begründet sich in der Annahme, dass der EBZ als strukturelle Einheit rekonstruiert wird, wenn eine dauerhafte adhäsive Verbindung der einzelnen Substrate erreicht wird, wobei Materialien (z. B. faserverstärkte Kompositstifte und Befestigungskomposite) mit einem dem Wurzelkandentin ähnlichen mechanischen Eigenschaften (z. B. E-Modul, Schermodul, Biegefestigkeit, viskoelastisches Verhalten) kritische Stresskonzentrationen in den Grenzflächen reduzieren (Tay & Pashley 2007). Die Ausbildung von Spannungsspitzen steigt jedoch mit zunehmender Grenzflächenanzahl (Belli Eraslan et al. 2011), weshalb der endodontische Monoblock in Abhängigkeit der Grenzflächenanzahl zwischen dem Wurzelkanalentin und dem adhäsiven Wurzelfüllmaterial nach Tay und Pashley (2007) als primärer, sekundärer oder tertiärer Monoblock klassifiziert wird. Dieses Modell kann für die post-endodontische Rekonstruktion auf den adhäsiven Stiftstumpfaufbau (Grafik 1) adaptiert werden (Belli Eraslan et al. 2011).



Grafik 1

Schematische Darstellung der Grenzflächen des post-endodontischen Monoblocks, modifiziert nach Tay und Pashley (2007).

Der koronale, transparente Querschnitt zeigt die adhäsive Verankerung im Wurzelkanal für den primären Monoblock mit einer Grenzfläche zum Dentin (rot) und den sekundären Monoblock mit einer zweiten Grenzfläche zum konfektionierten Aufbaustift (rot-blau).

Die adhäsive Verankerung von präfabrizierten Polyethylenfasern, welche mit einem dualhärtenden Komposit imprägniert wurden ist ein Beispiel für den primären post-endodontischen Monoblock mit nur einer Grenzfläche zum Wurzelkanalentin (Karna 1996). Die klinische Evidenz zum Erfolg dieses Aufbaukonzeptes ist jedoch sehr gering und heterogen. Während retrospektive Daten hohe Erfolgsraten aufzeigen konnten (Piovesan Demarco et al. 2007), wurden für prospektiv ermittelte Überlebensraten derart rekonstruierter EBZ im Vergleich zu Quarzfaserstiften bereits

nach 3-jähriger klinischer Verlaufskontrolle signifikant höhere Misserfolgsraten ermittelt (Cagidiaco Garcia-Godoy et al. 2008). Zusätzlich wurden mit glasfaserverstärkten Kompositstiften höhere Belastbarkeiten *in vitro* erreicht (Sirimai Riis et al. 1999; Bae Kim et al. 2001; Newman Yaman et al. 2003), weshalb dieses Restaurationskonzept an klinischer Bedeutung verloren hat (Rasimick Wan et al. 2010).

Der sekundäre Monoblock wird durch zwei Grenzschichten ausgebildet. Dieses Konzept der adhäsiven Restauration EBZ mittels konfektionierter, faserverstärkter Kompositaufbaustifte mit direkt gefertigten plastischen Stumpfaufbauten wird in der Literatur weit verbreitet als Monoblock bezeichnet (Belli Eraslan et al. 2011). Die zwei Grenzschichten bilden sich zwischen dem Wurzeldentin und dem Befestigungsmaterial und wiederum dem Befestigungsmaterial und dem konfektionierten faserverstärkten Aufbaustift aus. Erstmals wurde 1990 der Gebrauch von konfektionierten carbonfaserverstärkten Aufbaustiften beschrieben (Duret Reynaud et al. 1990) und *In-vitro*-Ergebnisse veröffentlicht, die auf ein im Vergleich zu Metallstiften verändertes, klinisch günstigeres Frakturverhalten hinwiesen (King & Setchell 1990). Der metallische Stiftstumpfaufbau war viele Jahrzehnte das Therapiemittel der Wahl und noch 2003 wurde auf der Basis einer deutschlandweiten Umfrage der gegossene metallische Stiftstumpfaufbau als Standardversorgung für die Rekonstruktion endodontisch behandelter Zähne bewertet (Naumann & Lange 2003). Der klinische Einsatz der carbonfaserverstärkten Aufbaustifte wurde erstmals von Dallari und Rovatti beschrieben (Dallari & Rovatti 1996). Basierend auf ihren Beobachtungen formulierten sie die Hypothese, dass die Insertion eines Carbonfaser-verstärkten Aufbaustiftes mit einem dem Dentin ähnlichen E-Modul den EBZ als funktionelle Einheit rekonstruiert und damit das Frakturrisiko vermindert wird. Grundlage dieser Überlegungen war die Annahme, dass metallische Stiftstumpfaufbauten bei kaufunktioneller Belastung aufgrund ihres vielfach höheren E-Moduls Spannungen im Wurzeldentin verursachen, deren klinische Folge die Fraktur der Wurzel ist. Finite Elementanalysen der Grenzschicht zum Wurzelkanaldentin zeigen, dass die Zug- und Scherspannungen bei metallischen Aufbaustiften im Vergleich zu faserverstärkten Aufbaustiften um das 4-fache höher sind (Santos Meira et al. 2010). Dieser frakturprophylaktische und strukturkompatible Ansatz konnte für die carbonfaserverstärkten Aufbaustifte jedoch weder *in vitro* noch *in vivo* bestätigt werden (Purton & Love 1996; Sidoli King et al.

1997; King Setchell et al. 2003). Aufgrund der geringen Haftwerte von Kompositen an den carbonfaserverstärkten Epoxidharzstiften (Purton & Payne 1996) und mechanischen Eigenschaften die weniger dem Dentin ähnlich als vielmehr mit denen metallischer konfektionierter Stiftsystemen vergleichbar waren (Asmussen Peutzfeldt et al. 1999), war die Ausbildung einer funktionellen Einheit im Sinne des sekundären Monoblock nicht möglich. Mit der Entwicklung von silanisierten, unidirektional und longitudinal angeordneten Glas- und Quarzfasern, welche in einer Epoxidharz- oder Methacrylat basierten Stiftmatrix eingebettet wurden, standen Stiftsysteme zur Verfügung, die zumindest theoretisch den Anforderungen eines Materials mit dentinähnlichen Eigenschaften und der adhäsiven Befestigung im Wurzelkanal entsprechen (Chieruzzi Pagano et al. 2012). Im Vergleich zu eher rigiden konfektionierten Metallstiften reduziert der Einsatz von faserverstärkten Aufbaustiften mit Dentin ähnlichem E-Modul *in vitro* das Frakturrisiko der Wurzel (Fokkinga Kreulen et al. 2004). Hingegen zeigen die wenigen klinischen Daten keinen Unterschied in der Inzidenz für Wurzelfrakturen zwischen Metall- und faserverstärkten Aufbaustiften (Figueiredo Martins-Filho et al. 2015). Aufgrund der unzureichenden Studienlage konnte bislang der Einfluss des E-Moduls der Aufbaustifte auf die Erfolgswahrscheinlichkeit der adhäsiven post-endontischen Rekonstruktion nicht beantwortet werden (Bolla Muller-Bolla et al. 2007; Cagidiaco Goracci et al. 2008; Theodosopoulou & Chochlidakis 2009; Rasimick Wan et al. 2010). Wenngleich die zur Verfügung stehenden klinischen Daten einen möglichen Vorteil zugunsten des sekundären Monoblock annehmen lassen (Schmitter Sterzenbach et al. 2013), fehlte bislang der Nachweis für den klinischen Effekt und die Langzeitbewährung eines sekundären Monoblock mit adhäsiv befestigten faserverstärkten Aufbaustiften.

Neben der Polymermatrix und den verwendeten Fasern unterscheiden sich faserverstärkten Kompositstifte unter anderem durch den Faserdurchmesser (von 6 – 18  $\mu\text{m}$ ) und der Faserdichte (von 18 – 36 Fasern pro  $\text{mm}^2$ ), jedoch zeigen diese Materialspezifika keinen direkten Zusammenhang mit der Ermüdungsbelastbarkeit der Stifte (Grandini Goracci et al. 2005). Dennoch besteht eine positive Korrelation zwischen der Belastbarkeit und dem Verhältnis des Faseranteils zur Polymermatrix (Seefeld Wenz et al. 2007). Zusätzlich scheinen die Fabrikat abhängigen mechanischen Parameter, wie Fraktur- und Biegefestigkeit, durch den Herstellungsprozess

beeinflusst zu werden (Zicari Coutinho et al. 2013). Unterschiede ergeben sich durch die Verbundfestigkeit der Fasern zur Polymermatrix, die Vorspannung der Fasern, der Faserausrichtung und Länge und dem Aufkommen von Inhomogenitäten in der Polymermatrix.

Die Möglichkeit der Lichttransmission kann den Umsatz der Doppelbindungen, die Konversionsrate, dualhärtender Befestigungskomposite fördern. Während die materialspezifische Zusammensetzung, der Stiftdurchmesser und die Stiftgeometrie einen signifikanten Einfluss auf die spektrophotometrisch ermittelte Lichtmenge entlang der Stifte hat, konnte in den apikalen Bereichen mit keinem der untersuchten Stifte eine ausreichende Lichtenergie für eine lichtinitiierte Polymerisation erreicht werden (dos Santos Alves Morgan Peixoto et al. 2008; Goracci Corciolani et al. 2008).

Die Verbundfestigkeit in der Komposit-Stift-Grenzfläche wird durch die Oberflächenmorphologie der Stifte und die Möglichkeit der Kopolymerisation, bzw. Diffusion in die Polymermatrix beeinflusst. Verschiedene Methoden, wie die Konditionierung mit Wasserstoffperoxid (Monticelli Toledano et al. 2006), Korundstrahlung, Silikatisierung und Silanierung wurden untersucht, um den Haftverbund zum Befestigungskomposit zu steigern. Während mit der Silanapplikation nur geringe, nicht signifikante Effekte erzielt werden (Perdigao Gomes et al. 2006; Vano Goracci et al. 2006; Wrbas Altenburger et al. 2007), kann mittels Silikatisierung und Silanapplikation in Abhängigkeit der verwendeten Polymermatrix und dem Anteil der an der Oberfläche exponierten Glasfasern die Haftkraft gesteigert werden (Zicari De Munck et al. 2012). Für die industriell vorgefertigte Silanbeschichtung wurde bislang kein positiver Effekt auf die Verbundfestigkeit im Wurzelkanal beschrieben (Mazzitelli Papacchini et al. 2012). Der jeweilige Anteil der mikromechanischen und chemischen Interaktion an der Haftkraft zum Stift kann nicht benannt werden, dennoch scheint der Einfluss der spezifischen Oberflächenrauigkeit und damit die mikromechanische Verankerung bedeutsamer zu sein (Zicari De Munck et al. 2012).

Obwohl im Vergleich zur konventionellen Zementierung für die adhäsive Befestigung faserverstärkter Aufbaustifte signifikant höhere Belastbarkeiten nachzuweisen sind (Naumann Sterzenbach et al. 2008), ist der vorherrschende Grund für den klinischen Misserfolg die Stiftdezementierung (Rasimick Wan et al. 2010; Parisi Valandro et al. 2015). Vorrangig findet das adhäsive Versagen jedoch zwischen der

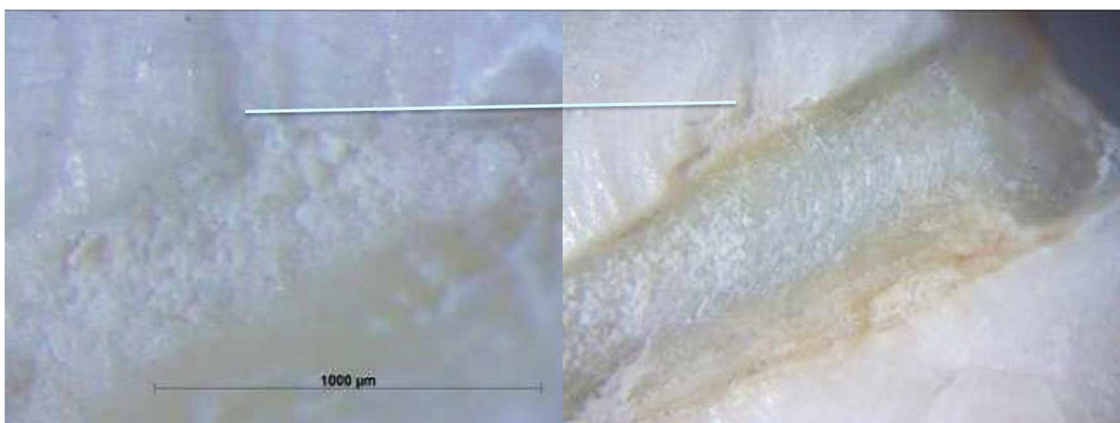
Dentin-Komposit Grenzschicht statt (Radovic Mazzitelli et al. 2008; Zicari Couthino et al. 2008; Bitter Paris et al. 2009; Mazzoni Marchesi et al. 2009). Damit sind die größte Herausforderung und der wahrscheinlich bedeutsamste, den Langzeiterfolg limitierende Faktor für die Ausbildung eines sekundären Monoblocks, der dauerhafte adhäsive Verbund zum Wurzelkanaldentin.

#### **1.4. Problematik und Strategien des Haftverbundes zum Wurzelkanaldentin**

Durch den extrem hohen C-Faktor in der Stiftbettkavität (Tay Loushine et al. 2005) und die unregelmäßige Dentinmorphologie in den einzelnen Wurzelkanalabschnitten (Mjor & Nordahl 1996; Mjor Smith et al. 2001), ist die Ausbildung einer adhäsiven Verbindung im Vergleich zum koronalen Dentin insbesondere im mittleren und apikalen Wurzelkanal besonders erschwert und inhomogen (Malyk Kaaden et al. 2010). Für das apikale Drittel wurden irreguläre Dentinstrukturen, wie Sekundärdentin, Dentikel, wechselnde Tubulorausrichtung und Arealen ohne Dentintubuli beschrieben (Mjor & Nordahl 1996; Mjor Smith et al. 2001; Camargo Siviero et al. 2007). Zusätzlich finden sich Resorptionslakunen die mit der mechanischen Kanalaufbereitung nicht erfasst werden (Bild 1). Zudem bedingt die zahnspezifische Wurzelkanalmorphologie, dass mit rotierenden Instrumente, wie sie für die Präparation der Stiftbettkavität verwendet werden, nicht die vestibuläre und orale Kurvatur ovoider Wurzelkanäle aufbereitet werden kann.

Bild 1

Stereomikroskopische Ansicht eines Wurzelkanallängsschnittes nach der Stiftbettpräparation. Die Linie weist auf eine Kavitation (etwaige Resorptionslakune) mit eingelagertem Debris.



Die morphologisch bedingten Schwierigkeiten werden mit dem stark eingeschränkten Kavitätenzugang potenziert, da insbesondere die Kontrolle des residualen Wassers erschwert ist. Residuales Wasser verursacht die Hydrolyse der organischen Verbindungen und die Plastifizierung der Polymermatrix (Tay Carvalho et al. 2004; De Munck Van Landuyt et al. 2005; Van Landuyt Snauwaert et al. 2007; Breschi Mazzoni et al. 2008). Zusätzlich ist nach der Dentinkonditionierung mit Säuren der Austausch des Wassers durch das Monomer, als auch die Monomerinfiltration in das demineralisierte Dentin unvollständig (Breschi Mazzoni et al. 2008; Pashley Tay et al. 2011). Folglich ist denudiertes Kollagen exponiert, welches nicht mehr mit einer Hydroxylapatitschicht oder Polymerschicht ummantelt ist und durch endogene und exogene Kollagenasen denaturiert werden wird (De Munck Van den Steen et al. 2009; Zhang & Kern 2009). Wenngleich bis heute das komplexe Zusammenspiel von chemischen und mechanischen Alterungsprozesse nicht vollständig aufgeklärt worden ist, scheint die signifikante Reduktion des Haftverbundes nach simulierter zyklischer Ermüdungsbelastung mit den Effekten der hydrolytischen und enzymatischen Degradation, sowie der unvollständigen Monomerinfiltration maßgeblich in Verbindung zu stehen (Breschi Mazzoni et al. 2008; Liu Tjaderhane et al. 2011).

Im Vordergrund der Untersuchungen stehen neben der Hydrolyse der Polymermatrix (De Munck Mine et al. 2012) die proteolytische Degradation des Kollagens durch Endopeptidasen (De Munck Van den Steen et al. 2009; Mazzoni Tjaderhane et al. 2015) und die Entstehung von Mikrospalten durch Ermüdungsprozesse und Stress auf die adhäsive Verbindung (Mair & Padipatvuthikul 2010).

Das Grundprinzip der adhäsiven Verankerung an der Zahnhartsubstanz basiert auf dem Austausch von anorganischen Mineralien des Hydroxylapatits mit Monomeren, welche nach der Polymerisation eine mikromechanische Verankerung ermöglichen (Van Meerbeek De Munck et al. 2003). Dieser Prozess wird im Dentin „Hybridisierung“ genannt und beschreibt die Infiltration und nachfolgende Polymerisation der Monomere und bedingt die Ausbildung von Porositäten in der Substratoberfläche mit hoher Oberflächenenergie (Van Meerbeek Yoshihara et al. 2011). Nach der Präparation der Zahnhartsubstanz mit rotierenden Instrumenten bleibt auf der Oberfläche eine Schmierschicht (smear layer) zurück (Pashley 1984). Die Einteilung der aktuellen Adhäsive berücksichtigt die Art und Weise wie die Schmierschicht behandelt

wird. So können drei grundlegende Strategien formuliert werden (Perdigao 2010). Die Wirkungsweise, bzw. morphologischen Grundsätze werden im Folgenden unter Berücksichtigung des zentralen Themas dieser Abhandlung nur für das Dentin beschrieben:

„Etch-and-rinse“ = E&R-Strategie

Durch den Einsatz von Säuren (meist Phosphorsäure) wird im Sinne einer Vorbehandlung die Schmierschicht entfernt und die Präzipitate (einschließlich der gelösten Hydroxylapatitkristalle) abgespült. Die adhäsive Verankerung im Dentin basiert auf dem Prinzip der Ausbildung von Kunststoffverzäpfungen (resin tags) in den geöffneten Dentintubuli und der Hybridisierung, d.h. der Ausbildung einer Hybridschicht bestehend aus dem demineralisierten Kollagengeflecht des Dentins und infiltrierten, polymerisierten Monomeren (Pashley Tay et al. 2011).

„Self-etch“ (Syn. Selbstätzend) = SE-Monomere

Die Schmierschicht wird ohne separate Säureätzung durch saure Monomere des Adhäsivs aufgelockert und nach der Polymerisation in die Adhäsivschicht eingeschlossen. Die Haftung wird vorrangig über die Ausbildung einer Hybridschicht ermöglicht. Entsprechend ihrem pH-Wert können ultramilde ( $\text{pH} > 2,5$ ) und milde ( $\text{pH} \approx 2$ ) von intermediär starken ( $\text{pH}$  von 1 - 2) und starken ( $\text{pH} < 1$ ) SE- Adhäsiven unterschieden werden (Van Meerbeek Yoshihara et al. 2011).

„Self-adhesive“ (Syn. Selbsthaftend) = SAR (self-adhesive resin)

Diese Produkte werden ohne weitere Vorbehandlung des Dentins eingesetzt und benötigen damit weder eine separate Säureätzung noch den Einsatz zusätzlicher Adhäsive. Morphologisch ist die Grenzschicht zwischen Komposit und Dentin grundsätzlich von den Systemen mit einer Dentinvorbehandlung zu unterscheiden. Im koronalen- und Wurzelkanaldentin wurden keine geöffneten, bzw. infiltrierten Dentintubuli und keine Ausbildung einer Hybridschicht beobachtet (De Munck Vargas et al. 2004; Goracci Sadek et al. 2005; Gerth Dammaschke et al. 2006; Yang Ludwig et al. 2006; Al-Assaf Chakmakchi et al. 2007; Radovic Monticelli et al. 2008; Bitter Paris et al. 2009; Ferracane Stansbury et al. 2011; Bitter Hambarayan et al. 2013). Neben der

mikromechanischen Verankerung beruht der Haftmechanismus auf der Ausbildung einer starken Komplexbildung zum Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) des Hydroxylapatits (Gerth Dammaschke et al. 2006; Ferracane Stansbury et al. 2011). Die Haftwerte im koronalen Dentin sind mit Adhäsivsystemen auf der Basis der etch-and-rinse und der selbststützenden Strategie vergleichbar (De Munck Vargas et al. 2004; Hikita Van Meerbeek et al. 2007). Aufgrund der ungünstigen Voraussetzungen für die Anwendung adhäsiver Materialien im Wurzelkanal scheint diese Materialgruppe mit ihrer vergleichsweise einfachen Anwendung und der möglicherweise geringeren Degradationsproblematik, bedingt durch den spezifischen Haftmechanismus und den für die adhäsive Befestigung im Wurzelkanal günstigen physikalischen Eigenschaften, Vorteile zu bieten. Der Schwerpunkt dieser Abhandlung liegt in der Bewertung zur Ausbildung des sekundären Monoblock mit SAR-Kompositen, weshalb im Folgenden diese Materialklasse ausführlicher dargestellt werden wird.

### **1.5. Selbsthaftende Befestigungskomposite**

Das erste kommerziell erhältliche Produkt dieser neuen Materialklasse wurde 2002 mit der Indikation als selbstadhäsiver, dual-härtender Befestigungszement vorgestellt. Vor dem Hintergrund der bemerkenswerten morphologischen Unterschiede der Grenzschicht zum Dentin, insbesondere der nicht ausgebildeten Hybridschicht und resin tags, wird im Zusammenhang mit dieser Materialgruppe der Begriff der „Selbsthaftung“ verwendet. Des Weiteren wird die werkstoffkundlich wichtige Unterscheidung zu den Zementen vorgenommen. Grundsätzlich werden vergleichbare Säure-Basen Reaktion im Abbindeprozess beschrieben, jedoch ist das ausgehärtete Produkt ein Polymer, weshalb diese Materialien den Kompositen zuzuordnen sind.

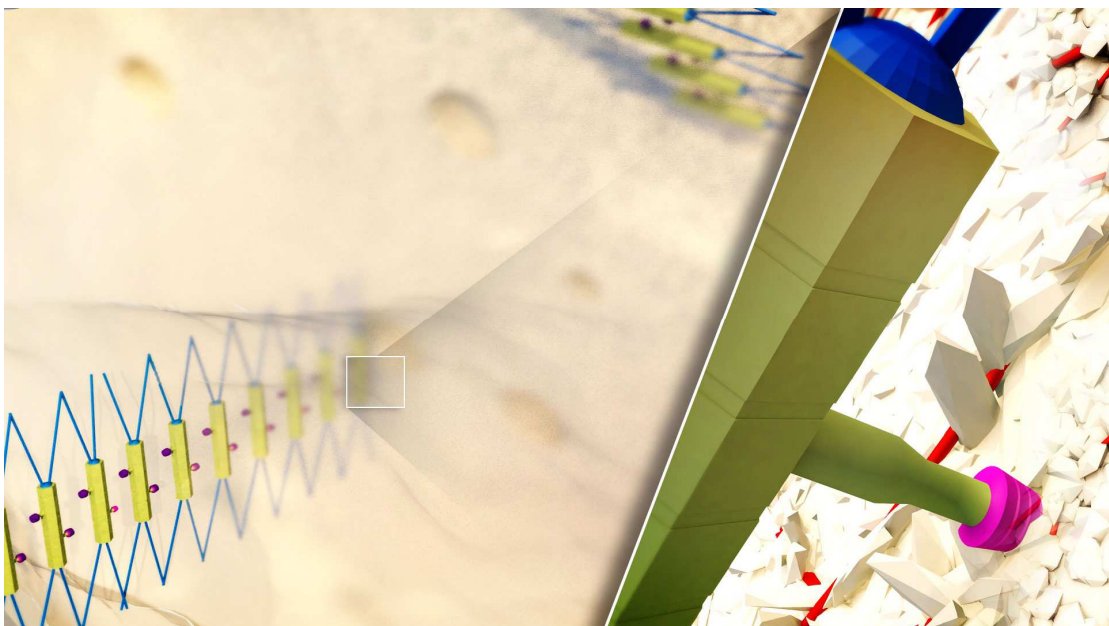
Die adhäsive Verankerung der selbsthaftenden Komposite basiert auf mehrfach säurefunktionalisierten Monomeren, die in ihrer dissoziierten Form eine Konditionierung der Zahnoberfläche (inklusive der Schmierschicht) und damit die Ausbildung einer mikroretentiven Oberfläche ermöglichen sollen. Die Monomere wirken wie ein Haftvermittler indem nahezu wasserunlösliche Salze über die säurefunktionalisierte Gruppe meist auf der Basis von Phosphaten oder Phosphonaten zum Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) des Hydroxylapatits (Tertiäres Calciumphosphat) ausgebildet



werden (Ferracane Stansbury et al. 2011) (Grafik 2). Gleichzeitig wird am anderen Ende des Monomers die Polymerisation über Methacrylatgruppen gestartet. Der grundlegende Aushärtungsmechanismus ist die radikalische Polymerisation der Methacrylatmonomere, welche auf der Basis säurestabiler, autokatalytisch wirkender Initiatoren oder zusätzlich durch Lichtaktivierung initiiert wird (Dualhärtung). Durch die Salzbildungsreaktion mit dem  $\text{Ca}^{2+}$  des Hydroxylapatits entsteht Wasser, welches für den initial hydrophilen Charakter des Materials verantwortlich ist. Das interstitielle Wasser wird mit der Dissoziation der überschüssigen, d.h. nicht mit der Zahnhartsubstanz gebundenen säuremodifizierten Gruppen verbraucht. Diese überschüssigen Säuren werden durch die Reaktion mit freigesetzten Metallionen (basische Füller) im Sinne des Glasionomer-Konzepts abgepuffert. Gleichzeitig können diese Säuren Fluoridionen aus weiteren Füllkörpern freisetzen. Mit der zunehmenden Quervernetzung der Polymere durch z. B. Triethyleneglycol dimethacrylat (TEGDMA) werden silanisierte Füller in die Matrix eingebaut. Der pH-Wert steigt im Zuge der Calciumphosphat-Komplexbildung durch die Neutralisation der überschüssigen Säuregruppen. Das initial saure, hydrophile Material bekommt zunehmend hydrophoben Charakter.

Grafik 2 Modell des adhäsiven Verbundes der SAR-Komposite zum Dentin.

Die Polymerketten (links) durchdringen die Schmierschicht bis zum Dentin. Mit ihren phosphatmodifizierten funktionalen Gruppen gehen die Methacrylatmonomere (rechts) eine Bindung zu den intra- und interfibrillären Calciumhydroxylapatitkristallen (Dicke ca. 2-3 nm) ein, ohne das Kollagen (rot, Mikrofibrillen  $\varnothing$  ca. 1,5 nm) wesentlich zu demineralisieren.



Die Anzahl der ausgebildeten Calciumphosphat-Komplexe ist abhängig von den spezifischen säuremodifizierten Monomere (Yoshida Nagakane et al. 2004; Gerth Dammaschke et al. 2006). Da die sauren Monomere die Hydrophilie des späteren Polymers entscheidend beeinflussen, muss deren Anteil extakt soweit eingestellt werden, dass eine ausreichende Konditionierung der Zahnhartsubstanz erreicht wird aber das polymerisierte Komposit weitestgehend hydrophobe Eigenschaften besitzt. Je hydrophiler das Polymer ist, desto größer ist dessen Wasseraufnahme (Martin Jedynakiewicz et al. 2003). Eine erhöhte Wasseraufnahme vermindert die mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise den E-Modul (Ito Hashimoto et al. 2005) und die Dimensionsstabilität durch hygroskopische Expansion (Ruttermann Alberts et al. 2011). Die Größe der Monomere, d. h. die Länge der aliphatischen Kohlenwasserstoffkette zwischen der säuremodifizierten Gruppe und der Methacrylatgruppe beeinflusst die Viskosität und damit die Benetzbarkeit des Komposits (Van Landuyt Snauwaert et al. 2007). Je kürzer die Kohlenwasserstoffkette ist, desto höher ist die Benetzbarkeit und niedrigvisköser ist das Komposit. Hingegen ist die Hydrolysestabilität der Calciumphosphat-Komplexe mit dem eher langkettigen und daher relativ hydrophoberen Monomer MDP (10-methacryloxydecyl-dihydrogen phosphat) hydrolysestabiler.

Die SAR-Befestigungskomposite zeigen große Unterschiede der mechanischen Eigenschaften und können demnach nicht als homogene Materialgruppe eingestuft werden (Saskalauskaite Tam et al. 2008; Kitzmuller Graf et al. 2011; Ilie & Simon 2012). Die Biegefestigkeit variiert signifikant zwischen 37 und 104 MPa (Saskalauskaite Tam et al. 2008). Der Anteil in Volumen- und Gewichtsprozent an Füllern variiert zwischen 40 - 56,6 Vol.-%, bzw. einem Masseanteil von 62 – 72 % (Ilie & Simon 2012). Dabei beeinflusst der Fülleranteil signifikant die Vickershärte, die prozentuale plastische Verformung unter konstanter Spannung (creep), den E-Modul und die prozentuale elastische Verformung (Ilie & Simon 2012). Für das E-Modul wurden Werte zwischen 3,25 und 12,08 GPa gemessen. Für die Ausprägung einer gleichförmigen Belastungsverteilung und der Reduktion von Spannungsspitzen in der Grenzfläche zum Dentin ist der E-Modul des verwendeten Komposits gleichsam bedeutend, da mit steigendem E-Modul der Van Mises Stress im Wurzeldentin reduziert wird (Soares Raposo et al. 2010; Oyar 2014)

Die Lichtaktivierung hat bei dualhärtenden SAR-Kompositen einen positiven Einfluss auf die mikromechanischen Eigenschaften (Ilie & Simon 2012). Der Umsatz der Doppelbindungen, die Konversionsrate, ist auch bei SAR-Kompositen signifikant höher als ohne Lichtinitiation (Spinell Schedle et al. 2009; Frassetto Navarra et al. 2012).

Mit einem initialen pH-Wert von 2 - 2,5 können die SAR-Komposite den milden bis ultramilden Adhäsiven zugeordnet werden. Um postoperative Sensitivitäten infolge pulpaler Reizung durch den niedrigen pH-Wert und eine prolongierte Ätzzeit zu vermeiden, ist die Zeit vom Anmischen bis zur Neutralisation ein wichtiger Parameter. Zudem besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem steigenden pH-Wert und der Biegefestigkeit. So ist die Reduktion der Biegefestigkeit nach thermozyklischer Belastung geringer, je höher der pH-Wert nach 24 Stunden ausfällt (Zorzin Petschelt et al. 2012). Die Materialien zeigten große Unterschiede, wobei der schnellste pH-Wertanstieg für ein SAR-Komposit nach 15 Minuten (pH-Wert von 7 mit Lichtaktivierung, ohne Lichtinitiation nach 60 Minuten) und der damit höchste pH-Wert nach 24 Stunden gemessen wurde (Saskalauskaite Tam et al. 2008).

Während der Polymerisation findet eine Volumenschrumpfung der Komposite statt, indem sich der Molekülabstand durch die Ausbildung kovalenter Bindungen verkürzt. Für eine langfristig stabile und spaltfreie adhäsive Verbindung zum Dentin ist eine geringe prozentuale Polymerisationsschrumpfung und ein damit einhergehender geringer Polymerisationsstress auf die Grenzfläche erforderlich. Im Vergleich mit konventionellen Befestigungskompositen wurde für SAR-Komposite ein geringerer Polymerisationsstress ermittelt (Frassetto Navarra et al. 2012). Der Schrumpfstress unterscheidet sich jedoch signifikant zwischen verschiedenen SAR-Kompositen (Kitzmüller Graf et al. 2011). Die geringste Schrumpfung (der geringste Schrumpfstress) nach 60 min. wurde für ein SAR-Komposit ohne Lichtinitiation ermittelt (Spinell Schedle et al. 2009; Kitzmüller Graf et al. 2011). Als Erklärung für diese Aushärtungskinetik wurde unter anderem die nur für dieses Material beobachtete initiale Volumenzunahme diskutiert. Zudem unterscheiden sich die verschiedenen SAR-Komposite in ihrer Zusammensetzung unter anderem im Volumenanteil und der Größe der Füllpartikel. Dabei besteht ein linearer Zusammenhang zum Schrumpfstress, da dieser mit steigendem Füllervolumen und Füllergröße sinkt (Atai & Watts 2006; Satterthwaite Vogel et al. 2009).

## 2. FRAGESTELLUNGEN

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Evaluation der post-endodontischen Rekonstruktion als sekundärer Monoblock mit einem SAR-Komposit. Für die Bewertung auf der Basis von In-vitro und In-vivo-Untersuchungen wurden folgende Fragestellungen bearbeitet:

In welchem Ausmaß steigt die Belastbarkeit des sekundären Monoblock durch den Ferrule-Effekt nach vollkeramischer Überkronung und hat die Simulation einer dynamischen Ermüdungsbelastung in Form der thermo-mechanische Wechsellast einen Effekt auf die maximale Belastbarkeit der post-endodontischen Restauration?

Ist die Haftkraft zum Wurzelkanalentin abhängig von der Adäsionsstrategie für die Aufbaustiftinsertion mit Befestigungskompositen auf der Basis von E&R-Adhäsiven, SE-Monomeren oder SAR-Kompositen?

Hat bei ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust der E-Modul des Aufbaustiftes nach adhäsiver Befestigung mit einem SAR-Komposit und ausgebildetem Ferrule-Effekt einen Einfluss auf die klinische Erfolgswahrscheinlichkeit post-endodontischer Rekonstruktionen?

Kann mit spezifischen Spülprotokollen vor der Stiftinsertion der adhäsive Verbund zum Wurzelkanalentin für ein E&R-basiertes und ein SAR-Befestigungskomposit initial und nach thermozyklischer Wechselbelastung und Langzeitlagerung in Wasser positiv beeinflusst werden?

Sind SAR-Komposite als Stumpfaufbaumaterial bei ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust für die adhäsive post-endodontische Rekonstruktion im Sinne des sekundären Monoblock und vollkeramischer Kronenrestauration geeignet?

### 3. EIGENE ARBEITEN

#### 3.1. Einfluss der Aufbaukomponenten auf die Gesamtbelastbarkeit

Sterzenbach G, Rosentritt M, Frankenberger R, Paris S, Naumann M (2012) Loading standardization of postendodontic restorations in vitro: impact of restorative stage, static loading, and dynamic loading. *Operative Dentistry* 37(1), 71-9

Ogleich der Ferrule-Effekt in vitro bereits grundlegend nachgewiesen worden ist (Juloski Radovic et al. 2012), war es bislang ungeklärt in welchem Ausmaß die Gesamtbelastbarkeit im Vergleich zu den einzelnen Restaurationsstadien des Stift-Aufbau-Kronen-Komplexes beeinflusst wird. Zudem ergab eine systematische Literaturanalyse unserer Arbeitsgruppe (Naumann Metzdorf et al. 2009), dass bislang kein standardisierter Versuchsaufbau für die Belastbarkeitsprüfung post-endodontischer Rekonstruktionen zu benennen ist. Demnach war es das Ziel den Einfluss für zwei wesentliche Variablen, das Probenesign hinsichtlich der jeweiligen Restaurationsstadien und die Simulation einer Ermüdungsbelastung, zu quantifizieren.

Obere mittlere menschliche Zähne wurden endodontisch behandelt und dekapitiert. Das untersuchte Probenesign entsprach den Restaurationsphasen: adhäsiv befestigter glasfaserverstärkter Aufbaustift, adhäsiver plastischer Stumpfaufbau und ausgebildeter Ferrule-Effekt nach vollkeramischer Überkronung. Die Probenzähne wurden in einer Universalprüfmaschine bis zum Frakturversagen linear belastet. Die Ermüdungsbelastung wurde in Form der thermomechanischen Alterung (TCML) simuliert. Für die vergleichende Analyse wurde eine weitere Gruppe mit Ferrule-Design und Kronenrestauration vor dem linearen Belastungstest einer TCML ( $1,2 \times 10^6$  Zyklen zwischen 1 und 49 N und simultan 6000 Zyklen thermischer Belastung zwischen 5 und 55 °C) unterzogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximalen Belastbarkeiten (Median [N]) für jeden restaurativen Schritt vom Stadium der Stiftinsertion (73) bis zum Stadium der definitiven Kronenrestauration (331) signifikant ansteigt ( $p < 0,001$ ). Der Ferrule-Effekt steigert die Belastbarkeit des sekundären Monoblock um annähernd 44 %. Die TCML reduziert wiederum signifikant ( $p < 0,005$ ) die Belastbarkeiten für den Vergleich der Gruppen mit ausgebildetem Ferrule-Effekt. Im Rahmen der vergleichenden Bewertung des Frakturverhaltens post-endodontischer Rekonstruktionen sollte das Restaurationsstadium, insbesondere der Ferrule-Effekt, und die Belastungsart, linear oder dynamisch berücksichtigt werden.

Sterzenbach G, Rosentritt M, Frankenberger R, Paris S, Naumann M (2012)  
Loading standardization of postendodontic restorations in vitro: impact of restorative  
stage, static loading, and dynamic loading. *Operative Dentistry* 37(1), 71-9  
<http://dx.doi.org/10.2341/10-355-L>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

Anmerkung:

Der in diesem Artikel abgebildete Zahnschnitt in Grafik 3 stellt beispielhaft ein typisches Frakturmuster für die Untersuchungsgruppe 3 dar und wurde der eigenen Dissertation entnommen.

„Glasfaserverstärkte Kompositstifte zur postendodontischen Rekonstruktion oberer mittlerer Schneidezähne mit Vollkeramikkronen - Eine vergleichende In-vitro-Untersuchung zum Einfluss von Stiftmaterial und Belastungsmethode auf Belastbarkeit und Frakturverhalten“, Guido Sterzenbach, 2007

### 3.2. Vergleichende Analyse der Adhäsionsstrategien im Wurzelkanal

Sterzenbach G, Karajouli G, Naumann M, Peroz I, Bitter K (2012) Fiber post placement with core build-up materials or resin cements-An evaluation of different adhesive approaches. *Acta Odontologica Scandinavica* 70(5), 368-6

Klinische Daten zur adhäsiven Befestigung von Aufbaustifte zeigen, dass neben der endodontischen Reinfektion die Dezementierung der FRC-Stifte das dominierende Versagensmuster ist (Ferrari Cagidiaco et al. 2007; Rasimick Wan et al. 2010; Naumann Koelpin et al. 2012). Demnach war es von Bedeutung einen möglichen Vorteil für die Verwendung von SAR-Kompositen zur Ausbildung des sekundären Monoblocks zu evaluieren. Gegenstand dieser Studie war es die grundsätzlichen Adhäsionsstrategien etch-and-rinse (E&R), vs. selbstätzend (SE) vs. selbsthaftend (SAR) hinsichtlich der initialen Haftwerte des FRC-Stiftes zum Wurzelkanalentin zu vergleichen.

Der sekundäre Monoblock wurde mit humanen oberen Frontzähnen durch die adhäsive Befestigung glasfaserverstärkter Aufbaustifte mit fünf verschiedenen Befestigungskompositen hergestellt. Als E&R-System wurden zwei Befestigungssysteme untersucht, die als sogenannte post-and-core Systeme die Stiftbefestigung und den plastischen Stumpfaufbau in einem Arbeitsschritt ermöglichen. Die weiteren Gruppen wurden durch zwei SAR-Befestigungskomposite und ein Befestigungssystem auf der Basis von SE-Monomeren gebildet. Für die Ermittlung der Haftwerte zum Wurzelkanalentin mit dem Verfahren des Dünnschnitt-Ausstoßversuches (thin-slice push-out test) wurden die Wurzeln in 1 mm dünne Segmentscheiben separiert. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Abhängigkeit der Haftwerte vom Befestigungssystem. Die höchsten Haftwerte (Median [MPa]) wurden mit den SAR-Kompositen (12,4 und 13,5) generiert ( $p < 0.001$ ). Für eines der E&R-basierten Systeme wurden vergleichbar hohe Werte (11,2) ermittelt. Als wesentliches Versagensmuster war der Adhäsionsverlust zum Dentin zu beobachten. Die Ausbildung von Inhomogenitäten in der Kompositengrenzschicht war signifikant vom Befestigungssystem abhängig. Die Ergebnisse lassen für die Ausbildung des sekundären Monoblock Vorteile zu Gunsten der SAR-Komposite erkennen. Gleichzeitig scheint die Adhäsion im Wurzelkanal neben der adhäsiven Strategie auch vom spezifischen Material, respektive dem Adhäsiv-Befestigungskomposit-System abhängig zu sein.



Sterzenbach G, Karajouli G, Naumann M, Peroz I, Bitter K (2012)

Fiber post placement with core build-up materials or resin cements-An evaluation of different adhesive approaches. *Acta Odontologica Scandinavica* 70(5), 368-6

<http://dx.doi.org/10.3109/00016357.2011.603702>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

### 3.3. Klinische Evaluation zum Einfluss des Stiftmaterials

Sterzenbach G, Franke A, Naumann M (2012) Rigid or flexible dentin-like endodontic posts – Clinical evaluation of a biomechanical concept. 7-yr results of a randomized controlled clinical pilot trial on endodontically treated abutment teeth with severe hard tissue loss. *Journal of Endodontics* 38(12), 1557-63

Systematische Übersichtsarbeiten konnte bislang keine verlässlichen klinischen Empfehlung zum geeigneten Stiftmaterial, flexibel oder rigide, ermitteln, da die klinische Evidenz auf der Basis kontrollierter experimenteller Gruppen und fehlender Standardisierung des Studiendesigns, insbesondere für den initialen Zerstörungsgrad der eingeschlossenen Zähne, unzureichend war (Bolla Muller-Bolla et al. 2007; Theodosopoulou & Chochlidakis 2009; Schmitter Sterzenbach et al. 2013). Wir konzipierten eine randomisierte kontrollierte Untersuchung im Parallelgruppendesign, um den Einfluss des E-Moduls adhäsiv befestigter Aufbaustifte (glasfaserverstärktes Komposit (GFRC) vs. Titan) auf die Überlebensraten von EBZ mit ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust zu ermitteln. Die Untersuchung wurde entsprechend des CONSORT Statements durchgeführt und ausgewertet (Schulz Altman et al. 2010).

Die Intervention erfolgte zwischen Januar 2003 und April 2004 für 91 Patienten. Sowohl die GFRC-, als auch die Titanstifte wurden mit einem SAR-Komposit befestigt. In 13 Fällen wurde zur Sicherstellung der biologischen Breite und eines 2 mm Ferrule-Designs eine chirurgische Kronenverlängerung durchgeführt. Der primäre Endpunkt war der vollständige Funktionsverlust der post-endodontischen Restauration. Initial hatten ca. 70 % der inkludierten Zähne maximal eine residuale Kavitätenwand und nahezu 50 % waren Frontzähne. Im Verlauf der Nachuntersuchungen (mittlere Zeit [Monate] 71,17 (min. 12, max. 84)) versagten insgesamt sieben Rekonstruktionen: GFRC= Wurzelfraktur n= 3, Aufbaufaktur n= 1; Titan= endodontischer Misserfolg n= 3). Eine Stiftdezementierung wurde nicht beobachtet. Insgesamt wurden damit hohe Erfolgsraten ermittelt (GFRC= 90,2 %; Titan= 93,5 %). Die Wahrscheinlichkeit nicht zu Versagen war für beide Stiftmaterialien vergleichbar (Relatives Risiko [95 % Konfidenzintervall]: 0,965 [0,851; 1,095]). Hingegen gaben die erfassten Versagensmodi Hinweise auf eine Abhängigkeit vom E-Modul des verwendeten Aufbaustiftes. Im Rahmen dieser Studie konnten erstmals klinische Langzeitdaten für den sekundären Monoblock mit einem SAR-Komposit erhoben werden.

Sterzenbach G, Franke A, Naumann M (2012) Rigid or flexible dentin-like endodontic posts – Clinical evaluation of a biomechanical concept. 7-yr results of a randomized controlled clinical pilot trial on endodontically treated abutment teeth with severe hard tissue loss. *Journal of Endodontics* 38(12), 1557-63  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2012.08.015>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

### **3.4. Spülprotokolle zur Förderung des intraradikulären Haftverbundes**

Bitter K, Aschendorff L, Neumann K, Blunck U, Sterzenbach G (2014) Do chlorhexidine and ethanol improve bond strength and durability of adhesion of fiber posts inside the root canal? *Clinical Oral Investigations* 18(3), 927-34

Der Haftverbund zum Wurzelkanalentin ist aufgrund der morphologischen Besonderheiten des Dentins und der Konfiguration der Stiftbettkavität im Vergleich zum koronalen Dentin reduziert. Eine unvollständige Monomerinfiltration begünstigt zusätzlich Effekte der hydrolytischen und enzymatischen Degradation der Grenzschicht (Breschi Mazzone et al. 2008; Liu Tjaderhane et al. 2011). Ein Weg der Kollagenolyse durch endogene MMPs entgegenzuwirken ist die Applikation des unspezifischen MMP-Inhibitors Chlorhexidindigluconat vor der Anwendung des Adhäsivs (Pashley Tay et al. 2004). Der initiale Haftverbund und die Phänomene der hydrolytischen Degradation können wiederum durch Alkoholimprägnierung des Dentins reduziert werden, indem das intra- und interfibrilläre residuale Wasser reduziert und dadurch die Monomerinfiltration begünstigt wird (Sadek Braga et al. 2010). Mit dieser Studie sollte ein möglicher Vorteil der Dentinvorbehandlung mittels CHX-Spülung und der vereinfachten Ethanolimprägnierung auf den initialen und mittelfristigen Haftverbund zum Wurzelkanalentin untersucht werden. Die Spülprotokolle vor der adhäsiven Stiftsetzung wurde für ein E&R basiertes Befestigungskomposit und ein SAR-Komposit untersucht. Nach der Wurzelkanalfüllung durch vertikale Kondensation und der Präparation der Stiftbettkavitäten erfolgte die initiale, ultraschallaktivierte Spülung mit 1 % Natriumhypochlorit, gefolgt von Wasser. Für diese Spülsequenz wurde in einer vorherigen Studie eine signifikante Haftwertsteigerung ermittelt (Bitter Hambarayan et al. 2013). Anschließend erfolgte die Spülung für 1 Minute mit 2 %-iger CHX-Lösung oder mit 99 %-iger Ethanollösung. Für das E&R basierte Adhäsivsystem erfolgten die Spülungen nach der Dentin-konditionierung mit Phosphorsäure. Die Haftkraft wurde initial und nach thermozyklischer Alterung und nachfolgender 6 monatiger Wasserlagerung im Dünnschnitt-Ausstoßverfahren ermittelt. Die Haftkraft wurde signifikant vom Spülprotokoll, der Adhäsionsstrategie, sowie der Lokalisation im Wurzelkanal beeinflusst ( $p < 0,0005$ ). Nach der Ethanolspülung stiegen die Haftwerte für beide Befestigungskomposite, während für das SAR-Komposit initial und nach Dauerlagerung signifikant höhere Werte ermittelt wurden.

Bitter K, Aschendorff L, Neumann K, Blunck U, Sterzenbach G (2014) Do chlorhexidine and ethanol improve bond strength and durability of adhesion of fiber posts inside the root canal? *Clinical Oral Investigations* 18(3), 927-34  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00784-013-1040-1>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

### **3.5. Eignung des SAR-Komposit als post-and-core Material**

Sterzenbach G, Karajouli G, Tunjan R, Spintig T, Bitter K, Naumann M (2015) Damage of lithium-disilicate all-ceramic restorations by an experimental self-adhesive resin cement used as core build-ups.

Clinical Oral Investigations 19(2), 281-8

Im Rahmen dieser Untersuchung sollte die Eignung eines SAR-Komposits als Stumpfaufbaumaterial evaluiert werden. SAR-Komposite sind im Vergleich zu konventionellen Kompositen hydrophiler, da sie saure Monomere enthalten. Diese Hydrophilie hat kann jedoch eine höhere Wasseraufnahme zur Folge. Aufgrund des großen Aufbauvolumens bei der Rekonstruktion stark zerstörter EBZ kann als Folge der vermehrten Wasseraufnahme die hygroskopische Expansion ein kritisches Ausmaß annehmen und zu Infraktionen der vollkeramischen Kronenversorgung führen (Leevailoj Platt et al. 1998). Das Ziel dieser Untersuchung war es mittels einer Dauerinkubation das Risiko für die Ausbildung von Infraktionen bei Lithiumdisilikat Kronen zur Rekonstruktion von endodontisch behandelten Frontzähnen ohne verbliebene Kavitätenwand zu bestimmen, wenn ein experimentelles SAR-Komposit im post-and-core Verfahren angewendet wird.

Die Stumpfaufbauten erfolgten in einem Arbeitsschritt mit der Befestigung der FRC-Stift in drei Anwendungsprotokollen: chemisch initiierte Polymerisation, duale Polymerisationsinitiation durch Lichtapplikation und mit der offenen Matrizentechnik. Als Kontrollgruppe wurde, vergleichbar mit den vorherigen Untersuchungen, der Stumpfaufbau mit einem rein autokatalytisch initiiert härtenden Stumpfaufbaukomposit durchgeführt. Nach der adhäsiven Befestigung der monolithischen Vollkeramikronen mit dem gleichen SAR-Komposit wurden die Probenzähne bei 37°C in einer 0,5 % Chloramin T-Lösung inkubiert. Die Nachuntersuchung erfolgte für ein Jahr alle drei Monate. In den Gruppen mit unterschiedlicher Polymerisationsinitiation zeigten 50 % der Kronen nach 9 Monaten Infraktionen, während in der Kontrollgruppe kein Ereignis beobachtet wurde.

Aufgrund des großen Aufbauvolumens bei der Rekonstruktion stark zerstörter EBZ kann als Folge der vermehrten Wasseraufnahme die hygroskopische Expansion der SAR-Komposite ein kritisches Ausmaß annehmen und zu Infraktionen der vollkeramischen Kronenversorgung führen.

Sterzenbach G, Karajouli G, Tunjan R, Spintig T, Bitter K, Naumann M (2015) Damage of lithium-disilicate all-ceramic restorations by an experimental self-adhesive resin cement used as core build-ups. *Clinical Oral Investigations* 19(2), 281-8  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00784-014-1263-9>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

## 4. DISKUSSION

Die angewandten Untersuchungsmethoden zur maximalen Belastbarkeit und der Haftkraft in Kombination mit der Simulation verschiedener, klinisch relevanter Degradations- und Ermüdungsphänomene ermöglichte eine vielschichtige Bewertung der untersuchten Versorgungsstrategie, da in allen Untersuchungen mindestens eine Testgruppe vergleichbar war. Im Fokus standen hauptsächlich materialspezifische Fragestellungen, insbesondere für den Einsatz von SAR-Kompositen. Mit Hilfe der ermittelten klinischen Daten konnten die Erkenntnisse zu einem validen und vielversprechenden Konzept der adhäsiven post-endodontischen Rekonstruktion als sekundärer Monoblock mit SAR-Kompositen zusammengefasst werden. Bewusst wurden die Untersuchungen an Frontzähnen mit ausgeprägtem, ggf. simulierten koronalen Zahnhartsubstanzverlust durchgeführt, da klinische Langzeitdaten zeigen, dass stark zerstörte endodontisch behandelte Frontzähne ein zweifach höheres Versagensrisiko als Seitenzähne haben (Naumann Koelpin et al. 2012). Frontzähne werden in der dynamischen Okklusion vorrangig durch Scherkräfte belastet. In den Kontaktpositionen während der Frontzahnführung und in der Inzisalkantenposition werden Scherkräfte mit Vektoren in antero-kraniale Richtung aufgebaut. Somit müssen endodontisch behandelte, stark zerstörte Frontzähne als Hochrisikogebiet für die post-endodontische Rekonstruktion angesehen werden. Vor diesem Hintergrund wird die In-vitro-Untersuchung der maximalen Belastbarkeit von post-endodontisch restaurierten Zähnen vorrangig an oberen mittleren Frontzähnen durchgeführt, wobei die Prinzipien der evaluierten therapeutischen Maßnahmen und Materialien auch für den Seitenzahnbereich Gültigkeit haben.

Jeder Rekonstruktionsschritt von der adhäsiven Befestigung des Aufbaustiftes im Wurzelkanal bis zur adhäsiven Befestigung der Kronenrestauration steigert signifikant die Belastbarkeit stark zerstörter, endodontisch behandelter, oberer, zentraler Frontzähne. Die Ergebnisse der ersten Untersuchung zeigen, dass nur mit ausgebildetem Ferrule-Effekt, d. h. nach der Befestigung der definitiven Kronenrestauration, die maximalen Belastbarkeitswerte erreicht werden. Die Belastbarkeit steigt vom Stadium des Stiftstumpfaufbaus zum Stadium des etablierten sekundären Monoblocks mit definitiver Kronenrestauration, um annähernd 44 %.



Demnach ist der Ferrule-Effekt ein wesentliches Element der Frakturprophylaxe für EBZ. Die Belastbarkeitssteigerung mit einem 2 mm Ferrule-Design im Vergleich zur Kronenversorgung ohne Ferrule-Design wurde für den adhäsiven Stift-Stumpfaufbau mit anschließender Kronenversorgung bestätigt (Samran El Bahra et al. 2013). Finite-Element-Analysen (FEM) unterstützen die prognostisch günstigere Belastungsstressverteilung bei vorhandener Dentinmanschette im Sinne eines Ferrule-Design (Dejak & Mlotkowski 2013; Juloski Apicella et al. 2014; Santos-Filho Verissimo et al. 2014; Santos-Filho Verissimo et al. 2014; Verissimo Simamoto Junior et al. 2014).

Die beobachteten Frakturmuster veranschaulichen, dass sich die belastungsinduzierten Frakturmuster zwischen den einzelnen Restaurationsphasen in typischer Weise unterscheiden. Vom primär kohäsiven Versagen des Stumpfaufbaumaterials ändert sich die Frakturlinie mit ausgebildetem Ferrule-Effekt zur koronal gelegenen Dentinfraktur mit schrägem Verlauf in Belastungsrichtung zum simulierten Limbus alveolaris, wobei keine Stiftfraktur zu beobachten war. Somit kann angenommen werden, dass das initiale Versagen der Restauration im oralen Kronen-Zahn Grenzbereich (die sog. Zementfuge) stattfindet. Der initiale Verbundverlust im Kronenrandbereich findet bei ca. 60 % der maximalen Belastbarkeit statt (Schmitter Rammelsberg et al. 2010). Mit höherem Ferrule-Design (max. 2 mm) steigt signifikant die maximale Belastbarkeit, da der Ferrule-Effekt den maximalen Stress in dieser Grenzschicht reduziert (Eraslan Aykent et al. 2009; Schmitter Rammelsberg et al. 2010; Dejak & Mlotkowski 2013). Daraus lässt sich die klinisch relevante Schlussfolgerung der zeitnahen definitiven Kronenrestauration nach erfolgter Stiftsetzung ziehen.

Während nach der zyklischen thermomechanischen Wechselbelastung (TCML) vergleichbare Frakturlinien beobachtet wurden, waren die Belastbarkeiten signifikant geringer. Obgleich die TCML zeit- und kostenintensiv ist, zeigen unsere Ergebnisse, dass dynamische Ermüdungsprozesse einen wesentlichen Einfluss auf die maximalen Belastbarkeiten post-endodontischer Restaurationen nach linearer Bruchlasttestung haben. Das angewandte Belastungsprotokoll der TCML von 1-49 N für 1,2 Mio. Zyklen und simultaner Temperaturwechselbelastung zwischen 5°C und 55°C für 6000 Zyklen wurde zuvor auch von anderen Autoren als klinisch relevante Simulation des Ermüdungsverhaltens post-endodontischer Versorgung beschrieben (Butz Lennon et al. 2001; Heydecke Butz et al. 2001; Strub Pontius et al. 2001; Naumann Sterzenbach

et al. 2005; Forberger & Gohring 2008). Die rein thermozyklische Beanspruchung (thermocycling) verringert die Haftwerte, wobei selten katastrophale Ereignisse, d. h. vollständiges Adhäsivversagen, provoziert wird. In Kombination mit der mechanischen Wechselbelastung über mind. 1 Mio. Zyklen wird eine signifikante, klinisch relevante Schwächung der adhäsiven Verbindung simuliert (Mair & Padipatvuthikul 2010). Aufgrund der Heterogenität von Prüfverfahren für post-endodontische Restaurationen (Naumann Metzdorf et al. 2009) wurde 2009 eine Prüfnorm zur Belastbarkeitstestung von Aufbaustiften etabliert (DIN 13994:2009-03, Biegebruchfestigkeit von Aufbaustiften). Bestandteil dieser Normung ist unter anderem eine TCML der Proben, um den Einfluss der Ermüdungsprozesse zu berücksichtigen. Aktuell liegt dieser Teststandard als internationaler Normvorschlag den Gremien der ISO/TC 106 „Zahnheilkunde“ zur Diskussion vor. Schlussfolgerungen zur klinischen Eignung neuer Versorgungsstrategien und Materialien für die post-endodontische Versorgung sollten demnach nicht auf der Basis von linearen Bruchlasttests ohne vorherige Ermüdungsbelastung erhoben werden. Die Präparation der Testproben und der Versuchsaufbau sollte dabei eine klinisch relevante Situation widerspiegeln (Mjor 2007).

Die ermittelten Ergebnisse der Belastbarkeiten in Abhängigkeit der Restaurationsstadien zeigen, dass kein linearer Zusammenhang bezüglich der absorbierten und weitergeleiteten Stressmomente besteht. Demnach scheint der Wurzel-Stift-Kronen-Komplex, trotz adhäsiver Verankerung aller Komponenten nicht dem Modell eines idealen Mehrstoffverbundsystems zu entsprechen. Vielmehr muss der Verbundfestigkeit in den jeweiligen Grenzschichten gegenüber den mechanischen Parametern der einzelnen Komponenten für die Gesamtbelastbarkeit eine übergeordnete Rolle beigemessen werden. In der weiterführenden Evaluation zum Einfluss der Adhäsionsstrategie auf die Befestigung von FRC-Stiften wurden die höchsten Haftwerte für die SAR-Kompositen ermittelt. Eine systematische Literaturanalyse mit nachfolgender Metaanalyse von In-vitro-Daten konnte ebenfalls für die initialen Haftwerte im Wurzelkanal einen Vorteil zugunsten der SAR-Komposite im Vergleich mit der SE oder der E&R-Strategie herausarbeiten (Sarkis-Onofre Skupien et al. 2014).

Das untersuchte SE-Adhäsiv zeigt *in vitro* im koronalen Dentin höhere Haftwerte gegenüber einem der untersuchten SAR-Komposite (Yang Ludwig et al. 2006). Mit den

vorliegenden Ergebnissen wurden jedoch für dieses SE-System signifikant geringere Haftwerte zum Wurzelentin ermittelt. Für die geringeren Haftwerte des SE-Monomers sind drei wesentliche, wurzelkanalspezifische Hintergründe zu diskutieren. Zum einen wird das Wurzelkanalentin nach der Stiftbettpräparation von einer im Vergleich zum koronalen Dentin dickeren Schmierschicht bedeckt in die zusätzlich Sealer- und Guttapercharesten eingelagert sind (Serafino Gallina et al. 2004). Das Penetrationsvermögen der Monomere ist abhängig von der Dicke der Schmierschicht und der Azidität des Monomers (Tay & Pashley 2001). Somit könnten die geringen Haftwerte mit der unzureichenden Penetration der Schmierschicht durch das milde SE-Monomer erklärt werden (Goracci Sadek et al. 2005). Ein weiterer Erklärungsansatz ist die unzureichende Feuchtigkeitskontrolle in der Stiftbettkavität. Residuales Wasser kann die Polymerisation inhibieren. Nichtpolymerisierte SE-Monomere behalten ihren sauren Charakter, wobei weiterhin anorganische Bestandteile aus dem Dentin gelöst werden, was den Verbund zum Dentin negativ beeinflusst (Wang & Spencer 2005). Diffundiert Wasser in Folge einer unvollständigen Hybridisierung des Dentins in die Adhäsivschicht (Chersoni Suppa et al. 2004), werden Füllerpartikel innerhalb der Polymermatrix des Komposits separiert und die adhäsive Bindung versagt (Van Landuyt De Munck et al. 2010). Als weitere Ursache wird die unzureichende Verdunstung des Lösungsmittels diskutiert (Ikeda De Munck et al. 2005). Ein Ausdünnen des Adhäsivs auf der Oberfläche ist für den Verdunstungsprozess des Lösungsmittels förderlich und im koronalen Dentin gut zu kontrollieren. Im Wurzelkanal reicht womöglich der Luftstrom nicht bis in die apikale Kavität, um eine adäquate Evaporation zu gewährleisten. Rückständiges Lösungsmittel kann die Polymerisation negativ beeinflussen, was wiederum die Permeabilität für Wasser erhöht (Hashimoto Ito et al. 2004) und morphologisch als Wasserblase beschrieben wurde (Yiu Pashley et al. 2005).

Die E&R-Systeme zeigten signifikant unterschiedliche Haftwerte. Für eines der untersuchten Systeme wurden im Vergleich zu den SAR-Kompositen signifikant geringere Haftwerte ermittelt. Auch für die Anwendung der E&R-Systeme im Wurzelkanal ist die sehr eingeschränkte Kontrolle des Wassers eine maßgebliche Problematik. Mit der Phosphorsäurekonditionierung werden Dentintubuli geöffnet, indem die Schmierschicht mit dem Ätzzvorgang entfernt wird. Die Schmierschicht aber

wirkt wie eine Diffusionsbarriere. *In vitro* wurde die Dentinpermeabilität für Wasser um bis zu 86 % reduziert, wenn die Dentintubuli durch die Schmierschicht verschlossen sind (smear plugs) (Pashley Livingston et al. 1978; Pashley Livingston et al. 1978; Pashley Michelich et al. 1981). Zusätzlich ist die Tubuliinfiltration des Adhäsivs im Wurzelkanal unvollständig (Malyk Kaaden et al. 2010). Infolge der unvollständigen Infiltration kann Wasser aus den Dentintubuli in die Adhäsivschicht diffundieren und die Ausbildung einer homogenen Hybridschicht beeinträchtigt werden (Chersoni Suppa et al. 2004; Hashimoto Ito et al. 2004). Zudem ist die Kontrolle des residualen Wassers im Kollagenetzwerk nach der Säurekonditionierung sehr eingeschränkt, was wiederum die Monomerinfiltration in das Kollagenetzwerk negativ beeinflusst (Liu Tjaderhane et al. 2011). Da der Haftverbund der E&R Strategie von der Ausbildung einer homogenen Hybridschicht und Kunststoffverzapfungen in den Dentintubuli abhängt, könnten die beschriebenen Phänomene, in Verbindung mit der für diese adhäsive Strategie ungünstigen Dentinmorphologie im Wurzelkanal, die geringeren Haftwerte im Vergleich zu den SAR-Kompositen erklären. Die Haftkraft der SAR-Komposite basiert, neben einer mikromechanischen Komponente, auf der Ausbildung von Calciumphosphat-Komplexen. Demnach wird der Haftverbund im Vergleich zur E&R- und SE-Strategie weniger von morphologischen Unregelmäßigkeiten des Dentins beeinflusst und ist zudem weniger hydrolyseanfällig (Yoshida Nagakane et al. 2004). Die höheren Haftwerte des zweiten untersuchten E&R-Materials könnten in diesem Zusammenhang mit einer zusätzlichen Ausbildung von Calciumphosphat-Komplexen, wie sie für das spezifische funktionelle Monomer angenommen werden, erklärt werden (Lattaa 2007). Eine chemische Bindung funktioneller Monomere zum Hydroxylapatit des Dentins, durch die Ausbildung von Calciumsalzen, kann die Verbundfestigkeit erhöhen und die Dauerhaftigkeit des Haftverbundes verbessern (Yoshida Nagakane et al. 2004; Van Meerbeek Yoshihara et al. 2011).

Residuales Wasser hat neben den beschriebenen Effekten auf den initialen Haftverbund auch einen negativen Einfluss auf die Langzeitstabilität der adhäsiven Verbindung (Liu Tjaderhane et al. 2011; Pashley Tay et al. 2011). Das Wasser diffundiert durch die Hybridschicht in die Polymermatrix und verursacht die

Degradation des Komposits, indem die Esterverbindungen der Methacrylate hydrolysiert werden (Salz Zimmermann et al. 2005).

Die Alkoholimprägnierung (ethanol-wet bonding) gilt als vielversprechende Methode, um den Phänomenen der hydrolytischen Degradation entgegenzuwirken, indem das intra- und interfibrilläre Wasser reduziert und dadurch die Infiltration der Monomere in das Kollagenetzwerk begünstigt wird (Sadek Braga et al. 2010). Dabei diffundiert hochkonzentrierter Alkohol in die interfibrillären Räume des, nach Säureeinwirkung, vom Hydroxylapatit freigelegten Kollagenetztes, indem das Wasser vollständig aufgenommen wird. Anschließend können die in Ethanol gelösten Monomere des Adhäsivs, nahezu homogen in das Kollagenetzwerk infiltrieren. Die vollständige Kunststoffimprägnierung ist von entscheidender Bedeutung, um ein Risswachstum im Sinne des Haftverbundverlustes durch Ermüdungsbelastung zu vermindern (Zhang Beitzel et al. 2015). Mit einer homogenen Kunststoffinfiltration wird gleichzeitig der prozentuale Anteil der umgesetzten Doppelbindungen, die Konversionsrate erhöht (Liu Tjaderhane et al. 2011), was wiederum die Dentinpermeabilität für Wasser reduziert (Cadenaro Antonioli et al. 2005; Cadenaro Breschi et al. 2009).

In der progressiven Anwendung wird das Wasser nach der etch-and-rinse Dentinkonditionierung durch eine Serie an Spülungen mit aufsteigender Alkoholkonzentration ersetzt (Sadek Braga et al. 2010). Aufgrund der zeitaufwendigen Applikation ist diese Technik klinisch nicht praktikabel. Die modifizierte Technik beschreibt die Alkoholimprägnierung des Kollagens für 1 min. nach der Säureätzung mit anschließender Applikation eines hydrophoben, ethanolhaltigen Adhäsivs (Sauro Toledano et al. 2010). Die Ergebnisse unserer Untersuchung deuten darauf hin, dass die modifizierte ethanol-wet bonding Technik auch für die Applikation hydrophiler Monomere den Haftverbund im Wurzelkanal erhöht. Sowohl für das E&R-System, als auch für das SAR-Komposit wurde nach der Ethanolspülung ein signifikanter Anstieg der initialen Haftwerte im Vergleich zur Kontrollgruppe beobachtet, wobei mit dem SAR-Komposit signifikant höhere Haftwerte generiert werden konnten. Ergänzend zu den bereits diskutierten morphologischen und anwendungsspezifischen Herausforderungen für die adhäsive Befestigung im Wurzelkanal mit E&R-basierten Kompositsystemen, zeigte das untersuchte SAR-Komposit im Vergleich mit anderen

SAR-Kompositen und konventionellen Befestigungskompositen einen geringeren Polymerisationsstress (Kitzmüller Graf et al. 2011; Frassetto Navarra et al. 2012). Der Einfluss dieser unterschiedlichen Polymerisationskinetik auf die Haftkraft zum Wurzelkanalentin könnte, aufgrund des sehr hohen C-Faktors in der Stiftbettkavität, groß sein und die höheren Haftwerte begründen. Dabei scheint die für dieses SAR-Komposit ermittelte initiale Volumenzunahme von 0,47 % einen Teil der Polymerisationsschrumpfung zu kompensieren und damit den Stress in der Dentinegrenzschicht zu reduzieren (Spinell Schedle et al. 2009). Vorangegangene Untersuchungen zur Verbundfestigkeit im Wurzelkanal konnten für das untersuchte SAR-Komposit im Vergleich mit E&R- und SE-Adhäsiven ebenfalls signifikant höhere Haftwerte nach TCML ermitteln, wobei die TCML für alle untersuchten Befestigungskomposite die Haftwerte reduzierte (Bitter Perdigão et al. 2012). Mit der untersuchten Spülsequenz und der modifizierten Ethanolspülung nach der Stiftbettpräparation konnte das Ausmaß der Haftwertreduktion nach thermozyklischer Wechsellast und Wasserlagerung über 6 Monate stark reduziert werden.

Hingegen zeigte die CHX Vorbehandlung für das E&R-Adhäsiv in der vorliegenden Untersuchung keinen positiven Effekt auf die Haftwerte nach thermozyklischer Alterung und Langzeitinkubation. Im koronalen Dentin konnte nach systematischer Literatur- und nachfolgender Metaanalyse ein positiver Effekt für die 2 %-ige CHX Applikation nach bis zu 12 monatiger Lagerung bestätigt werden (Montagner Sarkis-Onofre et al. 2014). Während andere Autorengruppen auch für den Haftverbund zum Wurzelkanalentin eine Stabilisierung der Haftwerte nach der CHX Vorbehandlung ermittelten (Cecchin de Almeida et al. 2011; Lindblad Lassila et al. 2012), kann rückständiges Wasser den Einfluss des CHX reduzieren. Die kombinierte Applikation von Ethanol und CHX ermöglicht die Feuchtigkeitskontrolle und kann die Langzeitstabilisierung der Hybridschicht durch die Inhibition der MMPs unterstützen (Sadek Braga et al. 2010; Cecchin Giacomini et al. 2014). Alle Zähne wurden direkt nach der Präparation der Stiftbettkavität mit 1 %-iger Natriumhypochloritlösung vorbehandelt. In vorherigen Untersuchungen konnte unsere Arbeitsgruppe mit diesem passivierten Ultraschallspülprotokoll mit abschließender Wasserspülung eine Haftwertsteigerung für die E&R-Strategie und für die Verwendung eines SAR-Komposits beobachten (Bitter Hambarayan et al. 2013). Da sich die Schmierschicht

nach der Stiftbettpräparation in der Zusammensetzung, seiner Konsistenz und Dicke von dem des koronalen Dentins unterscheidet, wurden verschiedene Spülprotokolle für die jeweiligen Adhäsionsstrategien evaluiert, um durch eine adjuvante Konditionierung die Haftwerte zu steigern. Das beschriebene Spülen mit 1 %-iger Natriumhypochloritlösung zeigte neben einer Haftwertsteigerung auch eine morphologische Verbesserung der adhäsiven Grenzfläche, wobei die Schmierschicht aufgelockert und teilweise entfernt wird. Jedoch kann insbesondere für das E&R-System eine Präzipitatbildung und Ablagerung von Parachloranilin in der Dentintubuli infolge der negativen Interaktion des CHX mit residualem Natriumhypochlorit, trotz erfolgter Wasserspülung nicht ausgeschlossen werden (Kolosowski Sodhi et al. 2014). Für das SAR-Komposit hingegen konnte in der vorliegenden Studie auch mit der CHX Spülung eine Stabilisierung der Haftwerte zum Wurzelkanaldentin ermittelt werden.

Mit dem Erhalt der Hydroxylapatitummantelung, durch die Verwendung milder bis ultramilder SE-Monomere, wird das Kollagen zusätzlich vor der proteolytischen Aktivität der Endopeptidasen geschützt (Liu Tjaderhane et al. 2011; Van Meerbeek Yoshihara et al. 2011). Demnach scheint eine Vorbehandlung mit einem MMP-Inhibitor weniger von Bedeutung zu sein, da der adhäsive Verbund eher auf der Basis von Calciumphosphat-Komplexen, als auf der Hybridisierung des Kollagens beruht. Eigene morphologische Analysen der Grenzschicht bei SAR-Kompositen zeigten keine erkennbare Hybridschichtformation (Bitter Hambarayan et al. 2013). Vielmehr scheint die Feuchtigkeitskontrolle im Wurzelkanal bzw. in der Stiftbettkavität mit dem beschriebenen Ethanolspülprotokoll einen bedeutsameren Einfluss auf den dauerhaften Haftverbund. Mit der Anwendung ultramilder SAR-Komposite bleibt zudem der Verschluss der Dentintubuli durch die Schmierschicht (smear layer tags) erhalten, wodurch die Dentinpermeabilität im Vergleich zu ethanolimprägniertem aber demineralisierten Dentin signifikant geringer ist (Cadenaro Breschi et al. 2009).

Mit der vorgestellten klinischen Studie wurden erstmalig prospektiv ermittelte klinische Langzeitdaten zur adhäsiven Befestigung im Wurzelkanal mit einem SAR-Komposit ausgewertet. Bislang wurde das adhäsive Versagen, bzw. die Stiftdezementierung als vorherrschender Grund für den klinischen Misserfolg der post-endodontischen Rekonstruktion mit adhäsiv befestigten Faserstiften identifiziert

(Rasimick Wan et al. 2010; Barfeie Thomas et al. 2015). Hingegen wurde im Rahmen der vorliegenden Studie, bemerkenswerterweise, keine Dezementierung der Aufbaustifte beobachtet. Die geringen Misserfolgsraten bestätigten damit die zuvor *in vitro* ermittelten Vorteile dieses SAR-Komposits.

Die Ergebnisse dieser randomisiert kontrollierten Studie zur Ausbildung des sekundären Monoblocks mit faserverstärkten Aufbaustiften geben erstmals eine vergleichende klinische Evidenz zum direkten Einfluss des Stiftmaterials auf die längerfristigen Überlebensraten von adhäsiv rekonstruierten EBZ wieder. Die ermittelten Überlebenswahrscheinlichkeiten zeigen, dass die Rigidität des Stiftmaterials keinen Einfluss auf die Überlebensraten hat, wenn mit der Kronenpräparation ein 2 mm Ferrule-Design sichergestellt wird und die Aufbaustifte mit einem SAR-Komposit befestigt werden. Die vielversprechenden Erfolgsraten nach 7 Jahren von über 90 % müssen insbesondere vor dem Hintergrund des a priori definierten ausgeprägten Zerstörungsgrades als sehr positiv interpretiert werden. So wurden ausschließlich Zähne mit maximal 2 residualen Kavitätenwänden in die Studie eingeschlossen. 70 % der inkludierten Zähne hatten eine oder keine residuale koronale Dentinwand und damit einen ausgeprägten Zahnhartsubstanzverlust.

Bislang konnten vergleichbar hohe, prospektiv erhobene Erfolgsraten für glasfaserverstärkte Aufbaustifte nur für einen deutlich kurzfristigeren Nachuntersuchungszeitraum von bis zu 36 Monaten publiziert werden (Monticelli Grandini et al. 2003; Schmitter Rammelsberg et al. 2007; Cagidiaco Garcia-Godoy et al. 2008; Theodosopoulou & Chochlidakis 2009; Zicari Van Meerbeek et al. 2011). Längerfristige klinische Datenanalysen zeigten für Glasfaserstifte bereits nach bis zu fünf Jahren deutlich geringere Erfolgsraten zwischen 67,5 % und 71,8 % (Naumann Reich et al. 2008; Schmitter Hamadi et al. 2011; Juloski Fadda et al. 2014). Nach sechs Jahren waren nur 71 % post-endodontisch versorgte Prämolaren ohne Komplikationen *in situ* (Ferrari Vichi et al. 2012) und nach zehn Jahren wurde eine verhältnismäßig hohe jährliche Misserfolgsrate von ~ 4,6 % ermittelt (Naumann Koelpin et al. 2012).

Die vergleichsweise hohen Erfolgsraten in der vorliegenden Untersuchung könnten in wesentlichen Unterschieden des Studiendesigns Erklärungen finden. Neben den verwendeten Materialien zur Herstellung des sekundären Monoblocks, wurde bei allen Pfeilerzähnen ein 2 mm hohes Ferrule-Design mit der Kronen-



präparation angelegt und wenn notwendig zuvor durch eine chirurgische Kronenverlängerung die biologische Breite sichergestellt. Demnach unterstützen die erhobenen Ergebnisse die Annahme, dass der Ferrule-Effekt einer der wichtigsten prognostischen Faktoren für die post-endodontische Rekonstruktion ist (Juloski Radovic et al. 2012).

Die Erfolgswahrscheinlichkeiten zeigten keinen Vorteil für eines der beiden untersuchten Stiftmaterialien, jedoch gaben die Versagensmuster Hinweise auf einen möglichen Einfluss für den E-Modul des Aufbaustiftes. Im Einklang mit einer systematischen Literaturanalyse kann eine höhere Inzidenz für Wurzelfrakturen bei metallischen Stiftversorgungen im Vergleich zu faserverstärkten Aufbaustiften für die adhäsiv befestigten konfektionierten Titanaufbaustifte nicht bestätigt werden (Figueiredo Martins-Filho et al. 2015). Das Stiftmaterial wird keinen signifikanten Einfluss auf die Kraftverteilung haben, solange der sekundäre Monoblock ausgebildet ist, d. h. die adhäsive Verbindung des Stift-Aufbau-Kronen-Komplexes intakt ist (Schmitter Rammelsberg et al. 2010). Infolge der dauerhaften Ausbildung von Spannungsspitzen in der Befestigungskomposit-Grenzfläche können Mikrospalten entstehen, woraufhin eine bakterielle Reinfektion des Endodonts erfolgen kann. FEM-Analysen errechneten für rigidere Stiftmaterialien (z. Bsp. Titan) eine höhere Spannungsstresskonzentration entlang der Grenzfläche zum Befestigungskomposit (Garbin Spazzin et al. 2010; Santos Meira et al. 2010). Das primär endodontische Versagen in der Titanstiftgruppe kann u. a. durch diese Phänomene begründet sein.

Infolge des initialen Versagens im Bereich des Kronenrandes, bzw. der Grenzschicht zwischen dem plastischen Aufbau und dem Dentin ist der angestrebte Monoblock aufgehoben, was bei weiterer Belastung zum klinisch etablierten Misserfolg führt. Werden für die adhäsive Befestigung des Aufbaustiftes und den plastischen Stumpfaufbau verschiedene Komposite, respektive Adhäsive eingesetzt wird eine weitere Grenzfläche mit möglichen Verbundproblematiken geschaffen. Demnach wäre es prognostisch vorteilhaft die Stiftbefestigung und den adhäsiven Stumpfaufbau in einem unmittelbaren Arbeitsschritt mit einem Material ausführen zu können (post-and-core Verfahren). Für die Bewertung von Stumpfaufbaumaterialien ist neben anderen mechanischen Parametern die Dimensionsänderung infolge der

hygroskopischen Expansion von herausragendem Interesse. SAR-Komposite sind im Vergleich zu konventionellen Kompositen hydrophiler, da sie saure Monomere enthalten. Diese Hydrophilie kann eine höhere Wasseraufnahme zur Folge haben. Aufgrund des großen Aufbauvolumens bei der Rekonstruktion stark zerstörter EBZ kann als Folge einer vermehrten Wasserabsorption die hygroskopische Expansion ein kritisches Ausmaß annehmen und zu Rissbildungen der vollkeramischen Kronenversorgung führen (Leevailoj Platt et al. 1998).

Die Ergebnisse nach der Dauerinkubation zeigten in der Kontrollgruppe mit einem konventionellen Stumpfaufbaukomposit keine Ausbildung von Rissformationen in der Glaskeramik (Lithiumdisilikat). Hingegen wurden nach 9 Monaten bei jeweils 50 % der Probenzähne in den Gruppen, deren Stumpfaufbauten mit dem SAR-Komposit angefertigt wurden, Infraktionen in der Lithiumdisilikatkronen beobachtet. Der ursächliche Zusammenhang zwischen einer klinisch kritischen Rissausbildung bei Glaskeramiken nach Langzeitlagerung im Wasser wurde bislang nur für Stumpfaufbaumaterialien mit deutlich höherer Wasseraufnahmekapazität wie kunststoffmodifizierte Glasionomere oder Compomeren beschrieben (Sindel Frankenberger et al. 1999). In vorangegangenen Untersuchungen wurde in einem vergleichbaren Studiendesign ähnliche Rissbildungen in der Vollkeramikkrone beobachtet, auch in einer der Gruppen deren Stumpfaufbauten mit einem konventionellen Komposit angefertigt wurden (Naumann Sterzenbach et al. 2010).

Komposite zeigen eine positive Korrelation zwischen der Wasseraufnahme und der hygroskopischen Expansion (Ruttermann Kruger et al. 2007; Ruttermann Alberts et al. 2011). Bis zum erreichten Gleichgewicht ist die Wasseraufnahme ein diffusionsabhängiger Prozess (Braden Causton et al. 1976) und folgt einem osmotischen Gradienten, da die Dimensionsänderung zeitabhängig ist (Martin Jedynakiewicz et al. 2003). Da alle Kroneninfraktionen sich zwischen der sechs- und neunmonatigen Kontrolluntersuchung ereigneten, kann geschlussfolgert werden, dass infolge der hygroskopischen Expansion zu diesem Zeitpunkt eine kritische interne Spannung in den Keramikkrone aufgebaut wurde, welche ein volumenabhängiges Maximum erreichte. Die Ergebnisse sind im Einklang mit vorherigen Untersuchungsergebnissen, die ebenfalls eine material- und volumenabhängige zeitliche Determination aufzeigten (Sindel Frankenberger et al. 1999).

Die hygroskopische Expansion wird maßgeblich von der Hydrophilie der Polymermatrix beeinflusst (Martin Jedynakiewicz et al. 2003). SAR-Komposite enthalten hydrophile, säuremodifizierte Monomere (Ferracane Stansbury et al. 2011). Des Weiteren werden Polydimethacrylate als Quervernetzer eingesetzt. So enthält das untersuchte Komposit das Comonomer triethyleneglycol dimethacrylat (TEGDMA), welches eine hohe Quervernetzung der Polymermatrix ermöglicht aber als hydrophiles Monomer auch eine hohe Wasserabsorption verursacht (Sideridou Tserki et al. 2003). Die Menge der Wasseraufnahme bei SAR-Kompositen zeigte sich zwischen verschiedenen Produkten dieser Materialklasse signifikant verschieden (Vrochari Eliades et al. 2010). Für das untersuchte SAR-Komposit wurde im Vergleich zum verwendeten konventionellen Stumpfaufbaukomposit der Kontrollgruppe eine doppelt so große Wasseraufnahme ermittelt (Bitter Schubert et al. 2015). Die hygroskopische Expansion erreichte für das konventionelle Komposit eine Volumensteigerung um 0,3 %, während für das SAR-Komposit nach 30 Tagen Wasserlagerung eine Expansion von 0,9 Vol.-% errechnet wurde.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen untermauern die Annahme, dass die hygroskopische Expansion eine volumenabhängige, klinisch relevante, kritische interne Spannung für Vollkeramikronen verursachen kann. Demnach ist für den Stumpfaufbau stark zerstörter EBZ die Verwendung von SAR-Kompositen als post-and-core Material nicht zu empfehlen, da das Rissausbildungsrisiko innerhalb der typischerweise im Frontzahnbereich indizierten und häufig verwendeten Lithiumdisilikatkeramik deutlich erhöht ist, wenn der Stumpfaufbau mit einem SAR-Komposit hergestellt wird.

## 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Jeder Rekonstruktionsschritt von der adhäsiven Befestigung des Aufbaustiftes im Wurzelkanal bis zur adhäsiven Befestigung der Kronenrestauration steigert signifikant die Belastbarkeit stark zerstörter, endodontisch behandelter Zähne, wobei erst mit der Kronenrestauration die maximale Belastbarkeit erreicht wird. Damit erhöht der Ferrule-Effekt signifikant die Frakturstabilität der EBZ und ist ein protektiver, prognosebestimmender Faktor für die Integrität des sekundären Monoblocks.

Mit der thermomechanischen Dauerbelastung als dynamische Belastung (sog. Kausimulation) werden Ermüdungseffekte provoziert, die zu einer signifikanten Reduktion der maximalen Belastbarkeiten bei linearer Belastungsuntersuchung führen. Demnach sollte die materialabhängige und restaurationspezifische präklinische Evaluation post-endodontischer Restaurationen eine Ermüdungssimulation berücksichtigen.

Die Haftkraft zum Wurzelkanalentin ist im Vergleich der untersuchten Adhäsivsysteme auf der Basis der E&R- und SE-Strategie signifikant höher, wenn glasfaserverstärkte Aufbaustifte mit einem SAR-Komposit befestigt werden. Da eines der untersuchten post-and-core Materialien auf der Basis der E&R-Strategie vergleichbare, hohe Haftwerte zeigte, scheint die Adhäsion im Wurzelkanal neben der adhäsiven Strategie auch vom spezifischen Material, bzw. Befestigungssystem, abhängig zu sein. Hingegen findet unabhängig vom untersuchten Adhäsivsystem das primäre Grenzflächenversagen zwischen dem Befestigungskomposit und dem Wurzelkanalentin statt.

Ethanol steigert signifikant die initialen Haftwerte zum Wurzelkanalentin und hat einen protektiven Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des adhäsiven Verbundes. Die finale Spülsequenz nach der Präparation der Stiftbettkavität mit ultraschallaktivierter 1 %-iger Natriumhypochloritlösung, nachfolgender Wasserspülung und finaler Spülung mit 99 %-igem Ethanol kann für die Ausbildung des sekundären Monoblock mit einem tert-butanol basierten E&R-Adhäsiv und dem untersuchten SAR-Komposit empfohlen werden. Das SAR-Komposit zeigte initial und nach Wasserlagerung signifikant höhere Haftwerte, insbesondere in den apikalen Wurzelkanalsegmenten.

EBZ mit ausgeprägtem koronalen Zahnhartsubstanzverlust können erfolgreich restauriert werden, wenn ein 2 mm Ferrule-Design präpariert wird und ein konfektionierter Aufbaustift mit einem SAR-Komposit befestigt wird. Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist wiederum unabhängig vom E-Modul – rigide (Titan) oder flexibel (glasfaserverstärktes Komposit) des Aufbaustiftes. Jedoch sind Hinweise gegeben, dass die Versagemuster eine Materialabhängigkeit zum verwendeten Aufbaustift aufweisen.

SAR-Komposite können für den Stumpfaufbau post-endodontischer Rekonstruktion bei ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust nicht empfohlen werden, wenn eine Vollkeramikkrone aus Lithiumdisilikat geplant ist. Die hygroskopische Expansion der SAR-Komposite ist aufgrund der hydrophilen Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen Stumpfaufbaukompositen erhöht und kann eine volumenabhängige kritische Spannung innerhalb der Lithiumdisilikatkeramik verursachen.

Die Ausbildung des sekundären Monoblock wird stark vom adhäsiven Verbund zum Dentin beeinflusst. Folglich sind Komposite, bzw. Adhäsive und Strategien zur Dentinkonditionierung im Wurzelkanal zu entwickeln, die den dauerhaften adhäsiven Verbund bei gleichzeitiger Reduktion der Grenzflächenzahl ermöglichen. Weiterführend ist der klinische Einfluss des Ferrule-Designs und in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit des Kronen-Wurzelverhältnis auf die Belastbarkeit und die klinische Prognose der EBZ ist zu evaluieren. Für die Einzelzahnrestauration sind zahnhartsubstanzschonende, alternative Restaurationen, wie beispielsweise die Teilkronen oder sog. Endokronen zu untersuchen, die eine Restauration stark zerstörter EBZ ermöglichen, wenn aufgrund ungünstiger klinischer Voraussetzungen, z. Bsp. Furkationen, kein Ferrule-Design präpariert werden kann. Für das vorgestellte Konzept der post-endodontischen Rekonstruktion sind zukünftig Daten, insbesondere für die Einbindung in komplexe prothetische Restaurationen, wie Verbundbrücken mit Implantaten, Extensionsbrücken und Doppelkronenversorgungen, zu ermitteln.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Die prothetische Rekonstruktion endodontisch behandelter Zähne (EBZ) ist eine besondere Herausforderung, da die Komplikationsrate im Vergleich zu vitalen Pfeilerzähnen deutlich erhöht ist. Vorrangig wird die Prognose der post-endodontischen Restauration vom koronalen Zerstörungsgrad beeinflusst. Bei ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust ist für die Stabilisierung des Stumpfaufbaus die Indikation für einen Aufbaustift gegeben.

Die Theorie des sekundären Monoblocks beschreibt grenzflächenabhängig die prognostischen Vorteile der adhäsiven Befestigung von Aufbaustiften im Wurzelkanal mit einem dem Dentin ähnlichen E-Modul. Mit diesem post-endodontischen Restaurationskonzept soll das Risiko für die Ausbildung von Mikrospalten reduziert werden, indem kritische, durch kaufunktionelle Kräfte provozierte Stresskonzentrationen im Wurzelentzin und an den Grenzflächen der Substrate zum Dentin vermindert werden. Die unregelmäßige Dentinmorphologie und der eingeschränkte Zugang zur Stiftbettkavität erschweren jedoch die adäquate und dauerhafte Ausbildung des adhäsiven Verbundes zum Wurzelkanalentin. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Applikation, der physikalischen Eigenschaften und des spezifischen Haftmechanismus, scheinen selbsthaftende Befestigungskomposite (SAR-Komposite) für die Ausbildung des sekundären Monoblock, vorteilhaft zu sein.

Die vorliegende Arbeit thematisiert die adhäsive Rekonstruktion stark zerstörter EBZ mit der Indikation für einen Aufbaustift. Auf der Basis von In-vitro und In-vivo-Daten wurde die adhäsive Strategie mit SAR-Befestigungskompositen für die Restauration im Sinne des sekundären Monoblocks evaluiert.

Das Ziel der ersten In-vitro-Untersuchung war es, den Einfluss des Ferrule-Effekts und die Simulation einer klinisch relevanten Ermüdungsbelastung zu quantifizieren. Im Rahmen einer linearen Frakturbelastungsprüfung wurde der Anteil der jeweiligen klinischen Rekonstruktionsschritte bis zur Ausbildung des vollständigen sekundären Monoblocks mit definitiver Kronenrestauration an der maximalen Belastbarkeit stark zerstörter EBZ ermittelt. Die Ergebnisse sollten einen Beitrag zur Standardisierung der präklinischen Simulation post-endodontischer Restaurationskonzepte liefern.

Die mittlere Belastbarkeit stieg von Stadium des Stiftstumpfaufbaus zum Stadium des etablierten sekundären Monoblocks nach vollkeramischer Überkronung um 44 %. Damit kann die Stumpfpräparation mit einem 2 mm hohen Ferrule-Design als einer der wichtigsten prognostischen Parameter benannt werden. Gleichzeitig ist der Ferrule-Effekt erst mit der definitiv befestigten Krone gewährleistet, woraus sich die Forderung einer zeitnahen Überkronung nach dem Stiftstumpfaufbau ableiten lässt.

Die Simulation der Ermüdungsbelastung in Form der thermomechanischen Wechsellast reduzierte signifikant die maximalen Belastbarkeiten. Demnach sollten Schlussfolgerungen zur klinischen Eignung neuer Materialien und Versorgungsstrategien für die post-endodontische Restauration auf der Basis linearer Bruchlasttests mit vorheriger dynamischer Ermüdungsbelastung erhoben werden und die Präparation der Testproben sowie der Versuchsaufbau einem klinisch relevanten Szenarium entsprechen.

Weiterführend wurde der Fragestellung nachgegangen, mit welcher der grundlegenden Adhäsionsstrategien, etch-and-rinse (E&R), selbstadhäsiv (SE) oder selbsthaftend (SAR), für die Befestigung von faserverstärkten Aufbaustiften die höchste Verbundfestigkeit zum Wurzelkanalentin erreicht werden kann. Die Abhängigkeit der initialen Haftkräfte vom jeweiligen adhäsiven Befestigungssystem wurde im Dünnschnitt-Ausstoßverfahren evaluiert und die Versagensmodi an den Grenzschichten morphologisch beurteilt.

Die höchsten Haftwerte wurden für die adhäsive Befestigung mit SAR-Kompositen ermittelt. Eines der untersuchten Befestigungssysteme der E&R-Strategie zeigte vergleichbare Haftwerte, während die Haftkräfte für ein weiteres E&R-System und das SE-System signifikant geringer waren. Die Grenzflächenanalyse zwischen dem FRC-Stift und dem Dentin stellte klar, dass der dominierende Versagensmodus der adhäsive Verbundverlust zum Dentin ist. Darüber hinaus konnten signifikante, materialabhängige Unterschiede für die Ausprägung von Inhomogenitäten aufgedeckt werden.

Die höchsten Verbundfestigkeiten wurden auch in den apikalen Wurzelkanalabschnitten für die SAR-Komposite bestätigt. Es ist anzunehmen, dass neben einer mikromechanischen Komponente, der spezifischen Haftmechanismus der SAR-Komposite zum Dentin, in dem das säuremodifizierte Monomer hydrolysestabile

Calciumphosphat-Komplexen ausbildet, für die Ausbildung des sekundären Monoblocks vorteilhaft ist.

Die klinische Langzeitbewährung des sekundären Monoblocks wurde auf der Datenbasis einer randomisierten kontrollierten Studie beurteilt. Im Fokus der Untersuchung war der Einfluss des Stiftmaterials auf die Überlebenswahrscheinlichkeit post-endodontisch restaurierter Pfeilerzähne mit ausgeprägtem Zahnhartsubstanzenverlust. Der Arbeitshypothese entsprechend, dass der E-Modul des Aufbaustiftes die dauerhafte Ausbildung des sekundären Monoblocks mit einem SAR-Komposit beeinflusst, wurden konfektionierte Aufbaustifte mit identischem Makrodesign aus Titan oder glasfaserverstärktem Epoxidharz (GFRC) befestigt. Mit der Stumpfpräparation wurde bei allen Zähnen ein 2 mm hohes Ferrule-Design angelegt und ggf. mit einer chirurgischen Kronenverlängerung die biologische Breite wieder hergestellt.

Die Aufbaustifte wurden bei insgesamt 27 Frontzähnen, 17 Eckzähnen, 37 Prämolaren und 10 Molaren, bei nahezu homogener Gruppenverteilung, inseriert. Annähernd dreiviertel der inkludierten Zähne hatten initial maximal eine residuale Kavitätenwand. Für 87 Patienten konnten die Daten nach mindestens 84 Monaten unter Risiko analysiert werden. Der primäre Endpunkt, der Funktionsverlust der Restauration, wurde für 7 Restaurationen (GFRC: 4, Titan: 3 Misserfolge) ermittelt, wobei 6 Zähne extrahiert werden mussten. Die Erfolgsraten (Titan: 93 % und GFRC: 90 %) sowie die Wahrscheinlichkeit nicht zu versagen (relatives Risiko; Konfidenzintervall: 0,965; 0,851/1,095), waren vergleichbar. Hingegen gab die Analyse der Versagensmodi Hinweise auf einen Einfluss der Rigidität des Aufbaustiftes, wobei keine Stiftdezementierung beobachtet wurde.

Der langfristige Erfolg des sekundären Monoblocks bei ausgeprägtem Zahnhartsubstanzenverlust ist hoch und weniger vom E-Modul des Aufbaustiftes abhängig, wenn der Ferrule-Effekt ausgebildet ist und die konfektionierten Aufbaustifte mit einem SAR-Komposit befestigt werden. Mit dieser Studie wurden erstmals prospektiv ermittelte klinische Langzeitergebnisse für die adhäsive Befestigung im Wurzelkanal mit SAR-Kompositen erhoben.



Mit der Evaluation adjuvanter Spülprotokolle unmittelbar vor der Stiftbefestigung sollte der initiale Haftverbund zum Wurzelkanalentin verbessert und die Degradation der adhäsiven Grenzfläche langfristig verringert werden. Die In-vitro-Studie verfolgte das Ziel, den Einfluss des unspezifischen MMP-Inhibitors Chlorhexidindigluconat (CHX) und der vereinfachten Ethanolimprägnierung auf den Haftverbund hydrophiler Monomere zu ermitteln. Nach der ultraschallaktivierten Spülung mit 1 %-iger Natriumhypochloritlösung, gefolgt von Wasser, wurden die Stiftbettkavitäten entweder mit einer 2 %-igen CHX-Lösung oder 99 %-igem Ethanol für eine Minute gespült. Die Haftkraft wurde initial und nach Dauerlagerung für ein post-and-core Material auf der E&R-Basis und einem SAR-Komposit bestimmt.

Sowohl für das E&R-System, als auch für das SAR-Komposit konnte nach der Ethanolspülung ein signifikanter Anstieg der initialen Haftwerte im Vergleich zur Kontrollgruppe beobachtet werden, wobei mit dem SAR-Komposit signifikant höhere Haftwerte generiert werden konnten. Auch nach thermozyklischer Wechsellast und Wasserlagerung über 6 Monate wurde die adhäsive Verbindung stabilisiert und das Ausmaß der Haftwertreduktion signifikant verringert. Hingegen hatte die CHX Vorbehandlung im Wurzelkanal für das E&R-Adhäsiv keinen positiven Effekt.

Die entwickelte kombinierte Spülsequenz mit einer ultraschallaktivierten Natriumhypochloritlösung und einer hochprozentigen Ethanolspülung, konnte die Haftkräfte, insbesondere in den mittleren und apikalen Wurzelkanalsegmenten, steigern. Die vergleichende Analyse zum Einfluss des Befestigungskomposits zeigte auch in dieser Untersuchung über alle Gruppen die höchsten und beständigsten Haftwerte für das SAR-Komposit, insbesondere nach der Vorbehandlung mit Ethanol.

Für die Ausbildung des sekundären Monoblock wäre es prognostisch vorteilhaft, die Stiftbefestigung und den adhäsiven Stumpf Aufbau in einem unmittelbaren Arbeitsschritt durchführen zu können, da somit die Grenzflächenzahl reduziert wird. Folglich sollte für das SAR-Befestigungskomposit die Verwendung als Stumpf Aufbaumaterial im Sinne des sogenannten post-and-core Verfahrens beurteilt werden. Da der hydrophile Charakter der SAR-Komposite eine höhere Wasseraufnahme bedingt, war es das Ziel mittels einer Langzeitinkubation das Risiko für die Ausbildung von Infraktionen bei Lithiumdisilikatkronen zu bestimmen, wenn ein experimentelles SAR-Komposit für die

Rekonstruktion endodontisch behandelter Frontzähne mit ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust im post-and-core Verfahren angewendet wird.

Die Probenzähne wurden für ein Jahr in einem Inkubator bei 37°C und 100 % Luftfeuchtigkeit gelagert und in einem Intervall von 3 Monaten inspiziert. In der Kontrollgruppe mit einem konventionellen Stumpfaufbaukomposit konnte keine Ausbildung von Rissformationen in der Glaskeramik detektiert werden. Hingegen wurden nach 9 Monaten bei jeweils 50 % der Probenzähne in den Gruppen mit einem SAR-Komposit-Stumpfaufbau Infraktionen in der Lithumdisilikatkrone beobachtet.

Die hygroskopische Expansion der SAR-Komposite kann eine volumenabhängige, klinisch relevante, kritische interne Spannung für Keramikkronen verursachen. Demnach ist für den Stumpfaufbau von EBZ mit ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust die Anwendung der SAR-Komposite im post-and-core Verfahren nicht zu empfehlen.

Das evaluierte Konzept des sekundären Monoblock mit SAR-Kompositen umfasst eine effiziente und vorhersagbare Behandlungsstrategie für die Rekonstruktion endodontisch behandelter Zähne mit ausgeprägtem Zahnhartsubstanzverlust. Für die allgemeingültige klinische Implementierung dieses Konzeptes muss weiterführend eine hohe externe Validität erarbeitet werden. Dies erfordert insbesondere die Analyse der Parameter für die Erhaltungswürdigkeit stark zerstörter Zähne, wie z. Bsp. das Kronen-Wurzelverhältnis und eine Bewertung differentialtherapeutischer Überlegungen zur Einbindung des sekundären Monoblocks als Pfeilerzahn in verschiedene prothetische Versorgungskonzepte.

## 7. LITERATURNACHWEISE

- 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**(5), 437-442.
- Al-Assaf K, Chakmakchi M, Palaghias G, Karanika-Kouma A, Eliades G (2007) Interfacial characteristics of adhesive luting resins and composites with dentine. *Dent Mater* **23**(7), 829-839.
- Asmussen E, Peutzfeldt A, Heitmann T (1999) Stiffness, elastic limit, and strength of newer types of endodontic posts. *J Dent* **27**(4), 275-278.
- Asundi A, Kishen A (2001) Advanced digital photoelastic investigations on the tooth-bone interface. *J Biomed Opt* **6**(2), 224-230.
- Atai M, Watts DC (2006) A new kinetic model for the photopolymerization shrinkage-strain of dental composites and resin-monomers. *Dent Mater* **22**(8), 785-791.
- Aurelio IL, Fraga S, Rippe MP, Valandro LF (2015) Are posts necessary for the restoration of root filled teeth with limited tissue loss? A structured review of laboratory and clinical studies. *Int Endod J* 10.1111/iej.12538.
- Bae JM, Kim KN, Hattori M *et al.* (2001) The flexural properties of fiber-reinforced composite with light-polymerized polymer matrix. *Int J Prosthodont* **14**(1), 33-39.
- Barfeie A, Thomas MB, Watts A, Rees J (2015) Failure Mechanisms of Fibre Posts: A Literature Review. *Eur J Prosthodont Restor Dent* **23**(3), P115-127.
- Belli S, Eraslan O, Eskitascioglu G, Karbhari V (2011) Monoblocks in root canals: a finite elemental stress analysis study. *Int Endod J* **44**(9), 817-826.
- Bitter K, Hambarayan A, Neumann K, Blunck U, Sterzenbach G (2013) Various irrigation protocols for final rinse to improve bond strengths of fiber posts inside the root canal. *Eur J Oral Sci* **121**(4), 349-354.
- Bitter K, Noetzel J, Stamm O *et al.* (2009) Randomized clinical trial comparing the effects of post placement on failure rate of postendodontic restorations: preliminary results of a mean period of 32 months. *J Endod* **35**(11), 1477-1482.
- 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**(3), 326-333.
- Bitter K, Perdigao J, Exner M, Neumann K, Kielbassa A, Sterzenbach G (2012) Reliability of fiber post bonding to root canal dentin after simulated clinical function in vitro. *Oper Dent* **37**(4), 397-405.
- Bitter K, Schubert A, Neumann K, Blunck U, Sterzenbach G, Ruttermann S (2015) Are self-adhesive resin cements suitable as core build-up materials? Analyses of maximum load capability, margin integrity, and physical properties. *Clin Oral Investig* 10.1007/s00784-015-1623-0.
- Bolla M, Muller-Bolla M, Borg C, Lupi-Pegurier L, Laplanche O, Leforestier E (2007) Root canal posts for the restoration of root filled teeth. *Cochrane Database Syst Rev* 10.1002/14651858.CD004623.pub2(1), CD004623.
- Braden M, Causton EE, Clarke RL (1976) Diffusion of water in composite filling materials. *J Dent Res* **55**(5), 730-732.
- Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Di Lenarda R, De Stefano Dorigo E (2008) Dental adhesion review: aging and stability of the bonded interface. *Dent Mater* **24**(1), 90-101.
- Butz F, Lennon AM, Heydecke G, Strub JR (2001) Survival rate and fracture strength of endodontically treated maxillary incisors with moderate defects restored with

- different post-and-core systems: an in vitro study. *Int J Prosthodont* **14**(1), 58-64.
- Cadenaro M, Antonioli F, Sauro S *et al.* (2005) Degree of conversion and permeability of dental adhesives. *Eur J Oral Sci* **113**(6), 525-530.
- Cadenaro M, Breschi L, Rueggeberg FA *et al.* (2009) Effect of adhesive hydrophilicity and curing time on the permeability of resins bonded to water vs. ethanol-saturated acid-etched dentin. *Dent Mater* **25**(1), 39-47.
- Cagidiaco MC, Garcia-Godoy F, Vichi A, Grandini S, Goracci C, Ferrari M (2008) Placement of fiber prefabricated or custom made posts affects the 3-year survival of endodontically treated premolars. *Am J Dent* **21**(3), 179-184.
- Cagidiaco MC, Goracci C, Garcia-Godoy F, Ferrari M (2008) Clinical studies of fiber posts: a literature review. *Int J Prosthodont* **21**(4), 328-336.
- Camargo CH, Siviero M, Camargo SE, de Oliveira SH, Carvalho CA, Valera MC (2007) Topographical, diametral, and quantitative analysis of dentin tubules in the root canals of human and bovine teeth. *J Endod* **33**(4), 422-426.
- Cecchin D, de Almeida JF, Gomes BP, Zaia AA, Ferraz CC (2011) Influence of chlorhexidine and ethanol on the bond strength and durability of the adhesion of the fiber posts to root dentin using a total etching adhesive system. *J Endod* **37**(9), 1310-1315.
- Cecchin D, Giacomini M, Farina AP, Bhering CL, Mesquita MF, Ferraz CC (2014) Effect of chlorhexidine and ethanol on push-out bond strength of fiber posts under cyclic loading. *J Adhes Dent* **16**(1), 87-92.
- Chersoni S, Suppa P, Breschi L *et al.* (2004) Water movement in the hybrid layer after different dentin treatments. *Dent Mater* **20**(9), 796-803.
- Chieruzzi M, Pagano S, Pennacchi M, Lombardo G, D'Errico P, Kenny JM (2012) Compressive and flexural behaviour of fibre reinforced endodontic posts. *J Dent* **40**(11), 968-978.
- Dallari A, Rovatti L (1996) Six years of in vitro/in vivo experience with Composipost. *Compend Contin Educ Dent Suppl*(20), 57-63.
- De Munck J, Mine A, Poitevin A *et al.* (2012) Meta-analytical review of parameters involved in dentin bonding. *J Dent Res* **91**(4), 351-357.
- De Munck J, Van den Steen PE, Mine A *et al.* (2009) Inhibition of enzymatic degradation of adhesive-dentin interfaces. *J Dent Res* **88**(12), 1101-1106.
- De Munck J, Van Landuyt K, Peumans M *et al.* (2005) A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *J Dent Res* **84**(2), 118-132.
- De Munck J, Vargas M, Van Landuyt K, Hikita K, Lambrechts P, Van Meerbeek B (2004) Bonding of an auto-adhesive luting material to enamel and dentin. *Dent Mater* **20**(10), 963-971.
- Dejak B, Mlotkowski A (2013) The influence of ferrule effect and length of cast and FRC posts on the stresses in anterior teeth. *Dent Mater* **29**(9), e227-237.
- Di Febo G, Bedendo A, Romano F, Cairo F, Carnevale G (2015) Fixed prosthodontic treatment outcomes in the long-term management of patients with periodontal disease: a 20-year follow-up report. *Int J Prosthodont* **28**(3), 246-251.
- Dittmann B, Rammelsberg P (2008) Survival of abutment teeth used for telescopic abutment retainers in removable partial dentures. *Int J Prosthodont* **21**(4), 319-321.
- dos Santos Alves Morgan LF, Peixoto RT, de Castro Albuquerque R, Santos Correa MF, de Abreu Poletto LT, Pinotti MB (2008) Light transmission through a translucent fiber post. *J Endod* **34**(3), 299-302.
- Duret B, Reynaud M, Duret F (1990) New concept of coronoradicular reconstruction: the Composipost (1). *Chir Dent Fr* **60**(540), 131-141 contd.

- Eraslan O, Aykent F, Yucel MT, Akman S (2009) The finite element analysis of the effect of ferrule height on stress distribution at post-and-core-restored all-ceramic anterior crowns. *Clin Oral Investig* **13**(2), 223-227.
- Fedorowicz Z, Carter B, de Souza RF, Chaves CA, Nasser M, Sequeira-Byron P (2012) Single crowns versus conventional fillings for the restoration of root filled teeth. *Cochrane Database Syst Rev* **5**, CD009109.
- Ferracane JL, Stansbury JW, Burke FJ (2011) Self-adhesive resin cements - chemistry, properties and clinical considerations. *J Oral Rehabil* **38**(4), 295-314.
- Ferrari M, Cagidiaco MC, Goracci C *et al.* (2007) Long-term retrospective study of the clinical performance of fiber posts. *Am J Dent* **20**(5), 287-291.
- Ferrari M, Vichi A, Fadda GM *et al.* (2012) A randomized controlled trial of endodontically treated and restored premolars. *J Dent Res* **91**(7 Suppl), 72S-78S.
- Figueiredo FE, Martins-Filho PR, Faria ESAL (2015) Do Metal Post-retained Restorations Result in More Root Fractures than Fiber Post-retained Restorations? A Systematic Review and Meta-analysis. *J Endod* **41**(3), 309-316.
- Fokkinga WA, Kreulen CM, Vallittu PK, Creugers NH (2004) A structured analysis of in vitro failure loads and failure modes of fiber, metal, and ceramic post-and-core systems. *Int J Prosthodont* **17**(4), 476-482.
- Forberger N, Gohring TN (2008) Influence of the type of post and core on in vitro marginal continuity, fracture resistance, and fracture mode of lithia disilicate-based all-ceramic crowns. *J Prosthet Dent* **100**(4), 264-273.
- Frassetto A, Navarra CO, Marchesi G *et al.* (2012) Kinetics of polymerization and contraction stress development in self-adhesive resin cements. *Dent Mater* **28**(9), 1032-1039.
- Garbin CA, Spazzin AO, Meira-Junior AD, Loretto SC, Lyra AM, Braz R (2010) Biomechanical behaviour of a fractured maxillary incisor restored with direct composite resin only or with different post systems. *Int Endod J* **43**(12), 1098-1107.
- Gerth HU, Dammaschke T, Zuchner H, Schafer E (2006) Chemical analysis and bonding reaction of RelyX Unicem and Bifix composites--a comparative study. *Dent Mater* **22**(10), 934-941.
- Gillen BM, Looney SW, Gu LS *et al.* (2011) Impact of the quality of coronal restoration versus the quality of root canal fillings on success of root canal treatment: a systematic review and meta-analysis. *J Endod* **37**(7), 895-902.
- Goracci C, Corciolani G, Vichi A, Ferrari M (2008) Light-transmitting ability of marketed fiber posts. *J Dent Res* **87**(12), 1122-1126.
- Goracci C, Sadek FT, Fabianelli A, Tay FR, Ferrari M (2005) Evaluation of the adhesion of fiber posts to intraradicular dentin. *Oper Dent* **30**(5), 627-635.
- Grandini S, Goracci C, Monticelli F, Tay FR, Ferrari M (2005) Fatigue resistance and structural characteristics of fiber posts: three-point bending test and SEM evaluation. *Dent Mater* **21**(2), 75-82.
- Hashimoto M, Ito S, Tay FR *et al.* (2004) Fluid movement across the resin-dentin interface during and after bonding. *J Dent Res* **83**(11), 843-848.
- Heydecke G, Butz F, Strub JR (2001) Fracture strength and survival rate of endodontically treated maxillary incisors with approximal cavities after restoration with different post and core systems: an in-vitro study. *J Dent* **29**(6), 427-433.

- Heydecke G, Peters MC (2002) The restoration of endodontically treated, single-rooted teeth with cast or direct posts and cores: a systematic review. *J Prosthet Dent* **87**(4), 380-386.
- Hikita K, Van Meerbeek B, De Munck J *et al.* (2007) Bonding effectiveness of adhesive luting agents to enamel and dentin. *Dent Mater* **23**(1), 71-80.
- Hommez GM, Coppens CR, De Moor RJ (2002) Periapical health related to the quality of coronal restorations and root fillings. *Int Endod J* **35**(8), 680-689.
- Ikeda T, De Munck J, Shirai K *et al.* (2005) Effect of evaporation of primer components on ultimate tensile strengths of primer-adhesive mixture. *Dent Mater* **21**(11), 1051-1058.
- Ilie N, Simon A (2012) Effect of curing mode on the micro-mechanical properties of dual-cured self-adhesive resin cements. *Clin Oral Investig* **16**(2), 505-512.
- Ito S, Hashimoto M, Wadgaonkar B *et al.* (2005) Effects of resin hydrophilicity on water sorption and changes in modulus of elasticity. *Biomaterials* **26**(33), 6449-6459.
- Jantarat J, Palamara JE, Lindner C, Messer HH (2002) Time-dependent properties of human root dentin. *Dent Mater* **18**(6), 486-493.
- Juloski J, Apicella D, Ferrari M (2014) The effect of ferrule height on stress distribution within a tooth restored with fibre posts and ceramic crown: a finite element analysis. *Dent Mater* **30**(12), 1304-1315.
- Juloski J, Fadda GM, Monticelli F, Fajo-Pascual M, Goracci C, Ferrari M (2014) Four-year Survival of Endodontically Treated Premolars Restored with Fiber Posts. *J Dent Res* **93**(7 suppl), 52S-58S.
- Juloski J, Radovic I, Goracci C, Vulicevic ZR, Ferrari M (2012) Ferrule effect: a literature review. *J Endod* **38**(1), 11-19.
- Kahler B, Swain MV, Moule A (2003) Fracture-toughening mechanisms responsible for differences in work to fracture of hydrated and dehydrated dentine. *J Biomech* **36**(2), 229-237.
- Karna JC (1996) A fiber composite laminate endodontic post and core. *Am J Dent* **9**(5), 230-232.
- King PA, Setchell DJ (1990) An in vitro evaluation of a prototype CFRC prefabricated post developed for the restoration of pulpless teeth. *J Oral Rehabil* **17**(6), 599-609.
- King PA, Setchell DJ, Rees JS (2003) Clinical evaluation of a carbon fibre reinforced carbon endodontic post. *J Oral Rehabil* **30**(8), 785-789.
- Kinney JH, Marshall SJ, Marshall GW (2003) The mechanical properties of human dentin: a critical review and re-evaluation of the dental literature. *Crit Rev Oral Biol Med* **14**(1), 13-29.
- Kinney JH, Pople JA, Marshall GW, Marshall SJ (2001) Collagen orientation and crystallite size in human dentin: a small angle X-ray scattering study. *Calcif Tissue Int* **69**(1), 31-37.
- Kishen A, Asundi A (2002) Photomechanical investigations on post endodontically rehabilitated teeth. *J Biomed Opt* **7**(2), 262-270.
- Kishen A, Kumar GV, Chen NN (2004) Stress-strain response in human dentine: rethinking fracture predilection in postcore restored teeth. *Dent Traumatol* **20**(2), 90-100.
- Kishen A, Ramamurty U, Asundi A (2000) Experimental studies on the nature of property gradients in the human dentine. *J Biomed Mater Res* **51**(4), 650-659.
- Kitzmuller K, Graf A, Watts D, Schedle A (2011) Setting kinetics and shrinkage of self-adhesive resin cements depend on cure-mode and temperature. *Dent Mater* **27**(6), 544-551.

- Kolosowski KP, Sodhi RN, Kishen A, Basrani BR (2014) Qualitative analysis of precipitate formation on the surface and in the tubules of dentin irrigated with sodium hypochlorite and a final rinse of chlorhexidine or QMiX. *J Endod* **40**(12), 2036-2040.
- Kolpin M, Sterzenbach G, Naumann M (2014) Composite filling or single crown? The clinical dilemma of how to restore endodontically treated teeth. *Quintessence Int* **45**(6), 457-466.
- Krishan R, Paque F, Ossareh A, Kishen A, Dao T, Friedman S (2014) Impacts of conservative endodontic cavity on root canal instrumentation efficacy and resistance to fracture assessed in incisors, premolars, and molars. *J Endod* **40**(8), 1160-1166.
- Kruzic JJ, Nalla RK, Kinney JH, Ritchie RO (2003) Crack blunting, crack bridging and resistance-curve fracture mechanics in dentin: effect of hydration. *Biomaterials* **24**(28), 5209-5221.
- Lang H, Korkmaz Y, Schneider K, Raab WH (2006) Impact of endodontic treatments on the rigidity of the root. *J Dent Res* **85**(4), 364-368.
- Lattaa MA (2007) Shear bond strength and physicochemical interactions of XP Bond. *J Adhes Dent* **9 Suppl 2**, 245-248.
- Leevailoj C, Platt JA, Cochran MA, Moore BK (1998) In vitro study of fracture incidence and compressive fracture load of all-ceramic crowns cemented with resin-modified glass ionomer and other luting agents. *J Prosthet Dent* **80**(6), 699-707.
- Lertchirakarn V, Palamara JE, Messer HH (2003) Finite element analysis and strain-gauge studies of vertical root fracture. *J Endod* **29**(8), 529-534.
- Lindblad RM, Lassila LV, Salo V, Vallittu PK, Tjaderhane L (2012) One year effect of chlorhexidine on bonding of fibre-reinforced composite root canal post to dentine. *J Dent* **40**(9), 718-722.
- Liu Y, Tjaderhane L, Breschi L *et al.* (2011) Limitations in bonding to dentin and experimental strategies to prevent bond degradation. *J Dent Res* **90**(8), 953-968.
- Mair L, Padipatvuthikul P (2010) Variables related to materials and preparing for bond strength testing irrespective of the test protocol. *Dent Mater* **26**(2), e17-23.
- Malyk Y, Kaaden C, Hickel R, Ilie N (2010) Analysis of resin tags formation in root canal dentine: a cross sectional study. *Int Endod J* **43**(1), 47-56.
- Mancebo JC, Jimenez-Castellanos E, Canadas D (2010) Effect of tooth type and ferrule on the survival of pulpless teeth restored with fiber posts: a 3-year clinical study. *Am J Dent* **23**(6), 351-356.
- Mangold JT, Kern M (2011) Influence of glass-fiber posts on the fracture resistance and failure pattern of endodontically treated premolars with varying substance loss: an in vitro study. *J Prosthet Dent* **105**(6), 387-393.
- Marshall GW, Jr. (1993) Dentin: microstructure and characterization. *Quintessence Int* **24**(9), 606-617.
- Martin N, Jedyakiewicz NM, Fisher AC (2003) Hygroscopic expansion and solubility of composite restoratives. *Dent Mater* **19**(2), 77-86.
- Mazzitelli C, Papacchini F, Monticelli F, Toledano M, Ferrari M (2012) Effects of post surface treatments on the bond strength of self-adhesive cements. *Am J Dent* **25**(3), 159-164.
- Mazzoni A, Marchesi G, Cadenaro M *et al.* (2009) Push-out stress for fibre posts luted using different adhesive strategies. *Eur J Oral Sci* **117**(4), 447-453.
- Mazzoni A, Tjaderhane L, Checchi V *et al.* (2015) Role of dentin MMPs in caries progression and bond stability. *J Dent Res* **94**(2), 241-251.

- Mjor IA (2007) Minimum requirements for new dental materials. *J Oral Rehabil* **34**(12), 907-912.
- Mjor IA, Nordahl I (1996) The density and branching of dentinal tubules in human teeth. *Arch Oral Biol* **41**(5), 401-412.
- Mjor IA, Smith MR, Ferrari M, Mannocci F (2001) The structure of dentine in the apical region of human teeth. *Int Endod J* **34**(5), 346-353.
- Montagner AF, Sarkis-Onofre R, Pereira-Cenci T, Cenci MS (2014) MMP Inhibitors on Dentin Stability: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res* **93**(8), 733-743.
- Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M (2003) Clinical behavior of translucent-fiber posts: a 2-year prospective study. *Int J Prosthodont* **16**(6), 593-596.
- 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**(1), 44-47.
- Naumann M, Blankenstein F, Barthel CR (2006) A new approach to define defect extensions of endodontically treated teeth: inter- and intra-examiner reliability. *J Oral Rehabil* **33**(1), 52-58.
- Naumann M, Koelpin M, Beuer F, Meyer-Lueckel H (2012) 10-year Survival Evaluation for Glass-fiber-supported Postendodontic Restoration: A Prospective Observational Clinical Study. *J Endod* **38**(4), 432-435.
- Naumann M, Lange K-P (2003) Ansichten und Techniken zur Rekonstruktion endodontisch behandelter Zähne- eine Umfrage unter Zahnärzten im Bundesgebiet. *DZZ* **58**(5), 280-285.
- Naumann M, Metzdorf G, Fokkinga W *et al.* (2009) Influence of test parameters on in vitro fracture resistance of post-endodontic restorations: a structured review. *J Oral Rehabil* **36**(4), 299-312.
- Naumann M, Preuss A, Rosentritt M (2006) Effect of incomplete crown ferrules on load capacity of endodontically treated maxillary incisors restored with fiber posts, composite build-ups, and all-ceramic crowns: an in vitro evaluation after chewing simulation. *Acta Odontol Scand* **64**(1), 31-36.
- Naumann M, Reich S, Nothdurft FP, Beuer F, Schirmermeister JF, Dietrich T (2008) Survival of glass fiber post restorations over 5 years. *Am J Dent* **21**(4), 267-272.
- Naumann M, Sterzenbach G, Proschel P (2005) Evaluation of load testing of postendodontic restorations in vitro: linear compressive loading, gradual cycling loading and chewing simulation. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* **74**(2), 829-834.
- Naumann M, Sterzenbach G, Rosentritt M, Beuer F, Frankenberger R (2008) Is adhesive cementation of endodontic posts necessary? *J Endod* **34**(8), 1006-1010.
- Naumann M, Sterzenbach G, Rosentritt M, Beuer F, Frankenberger R (2010) In vitro performance of self-adhesive resin cements for post-and-core build-ups: influence of chewing simulation or 1-year storage in 0.5% chloramine solution. *Acta Biomater* **6**(11), 4389-4395.
- Newman MP, Yaman P, Dennison J, Rafter M, Billy E (2003) Fracture resistance of endodontically treated teeth restored with composite posts. *J Prosthet Dent* **89**(4), 360-367.
- Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2008) Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature -- Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J* **41**(1), 6-31.
- Oyar P (2014) The effects of post-core and crown material and luting agents on stress distribution in tooth restorations. *J Prosthet Dent* **112**(2), 211-219.



- Parisi C, Valandro LF, Ciocca L, Gatto MR, Baldissara P (2015) Clinical outcomes and success rates of quartz fiber post restorations: A retrospective study. *J Prosthet Dent* **114**(3), 367-372.
- Pashley DH (1984) Smear layer: physiological considerations. *Oper Dent Suppl* **3**, 13-29.
- Pashley DH, Livingston MJ, Greenhill JD (1978) Regional resistances to fluid flow in human dentine in vitro. *Arch Oral Biol* **23**(9), 807-810.
- Pashley DH, Livingston MJ, Reeder OW, Horner J (1978) Effects of the degree of tubule occlusion on the permeability of human dentine in vitro. *Arch Oral Biol* **23**(12), 1127-1133.
- Pashley DH, Michelich V, Kehl T (1981) Dentin permeability: effects of smear layer removal. *J Prosthet Dent* **46**(5), 531-537.
- Pashley DH, Tay FR, Breschi L *et al.* (2011) State of the art etch-and-rinse adhesives. *Dent Mater* **27**(1), 1-16.
- Pashley DH, Tay FR, Yiu C *et al.* (2004) Collagen degradation by host-derived enzymes during aging. *J Dent Res* **83**(3), 216-221.
- Perdigao J (2010) Dentin bonding-variables related to the clinical situation and the substrate treatment. *Dent Mater* **26**(2), e24-37.
- Perdigao J, Gomes G, Lee IK (2006) The effect of silane on the bond strengths of fiber posts. *Dent Mater* **22**(8), 752-758.
- Piovesan EM, Demarco FF, Cenci MS, Pereira-Cenci T (2007) Survival rates of endodontically treated teeth restored with fiber-reinforced custom posts and cores: a 97-month study. *Int J Prosthodont* **20**(6), 633-639.
- Pjetursson BE, Tan K, Lang NP, Bragger U, Egger M, Zwahlen M (2004) A systematic review of the survival and complication rates of fixed partial dentures (FPDs) after an observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res* **15**(6), 667-676.
- Purton DG, Love RM (1996) Rigidity and retention of carbon fibre versus stainless steel root canal posts. *Int Endod J* **29**(4), 262-265.
- Purton DG, Payne JA (1996) Comparison of carbon fiber and stainless steel root canal posts. *Quintessence Int* **27**(2), 93-97.
- Radovic I, Mazzitelli C, Chieffi N, Ferrari M (2008) Evaluation of the adhesion of fiber posts cemented using different adhesive approaches. *Eur J Oral Sci* **116**(6), 557-563.
- Radovic I, Monticelli F, Goracci C, Vulicevic ZR, Ferrari M (2008) Self-adhesive resin cements: a literature review. *J Adhes Dent* **10**(4), 251-258.
- Rasimick BJ, Wan J, Musikant BL, Deutsch AS (2010) A review of failure modes in teeth restored with adhesively luted endodontic dowels. *J Prosthodont* **19**(8), 639-646.
- Ray HA, Trope M (1995) Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration. *Int Endod J* **28**(1), 12-18.
- Reeh ES, Messer HH, Douglas WH (1989) Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod* **15**(11), 512-516.
- Ruttermann S, Alberts I, Raab WH, Janda RR (2011) Physical properties of self-, dual-, and light-cured direct core materials. *Clin Oral Investig* **15**(4), 597-603.
- Ruttermann S, Kruger S, Raab WH, Janda R (2007) Polymerization shrinkage and hygroscopic expansion of contemporary posterior resin-based filling materials-a comparative study. *J Dent* **35**(10), 806-813.

- Sadek FT, Braga RR, Muench A, Liu Y, Pashley DH, Tay FR (2010) Ethanol wet-bonding challenges current anti-degradation strategy. *J Dent Res* **89**(12), 1499-1504.
- Salz U, Zimmermann J, Zeuner F, Moszner N (2005) Hydrolytic stability of self-etching adhesive systems. *J Adhes Dent* **7**(2), 107-116.
- Samran A, El Bahra S, Kern M (2013) The influence of substance loss and ferrule height on the fracture resistance of endodontically treated premolars. An in vitro study. *Dent Mater* **29**(12), 1280-1286.
- Santos-Filho PC, Verissimo C, Raposo LH, Noritomi MecEng PY, Marcondes Martins LR (2014) Influence of ferrule, post system, and length on stress distribution of weakened root-filled teeth. *J Endod* **40**(11), 1874-1878.
- Santos-Filho PC, Verissimo C, Soares PV, Saltarello RC, Soares CJ, Marcondes Martins LR (2014) Influence of ferrule, post system, and length on biomechanical behavior of endodontically treated anterior teeth. *J Endod* **40**(1), 119-123.
- Santos AF, Meira JB, Tanaka CB *et al.* (2010) Can fiber posts increase root stresses and reduce fracture? *J Dent Res* **89**(6), 587-591.
- Sarkis-Onofre R, Skupien JA, Cenci MS, Moraes RR, Pereira-Cenci T (2014) The role of resin cement on bond strength of glass-fiber posts luted into root canals: a systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Oper Dent* **39**(1), E31-44.
- Saskalauskaite E, Tam LE, McComb D (2008) Flexural strength, elastic modulus, and pH profile of self-etch resin luting cements. *J Prosthodont* **17**(4), 262-268.
- Satterthwaite JD, Vogel K, Watts DC (2009) Effect of resin-composite filler particle size and shape on shrinkage-strain. *Dent Mater* **25**(12), 1612-1615.
- Sauro S, Toledano M, Aguilera FS *et al.* (2010) Resin-dentin bonds to EDTA-treated vs. acid-etched dentin using ethanol wet-bonding. *Dent Mater* **26**(4), 368-379.
- Schmitter M, Hamadi K, Rammelsberg P (2011) Survival of two post systems--five-year results of a randomized clinical trial. *Quintessence Int* **42**(10), 843-850.
- 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**(2), 173-178.
- Schmitter M, Rammelsberg P, Lenz J, Scheuber S, Schweizerhof K, Rues S (2010) Teeth restored using fiber-reinforced posts: in vitro fracture tests and finite element analysis. *Acta Biomater* **6**(9), 3747-3754.
- Schmitter M, Sterzenbach G, Faggion CM, Jr., Krastl G (2013) A flood tide of systematic reviews on endodontic posts: methodological assessment using of R-AMSTAR. *Clin Oral Investig* **17**(5), 1287-1294.
- Schulz KF, Altman DG, Moher D (2010) CONSORT 2010 statement: updated guidelines for reporting parallel group randomised trials. *Bmj* **340**, c332.
- Schwartz RS, Fransman R (2005) Adhesive dentistry and endodontics: materials, clinical strategies and procedures for restoration of access cavities: a review. *J Endod* **31**(3), 151-165.
- Schwartz RS, Robbins JW, Solomon CS *et al.* (2004) Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review. *J Endod* **30**(5), 289-301.
- Seefeld F, Wenz HJ, Ludwig K, Kern M (2007) Resistance to fracture and structural characteristics of different fiber reinforced post systems. *Dent Mater* **23**(3), 265-271.
- Sequeira-Byron P, Fedorowicz Z, Carter B, Nasser M, Alrowaili EF (2015) Single crowns versus conventional fillings for the restoration of root-filled teeth. *Cochrane Database Syst Rev* **9**, CD009109.

- 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**(3), 381-387.
- Sideridou I, Tserki V, Papanastasiou G (2003) Study of water sorption, solubility and modulus of elasticity of light-cured dimethacrylate-based dental resins. *Biomaterials* **24**(4), 655-665.
- Sidoli GE, King PA, Setchell DJ (1997) An in vitro evaluation of a carbon fiber-based post and core system. *J Prosthet Dent* **78**(1), 5-9.
- Signore A, Kaitsas V, Ravera G, Angiero F, Benedicenti S (2011) Clinical evaluation of an oval-shaped prefabricated glass fiber post in endodontically treated premolars presenting an oval root canal cross-section: a retrospective cohort study. *Int J Prosthodont* **24**(3), 255-263.
- Sindel J, Frankenberger R, Kramer N, Petschelt A (1999) Crack formation of all-ceramic crowns dependent on different core build-up and luting materials. *J Dent* **27**(3), 175-181.
- Sirimai S, Riis DN, Morgano SM (1999) An in vitro study of the fracture resistance and the incidence of vertical root fracture of pulpless teeth restored with six post-and-cores systems. *J Prosthet Dent* **81**(3), 262-269.
- Soares CJ, Raposo LH, Soares PV *et al.* (2010) Effect of different cements on the biomechanical behavior of teeth restored with cast dowel-and-cores-in vitro and FEA analysis. *J Prosthodont* **19**(2), 130-137.
- Sorensen JA, Engelman MJ (1990) Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* **63**(5), 529-536.
- Spinell T, Schedle A, Watts DC (2009) Polymerization shrinkage kinetics of dimethacrylate resin-cements. *Dent Mater* **25**(8), 1058-1066.
- Stankiewicz NR, Wilson PR (2002) The ferrule effect: a literature review. *Int Endod J* **35**(7), 575-581.
- Strub JR, Pontius O, Koutayas S (2001) Survival rate and fracture strength of incisors restored with different post and core systems after exposure in the artificial mouth. *J Oral Rehabil* **28**(2), 120-124.
- Tan K, Pjetursson BE, Lang NP, Chan ES (2004) A systematic review of the survival and complication rates of fixed partial dentures (FPDs) after an observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res* **15**(6), 654-666.
- Tang W, Wu Y, Smales RJ (2010) Identifying and reducing risks for potential fractures in endodontically treated teeth. *J Endod* **36**(4), 609-617.
- Tay FR, Carvalho RM, Pashley DH (2004) Water movement across bonded dentin - too much of a good thing. *J Appl Oral Sci* **12**(spe), 12-25.
- 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**(8), 584-589.
- Tay FR, Pashley DH (2001) Aggressiveness of contemporary self-etching systems. I: Depth of penetration beyond dentin smear layers. *Dent Mater* **17**(4), 296-308.
- Tay FR, Pashley DH (2007) Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod* **33**(4), 391-398.
- Theodosopoulou JN, Chochlidakis KM (2009) A systematic review of dowel (post) and core materials and systems. *J Prosthodont* **18**(6), 464-472.
- Van Landuyt KL, De Munck J, Mine A, Cardoso MV, Peumans M, Van Meerbeek B (2010) Filler debonding & subhybrid-layer failures in self-etch adhesives. *J Dent Res* **89**(10), 1045-1050.

- Van Landuyt KL, Snauwaert J, De Munck J *et al.* (2007) Origin of interfacial droplets with one-step adhesives. *J Dent Res* **86**(8), 739-744.
- Van Landuyt KL, Snauwaert J, De Munck J *et al.* (2007) Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. *Biomaterials* **28**(26), 3757-3785.
- Van Meerbeek B, De Munck J, Yoshida Y *et al.* (2003) Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent* **28**(3), 215-235.
- Van Meerbeek B, Yoshihara K, Yoshida Y, Mine A, De Munck J, Van Landuyt KL (2011) State of the art of self-etch adhesives. *Dent Mater* **27**(1), 17-28.
- Van Nieuwenhuysen JP, D'Hoore W, Carvalho J, Qvist V (2003) Long-term evaluation of extensive restorations in permanent teeth. *J Dent* **31**(6), 395-405.
- Vano M, Goracci C, Monticelli F *et al.* (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**(1), 31-39.
- Verissimo C, Simamoto Junior PC, Soares CJ, Noritomi PY, Santos-Filho PC (2014) Effect of the crown, post, and remaining coronal dentin on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary central incisors. *J Prosthet Dent* **111**(3), 234-246.
- Vrochari AD, Eliades G, Hellwig E, Wrbas KT (2010) Water sorption and solubility of four self-etching, self-adhesive resin luting agents. *J Adhes Dent* **12**(1), 39-43.
- Wang Y, Spencer P (2005) Continuing etching of an all-in-one adhesive in wet dentin tubules. *J Dent Res* **84**(4), 350-354.
- Wrbas KT, Altenburger MJ, Schirrmeister JF, Bitter K, Kielbassa AM (2007) Effect of adhesive resin cements and post surface silanization on the bond strengths of adhesively inserted fiber posts. *J Endod* **33**(7), 840-843.
- Wu MK, van der Sluis LW, Wesselink PR (2004) Comparison of mandibular premolars and canines with respect to their resistance to vertical root fracture. *J Dent* **32**(4), 265-268.
- Yang A, Lamichhane A, Xu C (2015) Remaining coronal dentin and risk of fiber-reinforced composite post-core restoration failure: a meta-analysis. *Int J Prosthodont* **28**(3), 258-264.
- Yang B, Ludwig K, Adelung R, Kern M (2006) Micro-tensile bond strength of three luting resins to human regional dentin. *Dent Mater* **22**(1), 45-56.
- Yiu CK, Pashley EL, Hiraishi N *et al.* (2005) Solvent and water retention in dental adhesive blends after evaporation. *Biomaterials* **26**(34), 6863-6872.
- Yoshida Y, Nagakane K, Fukuda R *et al.* (2004) Comparative study on adhesive performance of functional monomers. *J Dent Res* **83**(6), 454-458.
- Zhang SC, Kern M (2009) The role of host-derived dentinal matrix metalloproteinases in reducing dentin bonding of resin adhesives. *Int J Oral Sci* **1**(4), 163-176.
- Zhang Z, Beitzel D, Mutluay M, Tay FR, Pashley DH, Arola D (2015) On the durability of resin-dentin bonds: Identifying the weakest links. *Dent Mater* **31**(9), 1109-1118.
- Zicari F, Coutinho E, De Munck J *et al.* (2008) Bonding effectiveness and sealing ability of fiber-post bonding. *Dent Mater* **24**(7), 967-977.
- Zicari F, Coutinho E, Scotti R, Van Meerbeek B, Naert I (2013) Mechanical properties and micro-morphology of fiber posts. *Dent Mater* **29**(4), e45-52.
- Zicari F, De Munck J, Scotti R, Naert I, Van Meerbeek B (2012) Factors affecting the cement-post interface. *Dent Mater* **28**(3), 287-297.
- Zicari F, Van Meerbeek B, Debels E, Lesaffre E, Naert I (2011) An up to 3-Year Controlled Clinical Trial Comparing the Outcome of Glass Fiber Posts and

- Composite Cores with Gold Alloy-Based Posts and Cores for the Restoration of Endodontically Treated Teeth. *Int J Prosthodont* **24**(4), 363-372.
- Zicari F, Van Meerbeek B, Scotti R, Naert I (2013) Effect of ferrule and post placement on fracture resistance of endodontically treated teeth after fatigue loading. *J Dent* **41**(3), 207-215.
- Zorzin J, Petschelt A, Ebert J, Lohbauer U (2012) pH neutralization and influence on mechanical strength in self-adhesive resin luting agents. *Dent Mater* **28**(6), 672-679.

## **8. VOTUM DER ETHIKKOMMISSION**

Das Studienprotokoll der klinischen Studie wurde von der Ethikkommission der Charité-Universitätsmedizin Berlin geprüft (CCM 03.02.2003 RelyX Unicem) und bestätigt. Die Untersuchung wurde entsprechend der überarbeiteten Fassung des CONSORT 2010 Statement durchgeführt und ausgewertet (Schulz Altman et al. 2010) und ist in der Studiendatenbank *clinicaltrials.gov*, Nummer NCT01520766 registriert.

## 9. DANKSAGUNGEN

Meinem Abteilungsleiter Herrn Prof. Dr. Florian Beuer, MME gilt mein Dank für seine vertrauensvolle Unterstützung im Zuge der Erstellung dieser Habilitationsschrift und in meine weiterführende wissenschaftliche und lehrende Tätigkeit.

Ich danke Frau OÄ Priv.-Doz. Dr. Ingrid Peroz, die als kommissarische Leiterin unserer Abteilung, mir die wissenschaftliche Arbeit an diesem Thema in den vergangenen Jahren trotz aller personellen Engpässe ermöglicht hat.

Mein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Naumann. Lieber Micha, du hast, anfangs als Betreuer meiner Doktorarbeit, mir das wissenschaftliche Arbeiten und Denken, das Infrage stellen und selbstkritische Reflektieren vorgelebt. Über viele Jahre haben wir gemeinsam zahlreiche Studien konzipiert und realisiert, ausgewertet und diskutiert und sind, was mir noch viel mehr bedeutet, über unsere Freude an der gemeinsamen Arbeit enge Freunde geworden. Ich empfinde all das als großes Glück.

Ebenso danke ich Frau OÄ Priv.-Doz. Dr. Kerstin Bitter. Wir konnten in gemeinsamen Studien wesentliche Erkenntnisse dieser Arbeit gewinnen und dank unserer verschiedenen, sich ergänzenden Fachrichtungen differenziert bewerten. Liebe Kerstin, für die vielen Stunden anregender Gespräche mit dir, die unsere Freundschaft begründeten, bin ich sehr dankbar.

Die gewissenhafte Arbeit der Promovendinnen und Promovenden und die Unterstützung vieler Kolleginnen und Kollegen war mir stets eine große Hilfe. Ich danke allen Koautoren und insbesondere: OA Dr. Felix Blankenstein, OA Dr. Uwe Blunck, ZÄ Alexandra Franke, ZTM Uz Hetzelberger, ZA Ghaleb Karajouli, Dr. Manja von Stein-Lausnitz, ZT Jana Lück, Prof. Dr. Dipl.-Ing. (FH) Martin Rosentritt und Dr. Rene Tunjan.

Liebe Sille, ohne deine Aufmunterungen und Unterstützung hätte ich diesen Weg nicht gehen können. Vielen Dank!

## ERKLÄRUNG

§ 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.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

.....

Datum

.....

Unterschrift