

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

DISSERTATION

**Der Effekt der Silanisierung  
auf die Haftung zwischen Aufbaumaterialien und  
verschiedenen faserverstärkten Kompositwurzelkanalstiften**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Martin Köppen

aus Parchim

Gutachter: 1. Prof. Dr. A. M. Kielbassa

2. Prof. Dr. I. Nergiz

3. Prof. Dr. M. Naumann

Datum der Promotion: 05.06.2011

**Anzeige einer Publikation**

Bitter K., Neumann K., Kielbassa A. M.: "Effects of pretreatment and thermocycling on bond strength of resin core materials to various fiber-reinforced composite posts."  
J Adhes Dent, 2008; 10: 481- 489.

Meinen Eltern

## Inhaltsverzeichnis

Anzeige einer Publikation.....	III
1. Einleitung .....	8
2. Literaturübersicht.....	9
2.1 Stiftversorgung in der restaurativen Zahnheilkunde .....	9
2.2 Wurzelkanalstiftsysteme.....	10
2.2.1 Metallische Wurzelkanalstifte .....	11
2.2.2 Keramische Wurzelkanalstifte .....	13
2.2.3 Faserverstärkte Stifte.....	14
2.2.4 Karbonfaserverstärkte Kunststoffstifte.....	15
2.2.5 Glas- und quarzfaserverstärkte Kunststoffstifte .....	16
2.3 Komposit als Aufbaumaterial.....	19
2.4 Oberflächenvorbehandlung von Faserstiften.....	21
2.4.1 Mechanische und chemomechanische Vorbehandlungen.....	22
2.4.2 Chemische Vorbehandlungen.....	23
3. Fragestellungen und Zielsetzung der Arbeit.....	26
4. Material und Methoden.....	27
4.1 Material .....	27
4.1.1 Stiftsysteme.....	27
4.1.2 Kompositaufbaumaterialien .....	30
4.1.3 Haftvermittler.....	32
4.2 Methoden .....	35
4.2.1 Probenherstellung.....	36
4.2.2 Probenaufbewahrung .....	40
4.2.3 Ermittlung der Haftwerte .....	41
4.2.4 Optische Bruchflächenanalyse.....	42
4.2.5 REM-Aufnahmen der Faserstifte .....	43
4.2.6 Statistik .....	43
5. Ergebnisse .....	45
5.1 Statistische Auswertung .....	45
5.1.1 Einfluss der Vorbehandlung auf die Haftkraft .....	46
5.1.2 Einfluss der Komposite auf die Haftkraft .....	47

---

5.1.3 Optische Bruchflächenanalyse.....	48
5.2 REM-Aufnahmen der Wurzelstifte .....	51
6. Diskussion .....	54
6.1 Diskussion von Material und Methoden.....	54
6.1.1 Herstellung der Prüfkörper .....	54
6.1.2 Thermozyklische Wechselbelastung.....	55
6.1.3 Ausstoßversuch und Einfluss der Probenschichtdicke.....	56
6.2.1 Einfluss der Faserstifte.....	57
6.2.2 Einfluss der Silanisierung.....	58
6.2.3 Einfluss der thermischen Wechselbelastung.....	60
6.2.4 Einfluss des Kompositstyps.....	62
6.2.5 Analyse des Versagensmodus.....	63
7. Schlussfolgerung.....	64
8. Zusammenfassung.....	65
9. Abstract.....	67
10. Literaturverzeichnis .....	69
11. Anhang.....	78
11.1 Abkürzungsverzeichnis.....	78
11.2 Liste der verwendeten Materialien.....	79
11.3 Tabellenverzeichnis .....	79
11.4 Abbildungsverzeichnis.....	80
11.5 Danksagung .....	81
11.6 Lebenslauf.....	82
11.7 Eidesstattliche Erklärung.....	83

## 1. Einleitung

Seit der Einführung von faserverstärkten Wurzelkanalstiften auf dem Dentalmarkt im Jahr 1990 [DURET *et al.* 1990] werden zahlreiche Stiftsysteme von unterschiedlichen Herstellern angeboten. Wurzelkanalstifte aus faserverstärkten Kompositen besitzen günstige biomechanische Eigenschaften. Als ihr größter Vorteil gilt das dentinähnliche Elastizitätsmodul, welches das Risiko einer Wurzelfraktur erheblich verringern soll [ASMUSSEN *et al.* 1999; PEGORETTI *et al.* 2002].

Bisher gibt es nur wenige Informationen aus kontrollierten prospektiven Studien über das klinische Verhalten von faserverstärkten Wurzelkanalstiften. Im Gegensatz zu einigen vielversprechenden Untersuchungen [MALFERRARI *et al.* 2003; MONTICELLI *et al.* 2003; GRANDINI *et al.* 2005] wiesen beispielsweise in einer klinischen Studie die mit faserverstärkten Wurzelstiften gefertigten adhäsiven Aufbauten nach 36 Monaten eine Überlebensrate von 76,7 % auf [Cagidiaco *et al.* 2008]. Ursachen für das Versagen waren dabei Stiffbrakturen und Retentionsverlust zwischen Faserstift und Aufbaukomposit sowie Dezementierungen der faserverstärkten Wurzelkanalstifte.

Einige Studien haben gezeigt, dass durch eine Vorbehandlung der faserverstärkten Wurzelkanalstifte mit unterschiedlichen Techniken, wie etwa der Konditionierung mit einem Silan, eine Verbesserung des Haftverbundes erzielt werden kann [AKSORNMUANG *et al.* 2004; GORACCI *et al.* 2005]. Die Effekte der Silanisierung auf den Haftverbund werden aufgrund unterschiedlicher Studienergebnisse in der Literatur kontrovers diskutiert [PERDIGAO *et al.* 2006; BITTER *et al.* 2007]. Darüber hinaus könnten die Auswirkungen der Silanisierung auf den Haftverbund sowohl durch verschiedene Materialkombinationen wie auch durch die Verwendung unterschiedlicher Stifftypen beziehungsweise Aufbaukomposite beeinflusst werden.

Zudem gibt es bisher nur wenige Informationen über das Langzeitverhalten verschiedener Materialkombinationen und deren Haftverbund. Solche Informationen sind jedoch erforderlich, um verlässliche klinische Prognosen über die dauerhafte Festigkeit von faserverstärkten Stiffaufbauten machen zu können.

In der vorliegenden Studie sollten daher die Silanisierung als Vorbehandlungsmethode und ihre Effekte auf den Haftverbund von Stiffoberfläche und Aufbaukomposit unter Berücksichtigung mehrerer Materialkombinationen untersucht werden. Des weiteren sollen die Auswirkungen einer Langzeitbelastung, simuliert durch thermische Wechselbelastung, Rückschlüsse über das klinische Langzeitverhalten dieser ermöglichen.

## 2. Literaturübersicht

### 2.1 Stiftversorgung in der restaurativen Zahnheilkunde

Zähne sind hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt, die in Form von Druck-, Zug- und Scherkräften auf die Zahnhartsubstanz einwirken [HEIDEMANN und WEIGL 2004]. Aufgrund der fehlenden pulpalen Mechanorezeptoren sowie dem daraus resultierenden geringeren Eigenschutz endodontisch behandelter Zähne kommt deren Rekonstruktion mit Stiftaufbauten eine besondere Bedeutung zu. Der Aufbau endodontisch behandelter Zähne soll unter Schonung von möglichst viel gesunder Zahnhartsubstanz für eine dauerhafte Verankerung einer definitive Restauration sorgen [DGZMK 2003].

Dabei ist zu beachten, dass Wurzelkanalstifte vorrangig der Retention des Aufbaus dienen und es durch die Vorbohrung für die Wurzelkanalstifte zu einer weiteren Schwächung kommt [LANG *et al.* 2006]. Aufgrund jener zusätzlichen Schwächung sind Wurzelkanalstifte somit nicht in der Lage, die Festigkeit endodontisch behandelter Zähne zu erhöhen [DGZMK 2003]. Folglich ist es erforderlich, bei der Rekonstruktion Materialien zu verwenden, die einerseits zu einer gleichmäßigen Verteilung der Kaukräfte auf die Zahnrestsubstanz führen und andererseits der erhöhten Belastung endodontisch behandelter Zähne überhaupt standhalten [RANDOW und GLANTZ 1986].

Um die auftretenden Kräfte gleichmäßig auf die Restzahnschubstanz zu verteilen, ist die Indikation für eine Stiftversorgung und deren Dimensionierung sorgfältig abzuwägen, da die Stiftversorgung selbst ebenfalls das Risiko einer Wurzel- und Stiffraktur in sich birgt [STOCKTON *et al.* 1999]. Die im Wurzelkanal verankerten Stifte können durch das unterschiedliche Elastizitätsverhalten von Dentin und Stiftmaterial Spannungsspitzen hervorrufen, aus denen bei zu großer Belastung Wurzelfrakturen resultieren können [HEIDEMANN und WEIGL 2004]. Um die Gefahr von Wurzelfrakturen zu reduzieren, soll der im Wurzelkanal befestigte Stift die auf den Zahnstumpf treffenden Kräfte abfangen und möglichst gleichmäßig auf den Zahn verteilen [MENTINK *et al.* 1993]. Bei kleineren Defekten und bei ausreichend vorhandener sowie stabiler Zahnhartsubstanz zur Verankerung ermöglicht die Adhäsivtechnik auch Restaurationen ohne die Verwendung von Wurzelkanalstiften [HEIDEMANN und WEIGL 2004].

Daher sollten, entsprechend der DGZMK-Stellungnahme und der Klassifikation nach Naumann, vor einer prothetischen Therapie ausschließlich Zähne mit Wurzelstiften versorgt werden, die einen Defekt von mehr als zwei Drittel der bukkoralen Distanz, nur einen oder gar keinen verbleibenden Höcker bzw. Dentinwände unter 2 mm Höhe aufweisen [DGZMK 2003; NAUMANN *et al.* 2003; NERGIZ und SCHMAGE 2004]. Denn in derartigen Fällen bietet das Ausmaß des

Zahnhartsubstanzdefektes keine ausreichende Möglichkeit mehr, das Aufbaumaterial zu befestigen. Zur Retentionserhöhung ist hier vielmehr das Einbringen eines Stiftes im Wurzelkanal erforderlich, um eine permanente Verankerung der Krone und genügend Stabilität zu gewährleisten [MENTINK *et al.* 1993; ROBBINS *et al.* 2002; FERNANDES und SHETTY 2003].

Die Stabilität eines adhäsiven Kompositaufbaus wird signifikant durch die Anzahl der verbleibenden koronalen Dentinwände beeinflusst. Dies zeigt sich in einer klinischen Studie [FERRARI *et al.* 2007], in der endodontisch behandelte Prämolaren verschiedener Destruktionsgrade entweder mit Faserstiften (DT Light Post) sowie mit adhäsivem Aufbau oder ausschließlich mit einem adhäsivem Aufbau versorgt und anschließend überkront wurden. Die zusätzlich mit einem Faserstift versorgten Prämolaren wiesen nach zwei Jahren mit 95,2 % eine deutlich höhere Überlebensrate auf. Die rein adhäsiv versorgten Prämolaren zeigten mit 70 % nach der gleichen Zeit eine deutlich geringere Überlebensrate. Übereinstimmend mit anderen Studien [AKKAYAN 2004; NAUMANN *et al.* 2005; BITTER *et al.* 2009] wurden zudem Dezementierungen und Frakturen hauptsächlich bei Prämolaren mit weniger als drei verbleibenden koronalen Dentinwänden beobachtet.

Zu ähnlichen Ergebnissen kam Cagidiaco in einer neueren klinischen Studie [CAGIDIACO *et al.* 2008]. Wie in der oben erwähnten Untersuchung wurden auch hier endodontisch behandelte Prämolaren mit unterschiedlichen Destruktionsgraden teilweise mit Faserstiften und adhäsivem Aufbau sowie teilweise nur mit einem adhäsivem Aufbau versorgt und später überkront. Cagidiaco verwendete hierbei die individuell formbaren ever Stick Post sowie die vorgefertigten DT Light Post. Nach drei Jahren wiesen die mit einem individuell formbaren Glasfaserstift versorgten Prämolaren eine Überlebensrate von 76,7 % auf. Eine signifikant höhere Überlebensrate (90,9 %) wiesen währenddessen die mit einem vorgefertigten Glasfaserstift versorgten Prämolaren auf. Die gänzlich ohne Faserstift versorgten Prämolaren dagegen erwiesen sich schließlich als deutlich weniger überlebensfähig (62,5 %).

## 2.2 Wurzelkanalstiftsysteme

Dem behandelnden Zahnarzt steht heutzutage für die Versorgung endodontisch behandelter Zähne ein großes Angebot an Wurzelstiften zur Verfügung. Wurzelstifte lassen sich im Hinblick auf verschiedene Kriterien unterscheiden, wie etwa nach Material (Keramik, Metall, Kunststoff), nach Herstellungsart (individuell, präfabriziert) und nach Stiftdesign (aktiv, passiv) [LAUER *et al.* 1996; KOCKAPAN 2003]. Jedes dieser Kriterien wirkt sich auf die mechanischen und biomechanischen Eigenschaften der Wurzelstifte aus und hat somit großen Einfluss auf den Erfolg oder Misserfolg einer Stiftstumpfaufbauversorgung [NERGIZ und SCHMAGE 2004]. Das

verwendete Material beeinflusst die Bruchfestigkeit, die Elastizität, die Biokompatibilität sowie die Ästhetik der Wurzelstifte in hohem Maße [NERGIZ und SCHMAGE 2004].

Entsprechend der Herstellungsart lassen sich individuell geformte von präfabrizierten Wurzelstiften unterscheiden [NERGIZ und SCHMAGE 2004]. Präfabrizierte Stiftsysteme zeichnen sich durch eine einfache und zeitsparende Handhabung aus [GRANDINI *et al.* 2005]. Ihr Einsatzbereich beschränkt sich jedoch auf runde, mittel- bis englumige Wurzelkanäle [NAUMANN 2003]. Individuell gefertigte Stifte erzielen die beste Formkongruenz zum Wurzelkanal und eignen sich besonders für weitulmige und ovale Kanalformen [NAUMANN 2003]. Ihre Form folgt der des Wurzelkanals, so dass ovale oder starke koronal erweiterte Wurzelkanäle vollständig ausgefüllt werden können. Zylindrische Wurzelkanalstifte wiederum können sich in diesen Fällen häufig nicht mehr formkongruent an die Kanalwand anschließen. Um die Aufnahme konfektionierter Stifte mit Hilfe der formkongruenten Präparation solcher Wurzelkanäle zu ermöglichen, müsste sehr viel Zahnhartsubstanz geopfert werden, wodurch es zusätzlich zu einer deutlichen Schwächung der Wurzel kommen würde.

Hinsichtlich des Stiftdesigns können zum einen aktive, mit einem Schraubgewinde versehene Stifte von passiven Stiften, die nach der Zementierung ihre Friktion erhalten, unterschieden werden [NERGIZ und SCHMAGE 2004]. Aktive Stiftsysteme weisen die höchsten Friktionswerte auf [STANDLEE *et al.* 1978; SAHAFI *et al.* 2004]. Nachteilig zu bewerten sind hierbei jedoch die im Wurzeldentin auftretenden Spannungen, die zu Wurzelfrakturen führen können [SAHAFI *et al.* 2004]. Die passiven Stiftsysteme lassen sich ihrer Form nach unterteilen in zylindrische und konische Stifte. Konische Wurzelstifte entsprechen von der Form her am besten der Wurzelanatomie. Somit ist die Perforationsgefahr gegenüber den zylindrischen Wurzelstiften deutlich verringert [STANDLEE *et al.* 1978]. Zylindrische Stifte hingegen weisen deutlich höhere Retentionswerte auf [SAHAFI *et al.* 2004]. Aufgrund der einfachen und schnellen Anwendung werden heute überwiegend konfektionierte konische Wurzelstiftsysteme verwendet. Dabei reicht das Herstellerangebot von den klassischen Stiftsystemen aus Metall bis zu neueren Wurzelstiften aus Keramik oder faserverstärktem Kunststoff.

### 2.2.1 Metallische Wurzelkanalstifte

Aufgrund ihrer hohen Frakturfestigkeit waren metallische Wurzelkanalstifte jahrzehntelang das gängigste Verankerungsmaterial für Stift-Stumpf-Aufbauten. Stiftaufbauten aus Metall bestehen meistens entweder aus Edelmetall-, Nichtedelmetall- oder Titan-Legierungen. Sie können retentiv verankert,

konventionell zementiert oder nach entsprechender Vorbehandlung (Silikatisierung) adhäsiv befestigt werden.

Um eine ausreichende Retention für Aufbau und Krone zu gewährleisten, sollte der Wurzelkanalstift eine Länge aufweisen, die mindestens der Länge der klinischen Krone entspricht [NERGIZ und SCHMAGE 2004]. Um ein günstiges Hebel-Lastarm-Verhältnis zu erreichen, wird ein Verhältnis von 1/3 Kronen- zu 2/3 Stiftlänge empfohlen [NERGIZ und SCHMAGE 2004]. Um die Gefahr einer Perforation zu verringern, sollten apikal 4 mm Wurzelfüllung belassen werden [PORTELL *et al.* 1982; DELIPERI *et al.* 2005]. Darüber hinaus hat die Länge jener verbliebenen Wurzelkanalfüllung generell einen wesentlichen Einfluss auf die apikale Dichtigkeit [ZILLICH und CORCORAN 1984].

Metallische Wurzelstifte zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit sowie durch ein hohes E-Modul aus. Untersuchungen zur Kaukraftübertragung zeigten jedoch deutliche Spannungsspitzen, die zu Wurzelfrakturen führen können, da metallische Stifte ein sehr viel höheres E-Modul als Dentin besitzen (Metall: E = 200 GPa, Dentin: E = 18 GPa) [GALHANO *et al.* 2005].

Durch systematische Finite-Elemente-Analysen an dreidimensionalen Modellen konnte jedoch auch gezeigt werden, dass die mechanische Beanspruchung von Wurzelstift und Restzahnschubstanz bei statischer Biegebelastung durch die Art des Verbundes von Restzahnschubstanz und Stiftaufbau beeinflusst wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten bei adhäsiver Befestigung, im Vergleich zur konventionellen Befestigung mit Zinkphosphatzement, eine Reduktion der Spannungsmaxima in Stiftaufbau und Restzahnschubstanz um den Faktor 10 [STIEFENHOFER *et al.* 1994]. Diese Ergebnisse konnten durch Asmussen *et al.* in einer neueren Studie bestätigt werden [ASMUSSEN *et al.* 2005]. Auch in letzterer Studie konnte belegt werden, dass adhäsiv befestigte Wurzelkanalstifte weniger Spannungen im Wurzelkanal verursachen als herkömmlich zementierte Stifte [ASMUSSEN *et al.* 2005].

In einer kürzlich veröffentlichten Studie wurden Wurzelstifte aus Titan und faserverstärkte Wurzelkanalstifte vergleichend untersucht. Hierbei stand die Frage nach dem idealen E-Modul im Mittelpunkt. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Stiftinsertion erst durch eine adäquate Fassreifenpräparation Belastbarkeitswerte oberhalb der 400 N Grenze (maximale Kaubelastung Frontzahnregion) erreicht werden können. Dies verdeutlicht, dass die postendodontische Versorgung unabhängig von der Rigidität des Stiftmaterials erfolgreich sein kann [NAUMANN 2009].

Frakturen metallischer Stiftversorgungen im mittleren und apikalen Drittel haben aufgrund ihrer erschwerten Revidierbarkeit oftmals den Verlust des Zahnes zur Folge

[JANSSEN und HÜLSMANN 2003]. Metallische Wurzelstifte genügen selten hohen ästhetischen Anforderungen, da sie dazu neigen, vor allem unter vollkeramischen Restaurationen oder auch marginal durch die Wurzel und Gingiva dunkel durchzuscheinen [QUALTROUGH und MANNOCCI 2003]. Die seit Jahrzehnten routinemäßig verwendeten metallischen Stiftsysteme sind gut dokumentiert, und es existiert eine Vielzahl klinischer Studien [ROBERTS 1970; SORENSEN und MARTINOFF 1984; SORENSEN und ENGELMAN 1990; SCHMITTER *et al.* 2007]. Dabei differieren die Misserfolgsraten jedoch erheblich, mit Werten zwischen 0,6 % [WEINE *et al.* 1991] und 22,4 % [ROBERTS 1970], und sie sind abhängig vom Stiftdesign, vom Verhältnis der Stift- zur Kronenlänge, von der Art der prothetischen Versorgung sowie von der Herstellungsmethode.

Die Fortschritte in der Adhäsivtechnik sowie der verstärkte Wunsch nach zahnfarbenen, metallfreien Restaurationen mit vereinfachter, zeitsparender Anwendung hat allerdings zur verstärkten Nutzung von Keramik, quarz- oder glasfaserverstärkten Wurzelkanalstiften geführt.

### 2.2.2 Keramische Wurzelkanalstifte

Ende der 1980er-Jahre wurden vollkeramische Stiftsysteme auf dem Markt eingeführt. Als vorteilhaft bei deren Verwendung gilt die große Biokompatibilität und die Korrosionsbeständigkeit [AKAGAWA *et al.* 1993]. Dazu kommt der positive ästhetische Effekt durch den zahnfarbenen Charakter [KOUTAYAS und KERN 1999; STRUB *et al.* 1999; CAROSSA *et al.* 2001]. Keramische Wurzelkanalstifte werden vorwiegend aus Zirkoniumdioxid-Keramik oder Aluminiumoxid-Keramik hergestellt. Neben einer sehr hohen Risszähigkeit verfügen sie über eine Biegefestigkeit, die mit der Stabilität von Titanstiften vergleichbar ist [HEYDECKE *et al.* 2002]. In neueren Studien zeigte sich jedoch, dass derart steife Stiftmaterialien zu einer sehr ungleichmäßigen Kräfteverteilung auf die Restzahnhartsubstanz führen und somit irreparable Wurzelfrakturen zur Folge haben können [ASMUSSEN *et al.* 1999; ROSENTRITT *et al.* 2000].

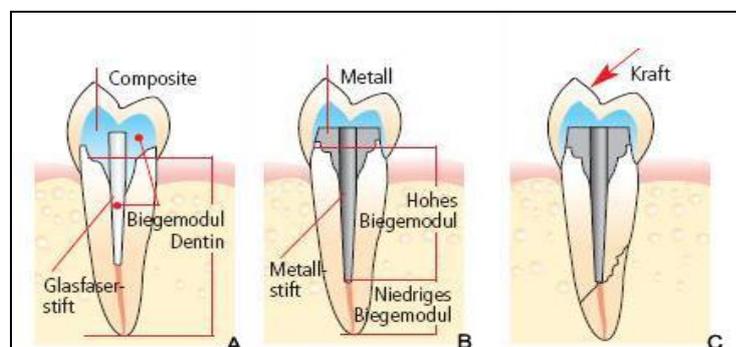
Die Auswertung von In-vitro-Frakturmustern nach maximaler linearer Belastung zeigte außerdem, dass Keramikstifte im Vergleich zu Metallstiften aufgrund ihrer Sprödigkeit eher brechen als dezementieren [ROSENTRITT *et al.* 2000]. Bei einem Vergleich von keramischen und faserverstärkten Stiften nach Dauerbelastung in einer Kaumaschine zeigte sich eine deutlich erhöhte Frakturanfälligkeit der Keramikstifte gegenüber den faserverstärkten Wurzelstiften [MANNOCCI *et al.* 1999]. In einer neueren Studie konnte darüber hinaus bewiesen werden, dass sich die geringe Elastizität der sehr harten keramischen Wurzelkanalstifte nachteilig auf den Verbund zum Wurzeldentin auswirkt [BOTTINO *et al.* 2007]. In dieser Untersuchung wiesen die Keramikstifte im Gegensatz zu den faserverstärkten Wurzelstiften

verminderte Haftwerte nach mechanischer Belastung auf [BOTTINO *et al.* 2007]. Ferner erschwert diese hohe Härte das Entfernen von Keramikstiften im Rahmen einer Revision der Wurzelkanalbehandlung, ohne dabei große Schäden für die Zahnhartsubstanz zu hinterlassen [ASMUSSEN *et al.* 1999; NAUMANN 2003; QUALTROUGH und MANNOCCI 2003].

### 2.2.3 Faserverstärkte Stifte

Unter Berücksichtigung der speziellen Biodynamik des Kronen-Wurzel-Komplexes sowie des Wunsches nach Stiftmaterialien mit dentinähnlichen biomechanischen Eigenschaften wurden Anfang der 1990er-Jahre faserverstärkte Wurzelkanalstifte entwickelt [ASMUSSEN *et al.* 1999; BATEMAN *et al.* 2003; FERRARI und SCOTTI 2004; SCHWARTZ und ROBBINS 2004]. Diese sollen wiederholten Belastungen durch Kauzyklen (Beständigkeit gegen mechanische Ermüdung) gleichermaßen standhalten wie extrem hohen Beanspruchungen (Stöße) und im Einklang stehen mit dem Zahngewebe, in das sie bei adhäsiver Befestigung eingebettet sind [BOSCHIAN PEST *et al.* 2002]. Als Fasermaterial dienen hierzu Karbon oder Silikat. Ihre Fasern sind durch eine Kunststoffmatrix miteinander verklebt [BATEMAN *et al.* 2003]. Als besonders großer Vorteil der faserverstärkten Wurzelkanalstifte gilt das dem Dentin ähnliche Elastizitätsmodul (Faserstift = 20 - 40 Gpa; Dentin = 18 GPa) [GALHANO *et al.* 2005].

Bei Verwendung von Glasfaserstiften soll sich für die gesamte Wurzel ein gleichmäßiges Elastizitätsverhalten ergeben wie es im Abschnitt A der Abbildung 1 dargestellt wird. Ein abrupter Übergang von unterschiedlichen Elastizitäten innerhalb der Wurzel, wie er bei Metall- oder Keramikstiften auftritt (Abschnitt B der Abb. 1), wird dabei vermieden [HEIDEMANN und WEIGL 2004] Abschnitt C der Abbildung 1 hingegen verdeutlicht, wie abrupte Übergänge verschiedener Elastizitäten innerhalb der Wurzel nach langjähriger zyklischer Horizontalbelastung eine Wurzelfraktur verursacht haben [HEIDEMANN und WEIGL 2004]



**Abb. 1** Schematische Darstellung der einwirkenden Kräfte verschiedener Stifttypen auf einen einwurzeligen Zahn, modifiziert nach Heidemann, entnommen aus [HEIDEMANN und WEIGL 2004]

Mehrere In-vitro-Studien zeigten, dass es durch das dentinähnliche Elastizitätsmodul von Faserstiften deutlich seltener zu Wurzelfrakturen kommt als bei metallischen oder keramischen Stiftaufbauten [ISIDOR *et al.* 1996; DEAN *et al.* 1998; FREDRIKSSON *et al.* 1998; ASMUSSEN *et al.* 2005]. Isidor beispielsweise untersuchte das Bruchverhalten von Zähnen, die mit verschiedenen Stiftaufbauten und Metallkronen versorgt wurden. Nach zyklischer Belastung wiesen die mit einem faserverstärktem Wurzelkanalstift versorgten Zähne weniger Wurzelfrakturen auf als die mit einem Titanstift oder einem gegossenen Aufbau versorgten Zähne [ISIDOR *et al.* 1996].

Neben ihren guten biomechanischen Eigenschaften zeichnen sich Faserstifte durch einen weiteren Vorteil aus nämlich ihre gute Entfernbarkeit [FERRARI *et al.* 2000]. Die parallel zur Matrix verlaufenden Fasern führen das zum Revidieren verwendete Instrument (DT Light-Post Removal Kit; Bisco, Illinois, USA) im Kanal, wodurch das Risiko einer Wurzelforation stark verringert wird [DE RIJK 2000].

Nachteilig allerdings ist die hohe Wasseradsorption und die damit zusammenhängende Auflösung des Verbundes zwischen Fasern und Matrix [MIETTINEN *et al.* 1999] sowie die nachlassende Flexibilität nach thermischer Belastung [MANNOCCI *et al.* 2001].

Insgesamt befindet sich derzeit eine große Anzahl von Faserstiftsystemen unterschiedlicher Qualität und von verschiedenen Anbietern auf dem Markt [MANHART 2004]. Die Güte der Faserstifte ist dabei abhängig vom Herstellungsverfahren. Qualitativ hochwertige Faserstifte zeichnen sich dadurch aus, dass die Fasern bei möglichst dichter Packung gleichmäßig in der organischen Matrix verteilt sind und einen guten Verbund mit der Matrix, einen hohen Polymerisationsgrad der organischen Komponente sowie eine homogene Stiftstruktur ohne Blasen und Einschlüsse aufweisen [GRANDINI *et al.* 2005].

Nach Art der in die Epoxydharz-Matrix beziehungsweise Bis-GMA eingebetteten Fasern unterscheidet man glas- und karbonfaserverstärkte Stiftsysteme.

#### 2.2.4 Karbonfaserverstärkte Kunststoffstifte

Karbonfaserstifte wurden erstmals 1990 von Duret beschrieben und stellen eine weitere metallfreie Stifialternative dar [DURET *et al.* 1990]. Diese Wurzelkanalstifte bestehen aus einer Epoxidharz- oder aus einer Acrylat-Matrix, in welche die unidirektional ausgerichteten Karbonfasern mit einem Durchmesser von ca. 8 µm eingebettet sind [MANNOCCI *et al.* 1999; BATEMAN *et al.* 2003]. Da der chemische Aufbau der Epoxidharz-Matrix denen von Bis-GMA basierten Kompositen ähnelt, soll die Verwendung von Bis-GMA als adhäsives Aufbaumaterial ermöglicht werden [FERNANDES und SHETTY 2003; FERRARI und SCOTTI 2004].

Die Oberfläche von karbonfaserverstärkten Wurzelstiften weist kaum Hydroxylgruppen auf; daher ist die Verbindung zu einem Silan unwahrscheinlich, und eine stärkere Adhäsion zum Komposit durch Silanisierung wird als kaum möglich beschrieben [GORACCI *et al.* 2007]. Als vorteilhaft gelten das dentinähnliche E-Modul ( $E = 20 \text{ GPa}$ ) [GALHANO *et al.* 2005] und die hohe Biegefestigkeit [PEGORETTI *et al.* 2002].

Bezüglich der Frakturwiderstände von Karbonfaserstiften im Vergleich zu anderen Stiftsystemen gelangten In-vitro-Untersuchungen zu unterschiedlichen Ergebnissen. In einigen Studien zeigten sich im Vergleich mit metallischen Stiftsystemen deutlich höhere Frakturwiderstände [DEAN *et al.* 1998; OTTL *et al.* 2002]. In anderen Untersuchungen hingegen wiesen die Metallstifte die höchsten Frakturwiderstände auf [SIDOLI *et al.* 1997; MARTINEZ-INSUA *et al.* 1998]. In weiteren Studien konnten schließlich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Frakturwiderstände festgestellt werden [RAYGOT *et al.* 2001; MÖLLERSTEN *et al.* 2002]. Endodontisch behandelte Zähne, die mit Karbonfaserstiften versorgt wurden, wiesen ein sehr geringes Frakturrisiko auf [DEAN *et al.* 1998]. Traten dennoch Brüche auf, verliefen die Bruchlinien in der Regel so günstig, dass der Zahn mit Hilfe eines neu eingebrachten Stiftes versorgt werden konnte [DEAN *et al.* 1998; Mannocci *et al.* 1999].

Durch die schwarze Farbe der Fasern und den daraus resultierenden ungünstigen optischen Eigenschaften eignen sich diese Stifte allerdings nicht für die Anwendung bei ästhetisch hochwertigen Rekonstruktionen. Besonders bei vollkeramischen Einzelzahnversorgungen im Frontzahnbereich führt die Verwendung von Karbonfaserstiften durch ihr dunkles Durchscheinen nur zu einem unbefriedigenden Ergebnis [VICHI *et al.* 2000].

#### 2.2.5 Glas- und quarzfaserverstärkte Kunststoffstifte

Die seit 1998 auf dem Markt erhältlichen Glasfaserstifte beinhalten silanisierte Siliziumoxid-Fasern, die in eine Kompost-Matrix eingebettet sind [BATEMAN *et al.* 2003]. Je nach Matrixfarbe sind die Stifte transparent oder zahnfarben und somit aus ästhetischen Gründen den Karbonfaserstiften vorzuziehen [GLAZER 2002]. Weitere Vorteile gegenüber metallischen oder keramischen Wurzelkanalstiften sind vor allem die günstige Biegefestigkeiten, ein dentinähnliches E-Modul und eine hohe Transluzenz. Aus dieser resultiert in eine Lichtleitung, die auch in tiefer liegenden Bereichen des Wurzelkanals eine Lichtpolymerisation der Befestigungskomposite ermöglichen soll [KOUTAYAS und KERN 1999; PATYK *et al.* 2005].

Die Lichtleitung von faserverstärkten Wurzelkanalstiften wird jedoch in der Literatur kontrovers diskutiert. In einer neueren Studie konnte gezeigt werden, dass die Lichttransmission stark von Hersteller und Stifttyp abhängig ist. Zwei der in jener

Studie verwendeten Stiftsysteme (FibreKleer Serrated Post und Tech21 X-OP) wiesen keine Lichtdurchlässigkeit auf. Bei allen anderen untersuchten Stiftsystemen (RelyX Fiber Post, FRC Postec Plus, GC Fiber Post, DT Light Post Illusion, DT Light Post, Macrolock Illusion Post, Radix Fiber Post, DT Light Safety Lock, Dentin Post X, Snowpost, Reforpost und Composipost) nahm die Lichtintensität von koronal nach apikal deutlich ab [GORACCI *et al.* 2008]. Daher sollten zur adhäsiven Befestigung von faserverstärkten Wurzelkanalstiften chemisch bzw. dualhärtende Komposite verwendet werden [GORACCI *et al.* 2008].

Dem günstigen Elastizitätsmodul der Faserstifte steht jedoch eine eher als gering einzuschätzende Ermüdungsresistenz gegenüber, so dass nicht Wurzel-, sondern Stiffbrüche als häufigste Versagensursache beobachtet wurden [PFEIFFER *et al.* 2002; NAUMANN *et al.* 2005]. Eine neuere Studie ermittelte jedoch ausschließlich Retentionsverluste des Stift-Kompost-Aufbaus als Ursache für den Misserfolg [FERRARI *et al.* 2007].

Als weitere Vorteile gelten die dentinadhäsive Befestigung der glas- und quarzfaserverstärkten Wurzelkanalstifte mit Kompositen sowie die daraus resultierende Bildung eines Monoblocks aus Dentin, Befestigungskunststoff und Faserstift, der eine Retentionssteigerung und Reduktion der bakteriellen Mikroleakage bewirkt [MANNOCCI *et al.* 2001; GORACCI *et al.* 2005]. Die Bildung eines solchen Monoblocks wird jedoch in der Literatur ebenfalls kontrovers diskutiert und ist aufgrund der für Abbindevorgänge ungünstigen Kanalgeometrie und dem daraus resultierenden Schrumpfstress in der Praxis vermutlich kaum erreichbar [TAY und PASHLEY 2007]. Zudem ist die Anwendung der Adhäsivtechnik im Wurzelkanal durch die ohne Sicht vorzunehmende Applikation des Dentinhaftvermittlers und durch den bis zu 40 µm in die Dentintubuli eingepressten Smear-Layer erschwert [TAY und PASHLEY 2007].

Die Kunststoffgrundmasse konfektionierter Faserstifte ist gekennzeichnet durch eine hohe Anzahl von Karbondoppelbindungen in einer stark vernetzten Polymer-Matrix. Die Matrix des individuell formbaren everStick Posts weist im Gegensatz dazu langkettige PMMA-Verbindungen auf. Dies könnte zu einer verminderten Belastung der Fasern und damit zu verbesserten mechanischen Eigenschaften führen [LASSILA *ET AL.* 2004]. Aufgrund der hoch vernetzten Polymer-Matrix und der hohen Anzahl von Karbondoppelbindungen in der Matrix von kommerziell vorgefertigten faserverstärkten Wurzelkanalstiften kann dagegen kaum eine Polymerisation mit freien Radikalen stattfinden [LASTUMAKI *ET AL.* 2002]. Dies erschwert die adhäsive Bindung von Befestigungskompositen bzw. Aufbaukompositen an die Matrix [LASTUMAKI *et al.* 2002].

Signifikant höhere Haftwerte zwischen Komposit und Faserstift konnten, im Vergleich zu kommerziell vorgefertigten Stiften, mit dem individuell formbaren

Faserstift der Firma StickTech aus Finnland gemessen werden [BITTER *et al.* 2007; MANNOCCI *et al.* 2008]. Das individuell formbare Stiftsystem enthält unidirektionale Glasfasern und eine mehrphasige Polymer-Matrix. Diese Matrix besteht aus einem zu interpenetrierenden Polymer-Netzwerk (IPN), welches auf Polymethylmethacrylat (PMMA) und Bis-GMA basiert. Auf der Oberfläche dieser Stifte befindet sich eine mit PMMA angereicherte Schicht, welche eine Diffusion von Monomeren in den Faserstift ermöglichen kann [LASTUMAKI *et al.* 2003]. Dafür müssen die verwendeten Adhäsivsysteme PMMA anlösen können. Adhäsivsysteme basierend auf Bis-GMA, in Kombination mit Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) oder Triethylenglycoldimethacrylat (TEG-DMA) erwiesen sich dafür als sehr geeignet [MANNOCCI *et al.* 2005].

Glasfaserstifte können aus Fasern von unterschiedlicher Güte, wie zum Beispiel dem S-Glass (High-strength Glass) und dem am häufigsten verwendeten E-Glass (Electrical Glass), hergestellt werden. Durch Verwendung unterschiedlicher Fasern mit variierenden Volumenanteilen kann die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit beeinflusst werden [QUALTROUGH und MANNOCCI 2003; FERRARI und SCOTTI 2004]. Durch die Silanisierung der Glas- und Quarzfasern kommt es zur Kopolymerisation zwischen den Methacrylat-Gruppen der Matrix und denen des Silans. Die in Glasfaserstiften vorkommende Glasphase ist amorph, verfügt also über keine geordneten Strukturen, sondern über ein unregelmäßiges Muster, und besteht aus einer Mischung von  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [LASSILA *et al.* 2004].

Bei den Quarzfaserstiften bestehen die Fasern ebenfalls aus  $\text{SiO}_2$ , welches jedoch in kristalliner Form vorliegt. Es ist inert und zeichnet sich durch einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten aus [LASSILA *et al.* 2004]. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Fasern und Matrix müssen im Hinblick auf eine Gewährleistung der Langzeitstabilität berücksichtigt werden (Matrix:  $40\text{-}80 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ; Quarz:  $0,2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ; Karbonfaser:  $0,4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ; E-glass:  $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) [Lassila *et al.* 2004]. Darüber hinaus sorgt das kristalline Gefüge von Quarzfaserstiften generell für bessere mechanische Eigenschaften gegenüber Glasfaserstiften und ergibt einen markanten Unterschied bezüglich der Ermüdungsresistenz [LASSILA *et al.* 2004].

Erste Studienergebnisse zum klinischen Langzeitverhalten von faserverstärkten Stiftaufbauten sind vielversprechend. So wies eine retrospektive Studie mit 1304 untersuchten Zähnen, versorgt mit drei unterschiedlichen Faserstiftsystemen, nach sechs Jahren eine Misserfolgsrate von 3,2 % auf [FERRARI *et al.* 2000]. Eine andere Studie beschrieb für endodontisch behandelte Zähne, versorgt mit drei unterschiedlichen Faserstiftsystemen (AEsthetic Post und AEsthetic Plus Post quarzfaserverstärkt sowie Composipost karbonfaserverstärkt), nach einem Zeitraum von sieben bis elf Jahren eine Erfolgsrate von 92 %. In dieser Studie wurden insgesamt 985 Faserstifte gesetzt, wobei 615 Composiposts, 160 AEsthetic Posts

und 210 AEsthetic Plus Posts verwendet wurden. Insgesamt gab es 79 Misserfolge: 39 mal endodontisches Versagen, eine Wurzelfraktur, eine Stiftfraktur, 17 Kronenverluste und 21 Stiftdezementierungen [FERRARI *et al.* 2007].

In einer Studie, welche die Bruch- und Biegefestigkeit von faserverstärkten Wurzelkanalstiften untersuchte, wiesen die Faserstifte mit einem zu interpenetrierenden Polymer-Netzwerk eine deutlich höhere Bruch- und Biegefestigkeit auf, im Vergleich zu kommerziell vorgefertigten Faserstiften [LASSILA *et al.* 2004]. In einer kürzlich erschienenen Studie zum klinischen Langzeitverhalten von Faserstiften wurden 360 endodontisch behandelte Prämolaren über einen Zeitraum von drei Jahren untersucht [CAGIDIACO *et al.* 2008]. In dieser Untersuchung wurden jene Prämolaren, die verschiedene Destruktionsgrade aufwiesen, entweder mit Faserstiften und adhäsiven Aufbau oder nur mit einem adhäsiven Aufbau versorgt und anschließend überkront. Cagidiaco verwendete dazu in ihrer Untersuchung die individuell formbaren everStick Post sowie die vorgefertigten DT Light Post. Nach drei Jahren wiesen die mit einem individuell formbaren Glasfaserstift versorgten Prämolaren eine deutlich geringere Überlebensrate (76,7 %) gegenüber konventionellen vorgefertigten Wurzelkanalstiften (90,9 %) auf. Prämolaren ohne Stift-Stumpf-Aufbau zeigten schließlich mit 62,5 % die geringste Überlebensrate [CAGIDIACO *et al.* 2008].

### **2.3 Komposit als Aufbaumaterial**

Für die direkte postendodontische Versorgung avitaler Zähne stehen bei ausreichender Restzahnhartsubstanz die gleichen plastischen Restaurationsmaterialien zur Verfügung wie für vitale Zähne. Verwendet werden können hierzu Amalgame, Glasionomerezemente und Komposite [STOBER und RAMMELSBURG 2005]. Dabei soll das Aufbaumaterial einen festen Verbund mit der Restzahnhartsubstanz eingehen sowie einen dichten Verschluss der Wurzelkanaleingänge gewährleisten. Dies ist wichtig, da das Aufbaumaterial die Restzahnhartsubstanz stabilisieren sowie genügend Retention für die definitive Versorgung bieten soll und somit großen Einfluss auf den langfristigen Erfolg der koronalen Restauration hat [COHEN *et al.* 2000; FERRARI und SCOTTI 2004; SCHWARTZ und ROBBINS 2004].

Aufgrund der hohen Korrosionsneigung, der dunklen Farbe, der langsamen Aushärtung und der geringen Bindung zur Zahnhartsubstanz finden Amalgame heute kaum noch Anwendung als Aufbaumaterial [STOBER und RAMMELSBURG 2005]. Bis zur Markteinführung der Dentinadhäsive wurden Glasionomerezemente aufgrund ihrer chemischen Bindung zur Zahnhartsubstanz gegenüber Kompositen bevorzugt verwendet [STOBER und RAMMELSBURG 2005]. Durch die Anwendung der dem Komposit entsprechenden Dentinadhäsive können mit Kompositen deutlich höhere

Haftwerte zum Dentin erreicht werden als mit Glasionomern [VAN MEERBEEK *et al.* 2003; Stober und RAMMELBERG 2005]. Die Komposite bewiesen in zahlreichen Studien den Glasionomern überlegene Eigenschaften, vor allem bezüglich ihres Dentinhaftverbundes, ihrer Festigkeit, Beschleifbarkeit und Langzeitstabilität [RZANNY *et al.* 2002; VAN MEERBEEK *et al.* 2003; STOBER und RAMMELBERG 2005], weshalb sie sich inzwischen für den Aufbau von ausgedehnten Zahnhartsubstanzdefekten etabliert haben [DGZMK 2003; STOBER und RAMMELBERG 2005].

Stober und Rammelsberg beispielsweise untersuchten das klinische Verhalten von drei unterschiedlichen Aufbaumaterialien (die Komposite Rebuilda D und Rebuilda SC sowie den Glasionomern Ketac Silver Aplicap ) an 315 vitalen und devitalen Zähnen bis zur definitiven Versorgung durch eine Krone. Die Konditionierung der Zähne erfolgte vor dem Einbringen der Komposite mit der Säure-Ätz-Technik und den entsprechenden Dentinadhäsiven. Vor dem Auftragen des Glasionomern wurde der entsprechende Konditionierer appliziert. Die meisten Retentionsverluste waren dabei auf kohäsives oder adhäsives Versagen zwischen Aufbaumaterial und Zahnstumpf zurückzuführen, etwa während des Entfernens der provisorischen Kronen (47,5 %), bei der Abformung der beschliffenen Stümpfe (22,5 %) oder beim Beschleifen der Zähne (30,0 %). Im Vergleich zu den Kompositen Rebuilda D (15 %) und Rebuilda SC (15,3 %) wies Ketac Silver Aplicap (28,8 %) die höchste Verlustrate auf. In dieser Untersuchung zeigte sich ferner, dass die Komposite Rebuilda D (27,3 %) und Rebuilda SC (11,1 %) auch bei geringer Zahnhartsubstanz eine deutlich niedrigere Versagensrate gegenüber dem Glasionomern (62,5 %) aufwiesen [STOBER und RAMMELBERG 2005].

Komposite besitzen eine dentinähnliche Farbe, Härte und eine gute Beschleifbarkeit [DGZMK 2003; STOBER und RAMMELBERG 2005]. Laut Definition handelt es sich bei ihnen um zusammengesetzte Werkstoffe, deren Hauptbestandteile die organische Matrix, die disperse Phase (Füller) und die Verbundphase (Silane, Kopolymere) sowie verschiedene Additive sind [MONTICELLI *et al.* 2005]. Sie können ihrer Viskosität nach in niedrig visköse, hoch visköse sowie stopfbare Komposite unterteilt werden [MONTICELLI *et al.* 2004; MONTICELLI *et al.* 2005]. Die Viskosität eines Komposits wird durch Gehalt und Größe der Füllkörper sowie durch den Monomergehalt bestimmt [SADEK *et al.* 2006] und beeinflusst deren Benetzungsfähigkeit [MONTICELLI *et al.* 2004]. Niedrig visköse Komposite besitzen eine besonders gute Adaptionfähigkeit und Benetzungsfähigkeit [SADEK *et al.* 2006].

Monticelli untersuchte in einer Studie elektronmikroskopisch den Haftverbund zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften und Aufbaukompositen mit unterschiedlichen Viskositäten. Es zeigte sich dabei, dass niedrig visköse Komposite deutlich weniger Poren und Luftblasen an der Phasengrenze zum Faserstift

entwickelten als hoch visköse Komposite und dadurch einen innigeren Verbund zum Faserstift eingehen können [MONTICELLI *et al.* 2005]. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte auch Sadek in einer neueren Studie [SADEK *et al.* 2006]. Obwohl in beiden Studien die Anzahl der Poren und Luftblasen in den Aufbauten der fließfähigen Komposite deutlich verringert war, konnten keine statistisch signifikant höheren Haftwerte ermittelt werden [MONTICELLI *et al.* 2005; SADEK *et al.* 2006].

Die Größe und Anzahl der Füllkörper wirkt sich auch auf Eigenschaften wie Druckstabilität, Verschleißfestigkeit, E-Modul, Wasseraufnahme und Polymerisationsschrumpfung eines Aufbaumaterials aus [FERRARI und SCOTTI 2002]. Der geringe Anteil an Füllstoffen in fließfähigen Kompositen kann jedoch zu einer verstärkten Schrumpfung während der Polymerisation führen und dadurch den Verbund zwischen Aufbaupositiv und faserverstärktem Wurzelkanalstift schwächen [SADEK *et al.* 2006].

#### 2.4 Oberflächenvorbereitung von Faserstäben

Der dauerhafte Verbund zwischen Faserstift und Aufbaumaterial trägt maßgeblich zum Erfolg der Rekonstruktion wurzelkanalbehandelter Zähne bei [MONTICELLI *et al.* 2005] und muss mechanischen Belastungen, die durch das Präparieren, Abformen und durch Kaudruck entstehen, standhalten [STOBER und RAMMELSBURG 2005]. Ein solcher Verbund kann durch verschiedene Mechanismen erreicht werden, etwa durch mikro- und makromechanische Retention, chemische Bindungen oder spezifische Adhäsion, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

Die Festigkeit des mechanischen Verbundes wird durch die Oberflächen der sich verzahnenden Bereiche bestimmt. Vom Hersteller am Stift angebrachte Retentionsrillen sollen die makromechanische Retentionskraft vergrößern. Eine Verstärkung der mikromechanischen Retentionsstellen auf der Stiftoberfläche wiederum kann durch mechanische Bearbeitung erzielt werden, wie zum Beispiel durch Sandstrahlen oder chemische Ätzung der Verbundflächen, etwa mit Salzsäure, [JANDA 1992; MONTICELLI *et al.* 2006; MONTICELLI *et al.* 2008]. Von großer Bedeutung für die mechanische Retention ist das Erreichen und Ausfüllen der Unterschnitte auf der Stiftoberfläche durch die verwendeten Kompositmaterialien. Der mechanische Verbund wird hauptsächlich von den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien beeinflusst, insbesondere durch deren Viskosität, Rautiefe, Korngröße, Benetzungsfähigkeit und Eigenfestigkeit [COMBE *et al.* 1999]. So zeigten in einer mikroskopischen Studie dünn fließende Komposite eine deutlich homogenere Kontinuität mit der Stiftoberfläche als Hybridkomposite [MONTICELLI *et al.* 2005].

Der Begriff der Adhäsion bezeichnet die Zusammenhangkräfte zwischen den Molekülen zweier verschiedener Stoffe. Adhäsionskräfte treten immer an

Grenzflächen von festen Stoffen auf. Die spezifische Adhäsion beruht auf Haupt- und Nebervalenzbindungen. Zu ihnen werden die Dipol-Dipol-Bindungen, die Wasserstoffbrückenbindungen und die Dispersionsbindungen gezählt, welche hohe Adhäsionskräfte entwickeln können.

Die Festigkeit des chemischen Verbundes ist von den zur Verfügung stehenden funktionellen Gruppen abhängig. Ein chemischer Haftverbund wird ermöglicht, wenn zwei Substanzen auf molekularer Ebene miteinander zu einer Verbindung reagieren. Diese Bindungen können entweder auf gegenseitiger Wechselwirkung der Ionen eines Moleküls, auf Wasserstoffbrückenbindungen oder, wie bei der Silanisierung, auf Si-O-Bindungen basieren. Zudem sind kovalente Verbindungen der Atome untereinander vorstellbar [EICHNER und KAPPERT 2000].

Um die chemischen Verbindungen eingehen zu können, müssen die Oberflächen der Faserstifte benetzbar sein. Wie gut die unterschiedlichen Werkstoffe letztendlich benetzbar sind, hängt in erster Linie von der Oberflächenvorbehandlung ab [JANDA 1992]. Das Benetzungsverhalten von Faserstiften kann zum Beispiel durch deren Reinigung mit Alkohol (2-Propanol) verbessert werden [BALBOSH und KERN 2006; MONTICELLI *et al.* 2008]. Durch eine gute Benetzbarkeit kann schließlich ein spaltfreier Kontakt zwischen Haftvermittler und Stiftoberfläche erreicht werden [JANDA 1992].

Allerdings weisen konfektionierte glas- und quarzfaserverstärkte Wurzelkanalstifte eine relativ glatte Oberfläche auf, wodurch die Festigkeit eines mechanischen Haftverbundes stark limitiert wird [MONTICELLI *et al.* 2008]. Die hohe Anzahl an Karbondoppelbindungen in konfektionierten Faserstiften führt des Weiteren zu einer reduzierten Reaktion mit freien Radikalen und wirkt sich somit vermindert auf die chemische Verbundfähigkeit aus [LASTUMAKI *et al.* 2002]. Um die Haftkraft zwischen Faserstift und Komposit zu erhöhen, wurden in mehreren Studien verschiedene chemische, physikalische sowie kombiniert mechanisch-chemische Oberflächenvorbehandlungen an Faserstiften untersucht, was nachfolgend näher erläutert werden sollen [YANAGIDA *et al.* 2001; SAHAFI *et al.* 2003; MONTICELLI *et al.* 2006; MONTICELLI *et al.* 2008].

#### 2.4.1 Mechanische und chemomechanische Vorbehandlungen

Zu den mechanischen Vorbehandlungsmethoden zählt beispielsweise das Sandstrahlen mit Aluminiumoxidpartikeln. Das Silica-Coating (CoJet System; 3M ESPE, Seefeld, Deutschland) dagegen ist eine chemomechanische Vorbehandlungsart.

Bei letzterem System wird die Oberfläche per Mikro-Pulverstrahlgerät mit durch Siliziumdioxid modifizierten Aluminiumoxidpartikeln behandelt. Bei diesem Strahlprozess können die Siliziumdioxidpartikel aufgrund ihrer hohen

Geschwindigkeit bis zu 15  $\mu\text{m}$  tief in den Faserstift eindringen und eine Siliziumdioxidschicht auf der Stiftoberfläche schaffen [VALANDRO *et al.* 2006]. Diese Siliziumdioxidschicht kann nach dem Silanisieren eine chemische Verbindung mit dem Komposit eingehen.

Obwohl mit beiden Methoden eine zufriedenstellende Erhöhung der Haftwerte erreicht werden konnte, überwiegen bei ihnen die Nachteile. Diese zeigen sich vor allem durch beschädigte Glas- und Quarzfasern sowie durch eine verminderte Stabilität der bestrahlten Faserstifte [SAHAFI *et al.* 2004].

Bessere Ergebnisse wurden durch das fünfsekündige Bestrahlen von Glasfaserstiften bei einem Abstand von 30 cm erlangt, wenn dabei 50  $\mu\text{m}$  große Aluminiumpartikel bei einem Druck von 2,5 bar zum Einsatz kamen [BALBOSH und KERN 2006]. Die Glas- beziehungsweise Quarzfasern blieben hierbei intakt, und dennoch konnte eine vergrößerte und aufgeraute Oberfläche festgestellt werden [BALBOSH und KERN 2006].

#### 2.4.2 Chemische Vorbehandlungen

Unter chemischen Vorbehandlungen versteht man das Auftragen von Silanen und Adhäsiven, um eine Verbesserung des chemischen Haftverbundes zu erreichen, sowie das Anätzen und Anlösen der Stiftmatrix zur Schaffung von Mikroretentionen. Chemische Vorbehandlungsmethoden mit Säuren oder Lösungsmitteln verfolgen ebenfalls das Ziel, die Oberfläche anzurauen und Fasern freizulegen.

Um den mechanischen Verbund zwischen Wurzelstift und Aufbaumaterial zu verbessern, wurden in einer 2008 veröffentlichten Studie Faserstifte mit Flusssäure vorbehandelt [WOLF *et al.* 1993; MONTICELLI *et al.* 2008]. Die Anwendung dieser Säure verbesserte den Verbund zwischen Komposit und Wurzelstift. Zusätzlich kam es jedoch auch zu Mikrorissen und Längsfrakturen der in den Wurzelkanalstiften vorhandenen Fasern [VANO *et al.* 2006]. Ein Mangel an Selektivität zeigte sich hier als das Hauptproblem: Es wurden sowohl die Fasern als auch die Matrix durch die Säure angegriffen.

Vielversprechender erscheint indes die Anwendung von Wasserstoffperoxid. Wasserstoffperoxid 24 % zeigte nach einer Einwirkzeit von zehn Minuten (beziehungsweise Wasserstoffperoxid 10 % nach einer Anwendungsdauer von 20 Minuten) eine Anlösung der Kunststoffmatrix, wobei die so freigelegten Fasern aber intakt blieben [MONTICELLI *et al.* 2006]. Dadurch konnte in der beschriebenen Studie die Verbundfestigkeit zwischen Komposit und Faserstift, insbesondere bei anschließender Applikation eines Silans, deutlich verstärkt werden [MONTICELLI *et al.* 2006].

Die Silanisierung ist ein Verfahren zur Verbesserung des chemischen Verbundes zwischen organischen und anorganischen Komponenten [MATINLINNA *et al.* 2004].

Meist wird dazu 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan oder Vinyltriethoxysilan, gelöst in einem Wasser-Ethanol-Gemisch, bei einem pH-Wert zwischen 4 und 5 verwendet [PERDIGAO *et al.* 2006].

Silane als Haftvermittler haben die allgemeine Struktur  $R-SiX_3$  mit einem organischen Rest R und hydrolysierbaren Gruppen X. Sie sind bipolare Moleküle und verestern unter Wasserabspaltung. Durch die Hydrolyse entstehen dabei aus den Methoxygruppen des Silans Hydroxylgruppen, welche in der Lage sind, mit anderen Hydroxylgruppen zu reagieren, die sich an den Oberflächen vieler anorganischer Verbindungen wie Gläsern, Siliziumdioxid ( $SiO_2$ ), Titanoxid ( $TiO_2$ ) befinden. Sie sind somit in der Lage, mit ihrem organischen Anteil eine Bindung mit der Matrix des Komposits einzugehen und sich gleichzeitig mit ihrem anorganischen Teil über Si-O-Bindungen an den anorganischen Anteil des Faserstiftes (die Fasern) zu binden [MATINLINNA *et al.* 2004]. Diese chemische Bindung kann jedoch nur zustande kommen, wenn Fasern an der Oberfläche des Stiftes freiliegen [FERRARI und SCOTTI 2002; AKSORNMUANG *et al.* 2004; GORACCI *et al.* 2005]. Zur Silanisierung in zahnmedizinischen sowie werkstoffkundlichen Bereichen findet hauptsächlich das 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan Verwendung.

Die chemische Bindung zwischen Silan und faserverstärkten Wurzelkanalstift kann zusätzlich durch die Zufuhr von Wärme verbessert werden [MONTICELLI *et al.* 2005]. Routinemäßig wird dieses Verfahren in der Zahnmedizin bei der Reparatur von Keramikfrakturen verwendet. Hier wird durch die Erwärmung des Silans der Haftverbund zwischen Keramik und Reparaturkomposit verbessert [BARGHI *et al.* 2000; ÖZCAN und VALLITTU 2003]. Ein ähnliches Verfahren nutzte Monticelli in ihrer Studie. Sie untersuchte, ob sich durch die Zufuhr von Wärme sowie durch die Anwendung von Silanen der Haftverbund zwischen Aufbaukomposit und Faserstift verstärken lässt. Durch die Erhöhung der Temperatur, mit der das Silan verblasen wurde, von 21 °C auf 38 °C konnte eine Erhöhung der Haftwerte erreicht werden [MONTICELLI *et al.* 2005].

In verschiedenen Studien wurde der Einfluss der Silanisierung auf den Haftverbund von faserverstärkten Wurzelkanalstiften zu Kompositen näher untersucht. Deren unterschiedliche Resultate sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Aksornmuang untersuchte den Haftverbund zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften und einem Aufbaukomposit unter Anwendung verschiedener Bonding-Systeme sowie eines Silans als Vorbehandlungsmethode. In dieser Studie konnte durch das Auftragen des Silans auf die faserverstärkten Wurzelkanalstifte eine Steigerung der Haftwerte zum Aufbaukomposit erreicht werden [AKSORNMUANG *et al.* 2004].

Magni untersuchte ebenfalls die Auswirkung verschiedener Vorbehandlungen auf den Haftverbund zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften und einem Befestigungskomposit. Die Faserstifte wurden entweder durch Sandstrahlen, durch Sandstrahlen und anschließendes Silanisieren oder durch alleiniges Silanisieren vorbehandelt. Durch Silanisierung sowie durch das Sandstrahlen und anschließendes silanisieren konnte auch hier eine Erhöhung der Haftwerte im Vergleich zum alleinigen Sandstrahlen und der unbehandelten Kontrollgruppe erzielt werden [MAGNI *et al.* 2007].

Auch Goracci konnte in ihrer Studie durch die Silanisierung der Faserstifte bei gleichzeitiger Verwendung von fließfähigen Aufbaukompositen eine Steigerung der Haftwerte erreichen [GORACCI *et al.* 2005].

Geringfügige Verbesserungen des Haftverbundes konnten ebenfalls durch die Anwendung von Silanen und das anschließende Auftragen von Bonding erreicht werden [FERRARI *et al.* 2006]. Vielversprechende Ergebnisse lieferten Versuche mit neueren kombinierten Silan-Adhäsiv-Systemen, bei denen eine sogenannte On-Demand-Hydrolyse stattfindet [AKSORNMUANG *et al.* 2006]. Nach der Vermengung des Bondings mit dem Silan kommt es zu einer raschen Hydrolyse des Silans durch die im wasserhaltigen Bonding befindlichen sauren Phosphatmonomere. Weitere Vorteile dieses Systems sind die simultane Bildung einer Siloxanschicht sowie die Polymerisation funktioneller Gruppen mit der Kunststoffmatrix [MONTICELLI *et al.* 2008].

Andere Untersuchungen hingegen konnten keine oder nur eine geringfügige Verbesserung des Haftverbundes feststellen [SAHAFI *et al.* 2003; PERDIGAO *et al.* 2006; BITTER *et al.* 2007]. Somit bleibt der Effekt der Silanisierung auf den Haftverbund zwischen Kompositen und faserverstärkten Wurzelstiften fraglich [BITTER *et al.* 2007]

### 3. Fragestellungen und Zielsetzung der Arbeit

Nach ihrer Einführung auf dem Dentalmarkt im Jahr 1990 haben sich faserverstärkte Wurzelkanalstifte umgehend etabliert, so dass heute zahlreiche Faserstifttypen und Aufbaumaterialien erhältlich sind. Diese lassen sich im Hinblick auf mehrere Faktoren unterscheiden: Faserart und Faseranteil, Oberflächentextur und Matrixzusammensetzung sowie Fülleranteil und Polymerisationsart. Die Auswirkungen von Vorbehandlungen auf den Haftverbund unter Berücksichtigung der oben genannten Faktoren sind bislang nur unzureichend untersucht oder werden, wie die zuvor genannten Studienergebnisse zeigen, kontrovers diskutiert.

Die vorliegende Studie sollte deshalb systematisch den Einfluss des Silanisierens als Vorbehandlung und den der thermischer Wechselbelastung auf den Haftverbund zwischen drei verschiedenen faserverstärkten Wurzelstiften und zwei Befestigungskunststoffen analysieren. Durch standardisierte Push-Out-Tests sollte dabei die maximale Druckkraft ermittelt werden, die zum Versagen des Haftverbundes zwischen Aufbaumaterial und Faserstift führt. Darüber hinaus sollte die optische Analyse der Bruchflächen Hinweise auf die Hafteigenschaften der Befestigungskomposite gegenüber der Stiftoberfläche liefern.

Als Arbeitsgrundlage wurden dazu folgende Null-Hypothesen aufgestellt:

1. Die Haftung wird nicht durch den Stifttyp beeinflusst.
2. Die Haftkraft der Stifte wird, im Vergleich zu den unbehandelten Faserstiften, durch die Vorbehandlung (Silanisierung) nicht erhöht.
3. Der Haftverbund wird durch die thermische Wechselbelastung, vergleichend zur Kontrollgruppe, nicht geschwächt.
4. Der Haftverbund wird nicht durch die Aufbaukomposite beeinflusst.

## 4. Material und Methoden

### 4.1 Material

#### 4.1.1 Stiftsysteme

In dieser Studie wurden konfektionierte Quarzfaserstifte (Unicore Post; Ultradent, Salt Lake City, Utah, USA), konfektionierte Glasfaserstifte (FRC Postec Plus; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) und individuell formbare Glasfaserstifte mit einer interpenetrierenden Polymer-Matrix (EverStick Post; StickTech, Turku, Finnland) verwendet. In den folgenden Tabellen I, II und III werden die technischen Daten der Stifte gemäß den Herstellerangaben aufgeführt.

#### **FRC Postec Plus (Ivoclar Vivadent)**

Die faserverstärkten Kunststoffstifte bestehen aus dem lichtleitenden, mit unidirektionalen Glasfasern verstärkten Kunststoff Targis der Firma Ivoclar Vivadent.

**Tabelle I** Technische Daten FRC Postec Plus, Stiftgröße 1

Zusammensetzung	Dimethacrylat: ca. 21 Vol.-% Ytterbiumfluorid: ca. 9 Vol.-% Glasfasern: ca. 70 Vol.-% Katalysatoren und Stabilisatoren: < 0,5 Vol.-%
Form	zylindrokönisch
Länge	gesamt: 20,00 mm konischer Anteil: 7,56 mm zylindrischer Anteil: 12,44 mm
Durchmesser	Stiftkopf: 1,50 mm Stiftende: 0,80 mm
Röntgenopazität in % Al	330 ± 10 % Al
Biegefestigkeit	1050 ± 50 MPa
Elastizitätsmodul	48 ± 2 GPa
Farbe	weiß transluzent
Konizitätswinkel	5.3°
Oberflächendesign	mikroretentiv
empfohlener Befestigungsmodus	adhäsiv
Chargennummer	F94017

### Unicore Post (Ultradent)

Dieser Quarzfaserstift ist gekennzeichnet durch seine mikroporöse Oberfläche und die vom Hersteller bereits aufgeraute Textur. Er besteht aus vorgespannten Quarzfasern, welche in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind.

**Tabelle II** Technische Daten Unicore Post, Stiftgröße 3

Zusammensetzung	Quarzfasern: ca. 60 Vol.-% Kunststoff: ca. 40 Vol.-%
Form	zylindrokönisch
Länge	gesamt: 19,00 mm konischer Anteil: 11,00 mm zylindrischer Anteil: 8,00 mm
Durchmesser	Stiftkopf: 1,55 mm Stiftende: 1,20 mm
Röntgenopazität in % Al	170 % Al
Biegefestigkeit	1500 MPa
Elastizitätsmodul	18 GPa
Farbe	weiß transluzent
Konizitätswinkel	3°
Oberflächendesign	mikroretentiv
empfohlener Befestigungsmodus	adhäsiv
Chargennummer	BLTHB

### EverStick Post (StickTech)

Der everStick Post ist ein unpolymerisierter und dadurch individuell formbarer Glasfaserstift. Er kann an jede Wurzelform und Größe angepasst werden und benötigt keine speziellen Vorbohrer. Hierdurch soll gesunde Zahnhartsubstanz geschont werden. Der everStick Post basiert auf einem interpenetrierenden Polymer-Netzwerk (PMMA/Bis-GMA) sowie auf unidirektionalen, silanisierten Glasfasern, welche mit PMMA und Bis-GMA imprägniert sind. Die Faserbündel des Stiftes sind von PMMA umgeben.

Für die Versuchsdurchführung wurden zylindrische Stifte mit einer Länge von 20 mm und einem Durchmesser von 1,5 mm hergestellt.

**Tabelle III** Technische Daten everStick Post

Zusammensetzung	Glasfasern PMMA und Bis-GMA Faserfüllgehalt: ca. 70 Vol.-%
Form	unpolymerisierter Faserstrang, an jede Form adaptierbar
Länge	20,00 mm
Durchmesser	1,50 mm
Röntgenopazität in % Al	keine Angabe
Biegefestigkeit	1250 MPa
Elastizitätsmodul	22 GPa
Farbe	zahnfarben, transparent
Konizitätswinkel	individuell formbar
Oberflächendesign	mikroretentiv
empfohlener Befestigungsmodus	adhäsiv
Chargennummer	2061120 - P3 - 031

#### 4.1.2 Kompositaufbaumaterialien

Zur Anwendung kamen zwei Komposite, die sich durch ihre Viskosität unterscheiden. Gegenstand der Untersuchung waren das niedrig visköse MultiCore Flow (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) sowie das hoch visköse Clearfil™ Core (Kuraray, Okayama, Japan). Ihre Eigenschaften sind in den Tabellen IV und V aufgeführt.

##### **MultiCore Flow (Ivoclar Vivadent)**

MultiCore Flow ein ist rein chemisch härtendes, fluoridhaltiges Hybridkomposit. Die Lichthärtung ist optional. Vom Hersteller wird es in zwei Kartuschen abgefüllt (Base- und Katalysatorpaste), deren Inhalte sich beim Auspressen automatisch vermengen. Nach dieser Vermischung härtet es innerhalb von vier Minuten aus.

**Tabelle IV** Materialeigenschaften MultiCore Flow

Einteilung	Hybridkomposit
Abbindung	chemisch, Lichthärtung optional
Inhaltsstoffe	Monomer-Matrix: Dimethacrylat, Bis-GMA, Triethylen-Glycol-Dimethacrylat  Anorganische Füllstoffe: Bariumglas, Ytterbiumfluorid, hochdisperses Siliziumdioxid, Ba-Al-Fluorosilikatglas, Katalysatoren, Stabilisatoren, Pigmente, 71 Gew.% organische Füllkörper (durchschnittliche Partikelgröße: 2,3 µm)
Farbe	zahnfarben
Röntgenopazität	ja
Dentinhaftvermittler	AdheSE
Besonderheiten	Fluoridfreisetzung
Chargennummer	G10607

### Clearfil™ Core (Kuraray)

Clearfil™ Core ist ein chemisch härtendes Hybridkomposit. Seine beiden Komponenten (Universalpaste und Katalysatorpaste) werden von Hand 1:1 gemischt. Nach dem Mischen härtet das Komposit innerhalb von 3,5 Minuten aus.

**Tabelle V** Materialeigenschaften Clearfil™ Core

Einteilung	Hybridkomposit
Abbindung	chemisch härtend
Inhaltsstoffe	<p>Universalpaste A: silanisiertes Silikatpulver, Bis-GMA, N,N'-Diethanol-p-toluidin</p> <p>Katalysatorpaste B: silanisiertes Glaspulver, Triethylen-Glycol-Dimethacrylat, Bis-GMA, kolloidales Silikat, Benzoylperoxid, 78 Gew.% anorganische Füllkörper (durchschnittliche Partikelgröße: keine Angabe)</p>
Farbe	weiß
Röntgenopazität	ja
Dentinhaftvermittler	Clearfil™ New Bond
Besonderheiten	keine
Chargennummer	00942A00051C

#### 4.1.3 Haftvermittler

##### **Monobond-S Silan (Ivoclar Vivadent)**

Monobond-S ist ein Ein-Komponenten-Haftvermittler, der einen chemischen Verbund zwischen organischer und anorganischer Matrix ermöglichen soll. Das Haftsilan ist in einem Wasser-Ethanol-Gemisch gelöst und soll dadurch das Aufpolymerisieren eines auf Methacrylat basierenden Komposits erlauben. Die genaue Zusammensetzung ist in Tabelle VI dargestellt.

**Tabelle VI** Zusammensetzung Monobond-S

Abbindung	durch Verblasen
Inhaltsstoffe	3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan, 1:1 Lösung aus Wasser/Ethanol, mit Essigsäure auf pH 4 gestellt
Chargennummer	J17658

##### **Porcelain Bond Activator Silan (Kuraray)**

Porcelain Bond Activator ist ein Zwei-Komponenten-Haftvermittler, der ebenfalls einen chemischen Verbund zwischen organischer und anorganischer Matrix ermöglichen soll. Das Silan wird vor der Anwendung mit einem Primer (Clearfil New Bond) 1:1 gemischt.

**Tabelle VII** Zusammensetzung Porcelain Bond Activator

Abbindung	durch Verblasen
Inhaltsstoffe	3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan, Bisphenol-a-polyethoxy-dimethacrylat
Chargennummer	00164B

### **AdheSE (Ivoclar Vivadent)**

AdheSE ist ein dual härtendes, selbstätzendes Schmelz- und Dentinadhäsiv für die Anwendung mit gemeinsam mit Kompositen und Kompomeren. Die Inhaltsstoffe sind den Herstellerangaben entsprechend in Tabelle VIII aufgeführt.

**Tabelle VIII** Zusammensetzung AdheSE

Abbindung	chemisch, Lichthärtung optional
Inhaltsstoffe	Primer: Phosphonsäureacrylat, Bis-Acrylsäureamid, Wasser, Initiatoren, Stabilisatoren  Bonding: hochdisperses Siliziumdioxid, Dimethacrylat, Hydroxy-Ethyl-Methacrylat, Initiatoren, Stabilisatoren
Chargennummer	H13072

### **Clearfil New Bond (Kuraray)**

Clearfil New Bond ist ein chemisch härtender Haftvermittler für Zahnschmelz und Dentin, der in Kombination mit der Total-Etch-Technik Anwendung findet und zur Verwendung mit chemisch härtenden Kompositrestaurationen entwickelt wurde. Die Inhaltsstoffe gemäß den Herstellerangaben sind in Tabelle XI aufgeführt.

**Tabelle IX** Zusammensetzung Clearfil New Bond

Abbindung	chemisch
Inhaltsstoffe	Universalflüssigkeit: N,N'-Diethanol-p-toluidin, Natrium-benzol-sulfonat, Ethylalkohol  Katalysatorflüssigkeit: Bis-GMA, 10-Methacryloyloxydecyl-dihydrogenphosphat, Hydroxy-Ethyl-Methacrylat, Dimethacrylat, Benzoylperoxid
Chargennummer	441368

### Stick Resin (StickTech)

Stick Resin ist ein lichthärtendes, lösungsmittelfreies Ein-Komponenten-Bonding, das auf Dimethacrylaten basiert und beim Zementieren und Reparieren von Faserkonstruktionen zur Reaktivierung von Stick- und everStick-Faseroberflächen eingesetzt wird. Die Inhaltsstoffe nach Herstellerangaben sind in Tabelle X aufgelistet.

**Tabelle X** Zusammensetzung Stick Resin

Abbindung	lichthärtend
Inhaltsstoffe	2,2-Bis-[4-(2-hydroxy-3-methacryloyloxypropoxy)-phenyl]-propan, Triethylen-Glycol-Dimethacrylat, 2-(dimethylamino)ethylmethacrylat, Kampferchinon
Chargennummer	100026

## 4.2 Methoden

Eine Übersicht über die Methodik, die Art der verwendeten Faserstifte, deren Vorbehandlung, die verwendeten Aufbaumaterialien und über deren Kombination miteinander gibt die Abbildung 2.

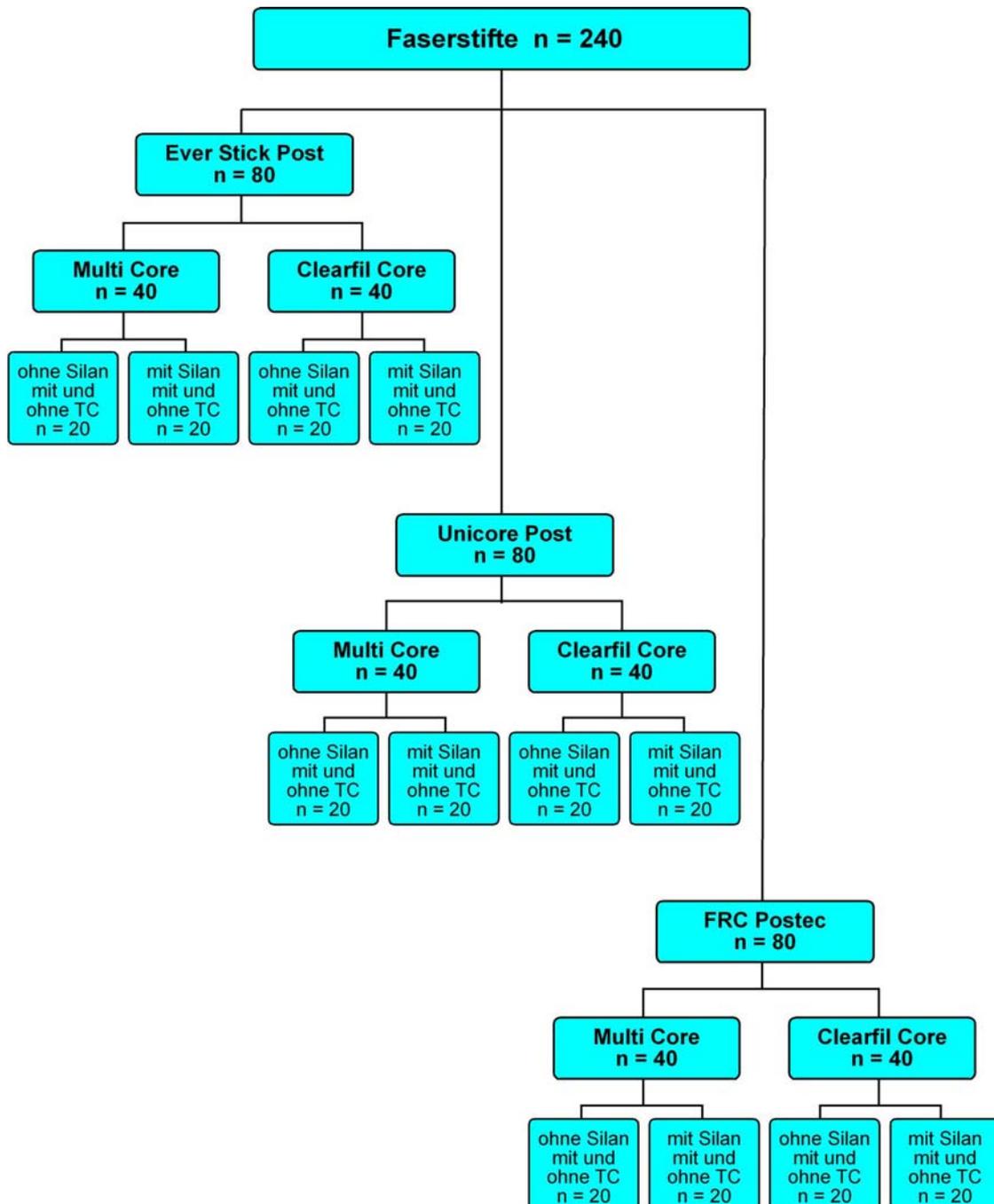


Abb. 2 Übersicht zum Versuchsaufbau

#### 4.2.1 Probenherstellung

Zur Probenherstellung wurden insgesamt 240 faserverstärkte Wurzelkanalstifte von drei Herstellern verwendet, die in drei Gruppen  $n = 80$  aufgeteilt wurden (Gruppe 1: FRC Postec Plus; Gruppe 2: Unicore Post; Gruppe 3: everStick Post). Die verarbeiteten Faserstifte wurden sowohl ohne vorherige Silanapplikation als auch nach einer Silanapplikation mit einem genormten Kompositaufbau versehen. Diese Kompositaufbauten wurden mit zwei handelsüblichen Aufbaukompositen angefertigt.

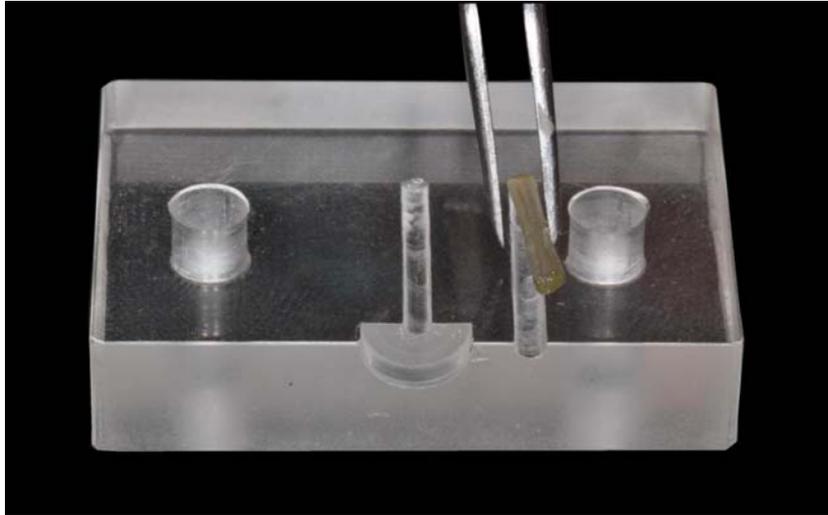
Um Verunreinigungen zu vermeiden, wurden alle faserverstärkten Wurzelkanalstifte nur mit einer Pinzette berührt. Alle Abläufe zur Probenherstellung wurden standardisiert durchgeführt und werden im Folgenden näher erläutert.

**Gruppe 1:** Gemäß den Herstellerangaben wurden die Glasfaserstifte FRC Postec (FRC) für 60 Sekunden mit Phosphorsäure (Total Etch; Ivoclar Vivadent) gereinigt und mit Wasser abgespült. Anschließend wurden die faserverstärkten Wurzelkanalstifte entsprechend des verwendeten Aufbaumaterials silanisiert. Hierfür kamen Monobond-S (MS) für MultiCore Flow (MC) und Porcelain Bond Activator (PBA) gemischt mit Clearfil New Bond (CNB) für Clearfil Core (CC) zur Anwendung. Die Silane wurden jeweils, wie vom Hersteller gefordert, mittels Mikrobrush aufgetragen und nach einer Einwirkzeit von 60 Sekunden verblasen. Anschließend wurde auf die mit Monobond-S silanisierten Faserstifte das dem Komposit entsprechende Bonding per Mikrobrush aufgetragen. Entsprechend den Empfehlungen des Herstellers wurde Clearfil New Bond 30 Sekunden lang einmassiert und dann 15 Sekunden verblasen. AdheSE (ASE) wurde nach gleicher Applikationsdauer für 10 Sekunden lichtgehärtet. In der Kontrollgruppe wurde keine Silanisierung vorgenommen und die dem Aufbaukomposit entsprechenden Bondingmaterialien wie oben beschrieben appliziert (AdheSE für MC, Clearfil New Bond für CC).

**Gruppe 2:** Entsprechend den Herstellerempfehlungen wurden die Unicore-Quarzfaserstifte (UC) mit 95 %igem Alkohol (2-Propanol; Merck, Darmstadt, Deutschland) gereinigt. Das heißt, sie wurden 60 Sekunden im Alkohol eingelegt und anschließend mit Wasser abgespült. Die weitere Vorbereitung der faserverstärkten Wurzelstifte erfolgte, wie in Gruppe 1 beschrieben.

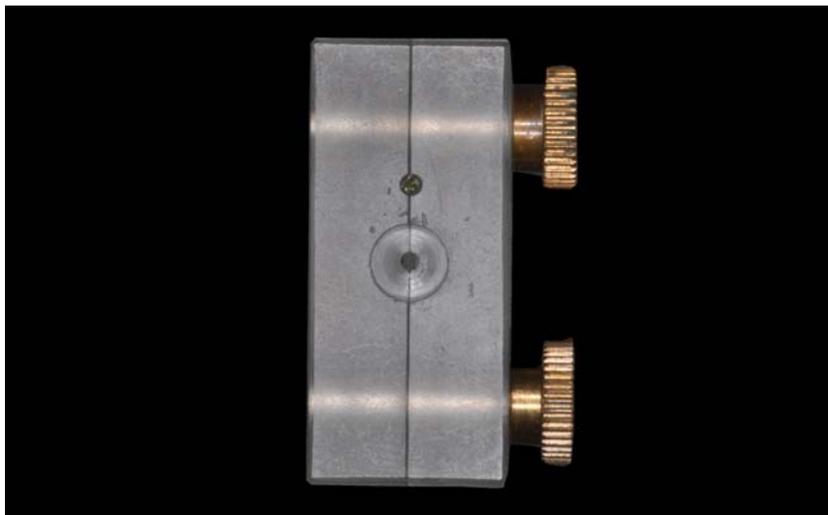
**Gruppe 3:** Die individuell formbaren Glasfaserstifte everStick wurden gemäß den Herstellerangaben angefertigt. Um den Faserstiften eine einheitliche Form zu verleihen, wurden standardisierte Plastikformen verwendet. Diese Plastikformen

besaßen einen Hohlraum mit einer Länge von 20 mm und einen Durchmesser von 2 mm und konnten durch zwei Schrauben mittig geöffnet werden. Die Glasfaserstifte wurden mit einer Pinzette in jene geöffneten Formen eingelegt und adaptiert, so dass sich die everStick Posts der Hohlform anpassen (Abb. 3).



**Abb. 3** Stiftinsertion in die geöffnete Plastikhohlform

Anschließend wurden die Formen mittig geschlossen, durch zwei Muttern gesichert (Abb. 4) und nun 60 Sekunden lichtgehärtet (Pulse Programm: 150 - 1200 mW/cm<sup>2</sup>, Astralis 10; Ivoclar Vivadent,).



**Abb. 4** Geschlossene Plastikform mit inseriertem everStick Post

Die Weiterverarbeitung der everStick Stifte erfolgte zwei Stunden nach der Polymerisation. Vor ihrer Weiterverarbeitung wurde das dazugehörige Stick Resin mit einem Mikrobrush auf die Faserstifte appliziert und 20 Sekunden lichtgehärtet

(Pulse Programm: 150 - 1200 mW/cm<sup>2</sup>, Astralis 10; Ivoclar Vivadent). Die weitere Verarbeitung der faserverstärkten Wurzelstifte erfolgte im Übrigen, wie bereits für Gruppe 1 beschrieben.

**Aufbauherstellung und Stiftsetzung:** Direkt nach der Vorbehandlung wurden die Faserstifte in vorgefertigte, passgenaue Plastikformen (Eigenbau der Charité - Universitätsmedizin, Berlin, Deutschland). eingesetzt. Diese Formen besitzen einen Hohlraum, der zum jeweiligen Stifttyp kongruent ist und durch zwei Schrauben mittig geöffnet werden kann (Abb. 5).



**Abb. 5** Speziell angefertigte Plastikform in geöffnetem Zustand

In der Plastikform befindet sich am oberen parallelen Ende des Stiftes eine zentrierte Bohrung mit einem 5 mm großen Durchmesser und einer Tiefe von 2 mm. Um eine standardisierte Form der Aufbauten zu gewährleisten, wurde während ihrer Anfertigung darauf geachtet, dass die Faserstifte eine zentrierte Position besaßen und das koronale Stiftende bündig mit dem Rand der Plastikform abschloss. Für die Herstellung der Aufbauten wurde darüber hinaus immer nur der parallelwandige Anteil der Stifte verwendet. Nach Insertion des Stiftes wurden die beiden Hälften der Plastikformen formschlüssig miteinander verschraubt (Abb. 6).

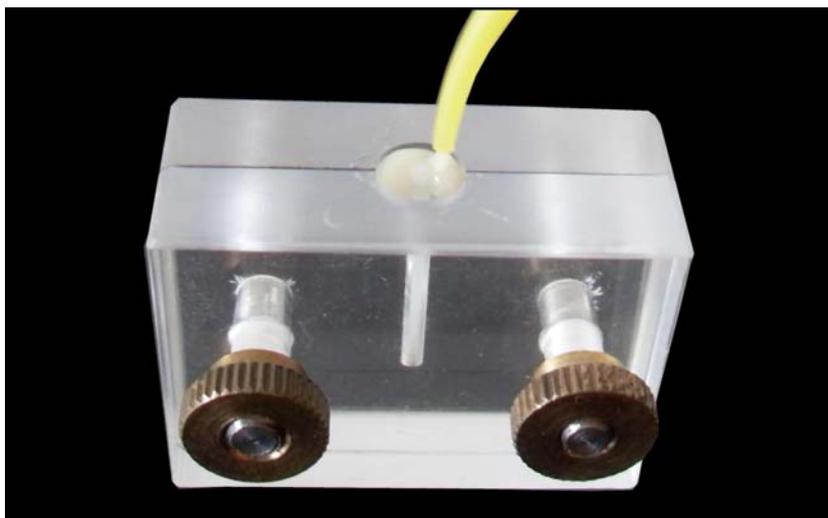


**Abb. 6** Geschlossene Plastikform mit inseriertem Faserstift

Anschließend wurde die zylindrische Hohlform, die nun den oberen parallelen Teil des Faserstiftes umgab, mit den nach Herstellerangaben angemischten Kompositen (Tabelle XI) ohne Überschüsse und blasenfrei aufgefüllt (Abb. 7).

**Tabelle XI** Herstellerangaben zur Kunststoffverarbeitung

	<b>Multi Core Flow</b>	<b>Clearfil™ Core</b>
Mischungsverhältnis	Mischkartusche 1:1	von Hand 1:1
Anmischzeit	30 sek	30 sek
Verarbeitungszeit	4 - 5 min	3 - 4 min
Lichthärtung	40 sek optional	chemisch härtend



**Abb. 7** Einfüllen des Kompositmaterials in die Hohlform

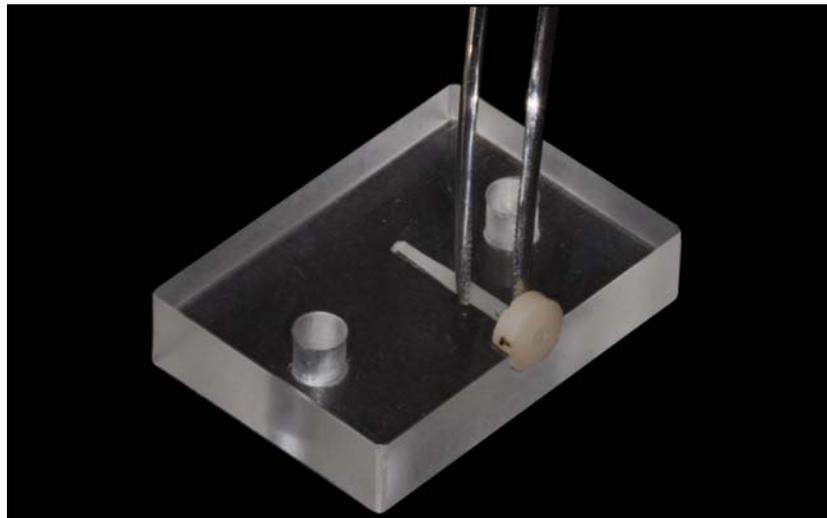
Für jede Gruppe wurden jeweils zwei Kompositaufbaumaterialien verwendet. Somit ergaben sich folgende Untergruppen:

Gruppe 1: FRC/CC/CNB, FRC/CC/PBA/CNB, FRC/MC/ASE, FRC/MC/MS/ASE.

Gruppe 2: UC/CC/CNB, UC/CC/PBA/CNB, UC/MC/ASE, UC/MC/MS/ASE.

Gruppe 3: IPN/CC/CNB, IPN/CC/PBA/CNB, IPN/MC/ASE, IPN/MC/MS/ASE.

Nach dem Erhärten wurden die Formen geöffnet und die Stifte mit ihren Aufbauten mittels Pinzette entnommen (Abb. 8).



**Abb. 8** Entnahme der Probe aus der geöffneten Plastikform

#### 4.2.2 Probenaufbewahrung

Alle hergestellten Proben wurden für 24 Stunden bei 37 °C (Venticell; Münchener Medizin Technik, München, Deutschland) in 0,9 %iger Kochsalzlösung (DeltaSelect, Pfullingen, Deutschland) aufbewahrt.

Zur Bestimmung der initialen Haftwerte wurden direkt im Anschluss mit der Hälfte aller Proben Ausstoßversuche durchgeführt. Alle anderen Proben wurden für weitere 28 Tage in 0,9 %iger Kochsalzlösung (DeltaSelect) bei 37 °C (Venticell; Münchener Medizin Technik, München, Deutschland) gelagert und im Anschluss daran einer thermischen Wechselbelastung zugeführt. Das Gerät für eine solche thermozyklische Belastung (Eigenbau der Charité Universitätsmedizin Berlin, Deutschland) bestand aus zwei Wasserbädern mit Thermostat (Lauda, Lauda-Königshofen, Deutschland), welche mit destilliertem Wasser (Hausapotheke der Charité Universitätsmedizin Berlin, Deutschland) gefüllt waren (Abb. 9). Die Proben wurden mit einem Schwenkarm (Eigenbau der Charité Universitätsmedizin Berlin, Deutschland) wechselweise zwischen den beiden Becken hin und her transportiert. Dabei durchliefen die Proben 5000 Zyklen mit einer Gesamtdauer von jeweils 80

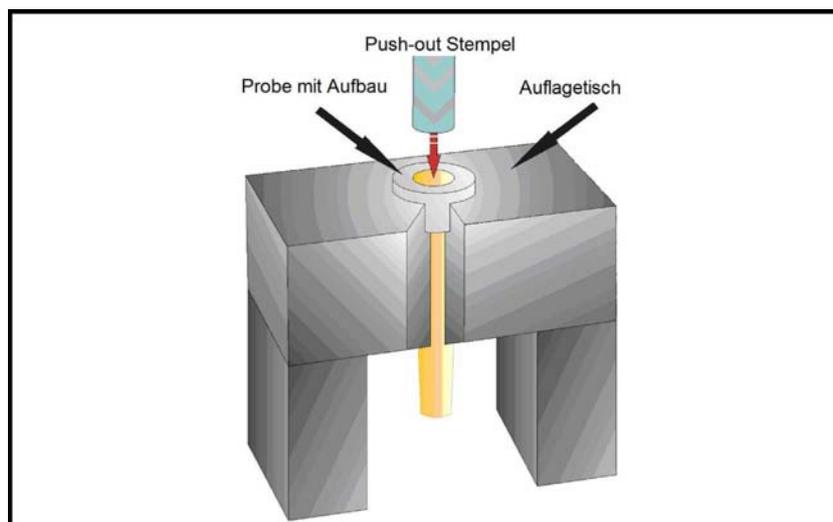
Sekunden. Pro Zyklus verweilen die Proben jeweils 30 Sekunden in 5 °C kaltem und 55 °C heißem Wasser. Die Abtropfphase (Transfer) zwischen diesen Bädern dauerte 20 Sekunden.



**Abb. 9** Eigenbau der Charité für die thermische Belastung

#### 4.2.3 Ermittlung der Haftwerte

Die Ermittlung der Haftwerte erfolgte in dieser Untersuchung durch den Push-Out-Test. Durchgeführt wurden die Ausstoßversuche mit einer Materialprüfmaschine für Zug-, Druck- und Biegeprüfungen (Zwick; Roell, Ulm, Deutschland), die mit einer 2,5 kn Messdose (Zwick, Ulm, Deutschland) ausgerüstet und in Abbildung 10 schematisch dargestellt ist.



**Abb. 10** Schematische Darstellung des Ausstoßversuches

Um die Proben ohne Reibung an Fremdkörpern auszustoßen, wurden sie jeweils mit ihrem Aufbau einzeln in einem speziell angefertigten Auflagetisch (Eigenbau der Charité Universitätsmedizin Berlin, Deutschland) fixiert. Zur Fixierung der Proben besaß der Auflagetisch eine dem Kompositaufbau entsprechende Vertiefung mit zentrierter Bohrung (Durchmesser: 2,5 mm), um eine zentrale Belastung der Probe zu ermöglichen. Die Stifte wurden mit ihren Aufbauten einzeln in die Bohrung und die Vertiefung des Auflagetisches eingeführt, wobei die Unterseite des Aufbaus auf der Oberfläche des Tisches auflag. Der Stempel wurde so positioniert, dass die Last ausschließlich mit dem Stift in Kontakt kam. Die Wurzelstifte wurden nun durch den Stempel (Durchmesser 1,2 mm) parallel zur Verbundfläche und mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min belastet. Dadurch konnte eine Schubspannung entlang der Klebefuge entstehen. Die Proben wurden solange belastet bis es zum Ablösen des Kompositaufbaus vom Stift kam. Die Bruchlast wurde in N bei einem Kraftabfall von 10 % ermittelt und anschließend in Haftwerte in MPa umgerechnet (1 MPa = 1 Million Pa = 1 N/mm<sup>2</sup>).

Um die exakte Höhe der Probekörper zu bestimmen, wurde die Höhe (h) aller Aufbauten vor dem Ausstoßen mit einer Mikrometerschraube (Mitutoyo Messgeräte, Neuss, Deutschland) nachgemessen. Die Größe der Haftfläche (A) für die Aufbauten am Stift wurde mit der Formel für Kreiszyylinder ( $A = 2 \pi \times r \times h$ ) berechnet, da nur der parallele Anteil der Faserstifte zur Befestigung der Aufbauten verwendet wurde.

#### 4.2.4 Optische Bruchflächenanalyse

Die ausgestoßenen Proben wurden anschließend unter einem Stereomikroskop (DV 4; Zeiss, Jena, Deutschland) bei 40-facher Vergrößerung im Hinblick auf ihren Versagensmodus untersucht. Dabei wurden die Proben von koronal beurteilt, da die Faserstifte bei einem Kraftabfall von 10 % nicht vollständig aus dem Kompositaufbau herausgestoßen wurden. Die optische Bruchflächenanalyse wurde durch zwei unabhängige Betrachter durchgeführt. Bei Nichtübereinstimmung der durch beide Betrachter festgestellten Versagensmodi wurde eine dritte Person hinzugezogen, um einen Konsens zu erlangen.

Die Versagensmodi des Haftverbundes zwischen Wurzelstift und Kunststoffaufbau wurden schließlich in vier Typen eingeteilt:

Typ 1: reines adhäsives Versagen

(adhäsives Versagen zwischen Stift und Aufbaumaterial);

Typ 2: gemischtes adhäsives Versagen I

(überwiegend kohäsives Versagen im Stift (> 70 %) und zusätzlich adhäsives Versagen zwischen Stift und Aufbaumaterial);

- Typ 3: gemischtes adhäsives Versagen II  
(überwiegend adhäsives Versagen zwischen Stift und Aufbaumaterial (> 70 %) und zusätzlich kohäsives Versagen im Aufbaumaterial);
- Typ 4: rein kohäsives Versagen im Faserstift;
- Typ 5: keine Auswertung möglich.

#### 4.2.5 REM-Aufnahmen der Faserstifte

Des Weiteren wurden exemplarisch von jedem unbehandelten Faserstifttyp Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (Cam Scan Maxim 2040; Cam Scan Maxim Electron Optics LTD, Cambridge, Großbritannien) bei 200-facher Vergrößerung angefertigt, um deren Oberflächenbeschaffenheit zu analysieren.

#### 4.2.6 Statistik

Alle statistischen Analysen wurden mit der Software SPSS 14.0 (SPSS, Chicago, Illinois, USA) ausgewertet. Der Einfluss der Aufbaumaterialien, der Vorbehandlung, der thermischen Wechselbelastung sowie der Stifttypen auf die Haftung wurde mit einer 4-Wege-ANOVA (Analysis of Variance) und anschließendem Post-hoc-Test (Tukey-B) auf Signifikanz geprüft. Als unabhängige Variable dienten dabei die Vorbehandlung, der Stifttyp, das Aufbaumaterial und das Thermocycling. Die Haftkraft wurde als abhängige Variable erfasst.

Die Varianzanalyse ist ein statistisches Verfahren der Datenanalyse und Mustererkennung, das versucht, die Varianz einer metrischen Variablen durch eine oder mehrere Variablen zu erklären. Das Verfahren untersucht, ob (und gegebenenfalls wie) sich der Erwartungswert einer metrischen Zufallsvariablen in verschiedenen Gruppen (auch Klassen) unterscheidet. In Prüfgrößen des Verfahrens wird getestet, ob die Varianz zwischen den Gruppen größer ist als die Varianz innerhalb der Gruppen. Dadurch kann ermittelt werden, ob sich die Gruppen signifikant unterscheiden oder nicht [ZÖFEL 2002]. Wenn ein solcher Unterschied vorliegt, wird in einem nachfolgenden Post-Hoc-Test überprüft, welche Gruppen sich unterscheiden. Dabei steht die Bildung homogener Untergruppen im Vordergrund. Der Tukey-B-Test stuft dabei die Gruppenmittelwerte ein und berechnet den Spannweitenwert.

Das Signifikanzniveau (maximale Irrtumswahrscheinlichkeit) wurde auf  $\alpha = 0,05$  festgelegt. Dabei gibt der p-Wert die Wahrscheinlichkeit dafür an, ob Unterschiede in Messwertreihen zweier Stichproben auch zufällig hätten gemessen werden können. Je kleiner der p-Wert, desto unwahrscheinlicher ist dies. Beträgt die Wahrscheinlichkeit weniger als 5 % ( $p = 0,05$ ), spricht man von signifikanten (überzufälligen) Unterschieden.

Die Versagensmodi wurden mit einer rein deskriptiven Statistik in Form einer Kreuztabelle ausgewertet.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Statistische Auswertung

Die mittleren Haftwerte aller untersuchten Faserstifte sind unter Berücksichtigung der Aufbaukomposite, der Vorbehandlung sowie der thermischen Wechselbelastung in Tabelle XII dargestellt.

**Tabelle XII** Haftwerte aller untersuchten faserverstärkten Wurzelkanalstifte unter Berücksichtigung folgender Faktorkombinationen: Stifftyp - Aufbaumaterial, Aufbaumaterial - Vorbehandlung, Aufbaumaterial - Thermocycling sowie Stifftyp – Thermocycling

Vorbehandlung	Haftkraft (SD) MPa					
	FRC Postec Plus		Unicore Post		everStick Post	
	MC	CC	MC	CC	MC	CC
ohne Vorbeh. initial	22,3 (2,7)	18,4 (1,4)	19,1 (2,1)	23 (4,8)	29,8 (2,8)	25,4 (4,6)
silanisiert initial	26,3 (4,3)	21,3 (2,2)	21,6 (2,2)	26,7 (2,8)	30,9 (2,5)	23,8 (2,5)
ohne Vorbeh. mit TC	14,5 (2,9)	17,4 (3,2)	7,6 (3,2)	15,8 (3,2)	17,4 (4,0)	15,7 (3,0)
silanisiert mit TC	15,3 (2,8)	16,9 (1,4)	14,3 (4,8)	15,8 (3,4)	26,3 (5,0)	14,8 (2,2)

Die Haftkraft zwischen faserverstärktem Wurzelkanalstift und Aufbau wurde signifikant durch das Thermocycling ( $p < 0.0005$ ), den Stifftyp ( $p < 0.0005$ ) und durch die Vorbehandlung ( $p < 0.0005$ ) beeinflusst. Keinen Einfluss auf die Haftkraft hatte hingegen das Aufbaumaterial ( $p = 0,149$ ; 4-Wege-ANOVA).

Einen ebenfalls signifikanten Einfluss hatten zudem die Faktorkombinationen Stifftyp - Aufbaumaterial ( $p < 0,0005$ ), Aufbaumaterial - Vorbehandlung ( $p < 0,0005$ ), Aufbaumaterial - Thermocycling ( $p = 0,001$ ) und Stifftyp - Thermocycling ( $p = 0,018$ ). Detaillierte Ergebnisse zu diesen Interaktionen sind in Tabelle XIII dargestellt.

**Tabelle XIII** Interaktionen zwischen Aufbaumaterialien und Stifttypen, Aufbaumaterial und Thermocycling sowie Aufbaumaterial und Vorbehandlung, Haftwerte in MPa (SD)

<b>Komposit</b>	<b>Stifttyp</b>			<b>Thermocycling</b>		<b>Vorbehandlung</b>	
	<b>FRC Postec Plus</b>	<b>Unicore Post</b>	<b>ever Stick Post</b>	<b>initial</b>	<b>TC</b>	<b>Kontrolle</b>	<b>mit Silan</b>
<b>Multi Core Flow</b>	19,1 (6,3)	15,6 (6,2)	26,2 (6,3)	25,0 (5,2)	15,6 (6,7)	18,5 (7,4)	22,1 (7,4)
<b>ClearfilTM Core</b>	18,5 (2,7)	20,3 (7,5)	20,4 (4,5)	23,1 (4,2)	16,4 (2,6)	19,6 (4,8)	19,9 (4,9)
<b>Abweichung</b>	0,6	- 4,7	5,8	1,9	- 0,8	- 1,1	2,2
<b>p-Wert</b>	0,348	0,0005	0,0005	0,001	0,202	0,058	0,0005

### 5.1.1 Einfluss der Vorbehandlung auf die Haftkraft

Durch die Silanisierung konnten die Haftwerte [MW (SA)] [21,0 (6,3) Mpa] nach 24 Stunden Lagerung in Kochsalzlösung gegenüber den unbehandelten Faserstiften [19,0 (6,2) MPa] signifikant erhöht werden ( $p < 0,005$ , Tukey-B). Die durchschnittlichen Haftwerte [24,0 (4,8) MPa] sanken signifikant nach dem Thermocycling [16,0 (5,0) MPa] ( $p < 0,005$ , Tukey-B). Nach der thermischen Wechselbelastung wiederum zeigten sich bezüglich der Haftwerte keine signifikanten Unterschiede zwischen den vorbehandelten faserverstärkten Wurzelkanalstiften [16,9 (5,4) MPa] und den unbehandelten [15,1 (4,6) MPa] ( $p < 0,018$ , Tukey-B).

Verglichen mit dem silanisierten Unicore Post [24,2 (3,6) MPa] und dem silanisierten FRC Postec Plus [23,8 (4,2) MPa] wurden mit dem silanisierten everStick Post [27,3 (4,3) MPa] die signifikant höchsten Haftwerte nach 24-stündiger Lagerung in Kochsalzlösung erreicht ( $p < 0,005$ , Tukey-B). Auch im Anschluss an das Thermocycling wies der silanierte everStick Post [20,5 (6,8) MPa] statistisch signifikant höhere Haftwerte als Unicore Post [15,1 (3,8) MPa] und FRC Postec Plus [15,3 (2,9) MPa] auf ( $p < 0,005$ , Tukey-B). Die Tabelle XIV zeigt zusammenfassend die Effekte der Vorbehandlungen auf die Haftkraft unter Berücksichtigung des Stifttyps.

**Tabelle XIV** Effekte der Vorbehandlungen auf die Haftkraft unter Berücksichtigung des Stifttyps

Vorbehandlung	Haftkraft (SD) MPa		
	FRC Postec Plus	Unicore Post	everStick Post
ohne Vorbeh. initial	20,3 (2,9)	21,0 (4,1)	27,6 (4,4)
silanisiert initial	23,8 (4,2)	24,2 (3,6)	27,3 (4,3)
ohne Vorbeh. mit TC	15,9 (3,3)	11,7 (4,7)	17,6 (3,5)
silanisiert mit TC	15,3 (2,8)	15,1 (3,8)	20,6 (6,8)

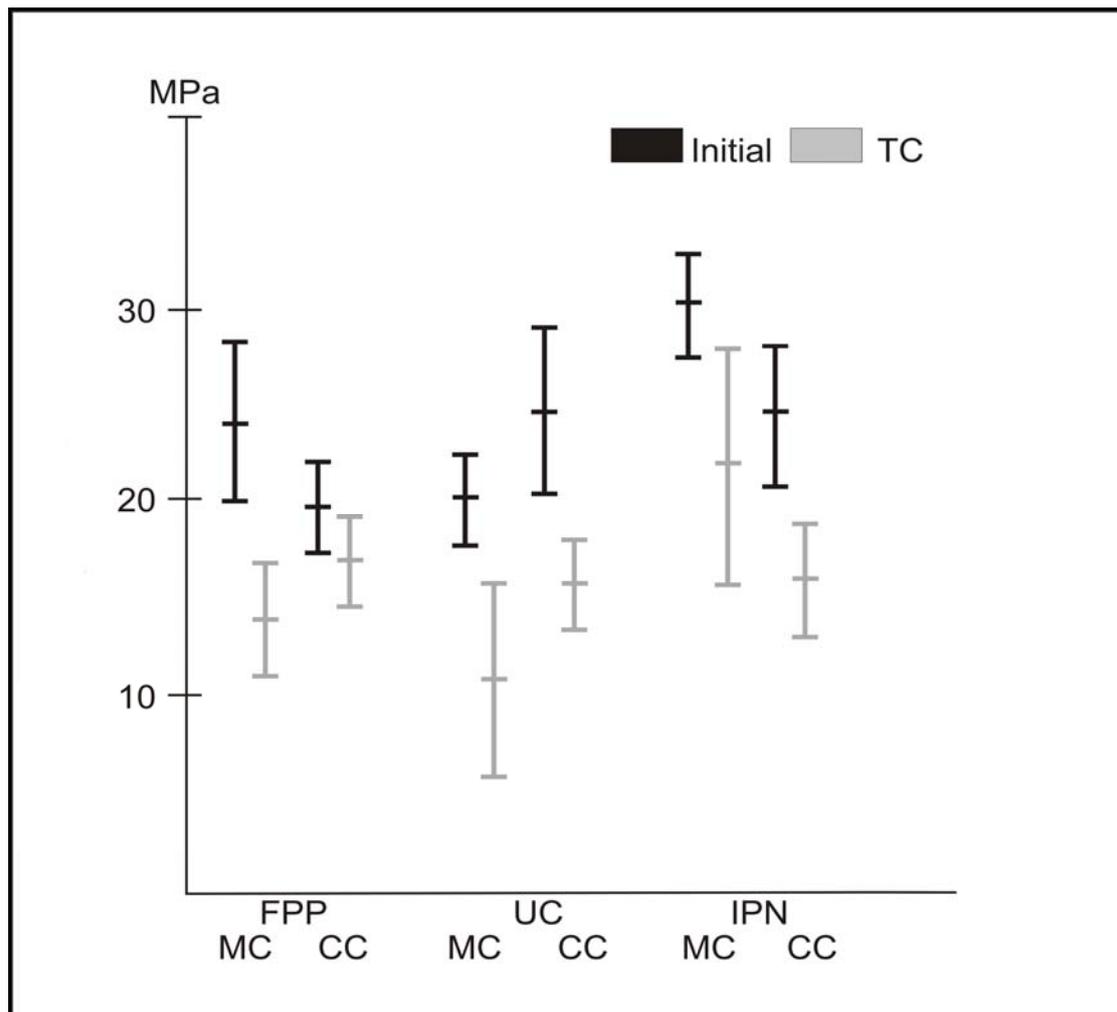
Unterschiedliche Effekte zeigte die Vorbehandlung darüber hinaus bei den verwendeten Aufbaukompositen. Gegenüber den Faserstiften aus der Kontrollgruppe [18,5 (7,4) MPa] konnten die Haftwerte durch die Silanisierung in Verbindung mit Multi Core Flow [20,9 (6,8) MPa] signifikant ( $p < 0,005$ , Tukey-B) erhöht werden. Keinen signifikanten Einfluss jedoch zeigte die Silanisierung [19,2 (5,0) MPa] bei ClearfilTM Core beim Vergleich mit der Kontrollgruppe [19,6 (4,8) MPa].

#### 5.1.2 Einfluss der Komposite auf die Haftkraft

Durch eine paarweise Gegenüberstellung (erweiterter t-Test; Bonferroni Faktor 6) konnten auch zwischen den verschiedenen Aufbaumaterialien signifikante Unterschiede im Bezug auf die Haftwerte ermittelt werden. So zeigte Multi Core Flow in Verbindung mit den FRC Postec Plus [22,3 (2,7)] sowie mit den everStick Faserstiften [29,8 (2,8)] initial deutlich höhere Haftkräfte, während ClearfilTM Core initial einen festeren Verbund mit den Unicore Posts [23,0 (4,8)] einging ( $p < 0,005$ , Tukey-B).

Das Thermocycling wiederum führte zu einer signifikanten Verminderung der Haftkräfte bei beiden Kompositen ( $p < 0,01$ , Tukey-B). Nach dem Thermocycling zeigte ClearfilTM Core schließlich den besseren Haftverbund in Verbindung mit den FRC Postec Plus [17,4 (3,2)] und den Unicore Stiften [15,8 (3,2)]. Multi Core Flow hingegen wies nach dem Thermocycling die höchsten Haftwerte in Verbindung mit den everStick Posts [17,4 (4,0)] auf.

Die initialen Haftwerte sowie jene nach der thermischen Wechselbelastung sind in Abbildung 11 dargestellt.



**Abb. 11** Haftwerte der Faserstifte in MPa in Abhängigkeit von den verwendeten Kompositen, ohne Berücksichtigung der Vorbehandlung

### 5.1.3 Optische Bruchflächenanalyse

Die optische Bruchflächenanalyse ergab, dass die verschiedenen Bruchmodi signifikant durch die Stifttypen ( $p < 0,05$ ) sowie durch die Aufbaumaterialien ( $p < 0,05$ ; Chi-Quadrat-Test) beeinflusst wurden. Silanisierung und Thermocycling hatten dagegen keinen Einfluss auf die Bruchmodi ( $p > 0,05$ ; Chi-Quadrat-Test).

Die Ergebnisse der Bruchflächenanalyse sind in den Tabellen XV und XVI dargestellt, wobei auch die Stifttypen und Komposite Berücksichtigung finden. Im Vergleich zu den anderen getesteten Wurzelstiften wies der everStick Post insgesamt sowohl die meisten Kohäsionsbrüche innerhalb des Stiftes wie auch die meisten gemischten Adhäsivbrüche auf.

**Tabelle XV** Analyse der Bruchmodi unter Berücksichtigung der Stifftypen

Stifftyp	Bruchmodi in %				
	Adhäsivbruch	gemischter Adhäsivbruch I	gemischter Adhäsivbruch II	Kohäsionsbruch im Faserstift	keine Auswertung möglich
FRC Postec Plus	67,4	5,0	26,3	0,0	1,3
Unicore Post	58,8	11,3	28,8	1,3	0,0
everStick Post	10,0	50,0	18,7	20,0	1,3

**Tabelle XVI** Analyse der Bruchmodi unter Berücksichtigung der Komposittypen

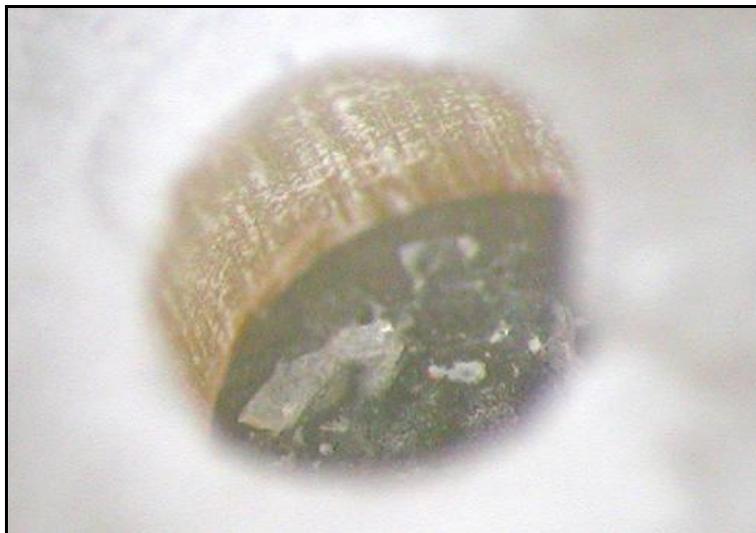
Komposit	Bruchmodi in %				
	Adhäsivbruch	gemischter Adhäsivbruch I	gemischter Adhäsivbruch II	Kohäsionsbruch im Faserstift	keine Auswertung möglich
MultiCore Flow	35,8	26,7	30,8	6,7	0,0
ClearfilTM	55,0	17,5	18,3	7,5	1,7

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die verschiedenen Bruchmodi der ausgestoßenen Proben unter einem Stereomikroskop bei 40-facher Vergrößerung. Abbildung 12 zeigt zunächst ein rein adhäsives Versagen. Hier ließen sich keine Faserreste des Wurzelkanalstiftes im Komposit nachweisen.



**Abb. 12** Adhäsives Versagen zwischen Faserstift und Komposit

Ein vorwiegend adhäsives Versagen zwischen Komposit und Faserstift mit kohäsiven Versagen im Stift ist in Abbildung 13 zu sehen. Gut erkennbar sind die dem Kompositaufbau anhaftenden einzelnen Faserstränge.



**Abb. 13** Adhäsives Versagen, gemischt mit kohäsiven Versagen

Abbildung 14 zeigt ein rein kohäsives Versagen im Faserstift. Deutlich sichtbar sind in diesem Probenausschnitt die vom Faserstift abgerissenen Faserbündel, welche dem Kompositaufbau anhaften.

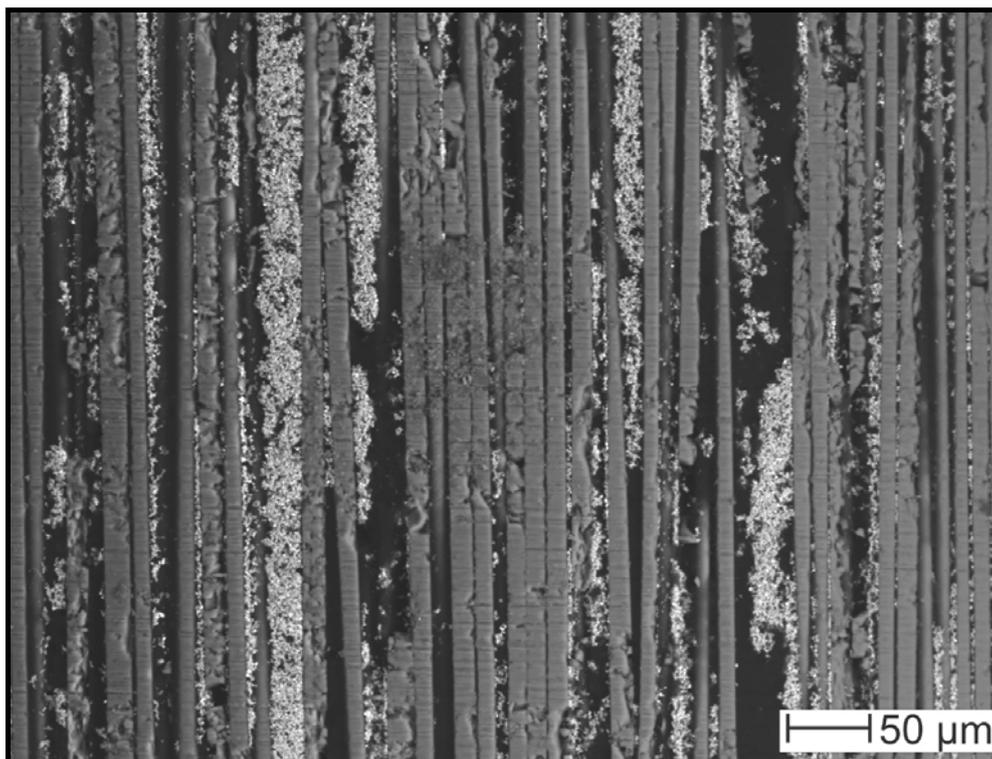


**Abb. 14** Rein kohäsives Versagen im Faserstift

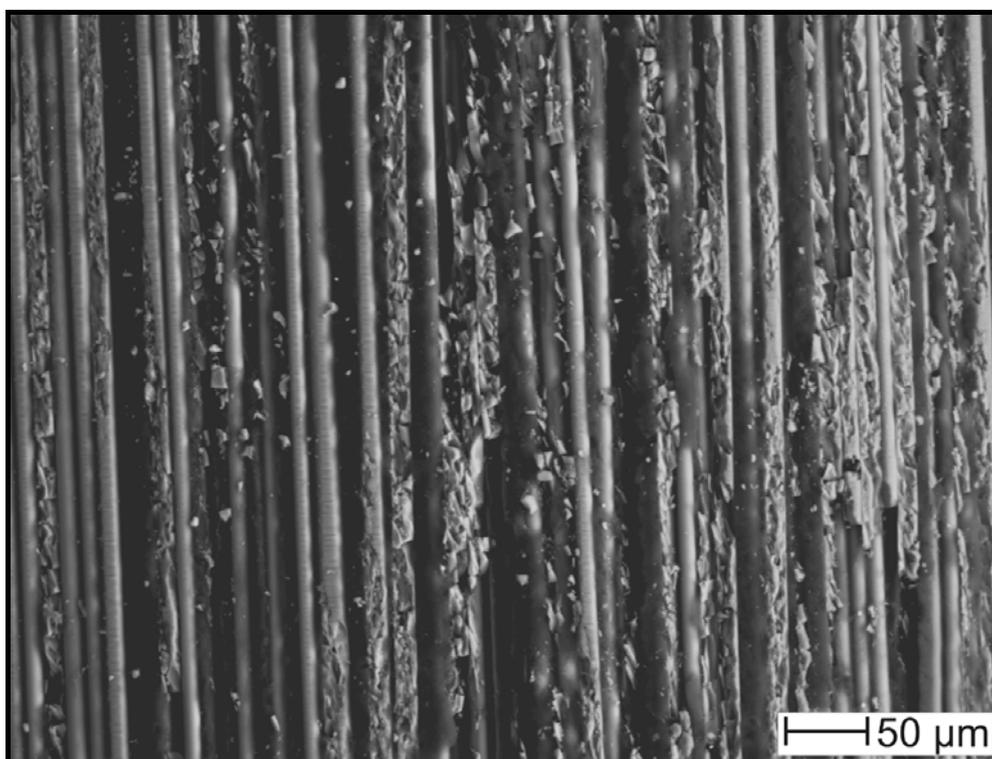
## 5.2 REM-Aufnahmen der Wurzelstifte

Die Aufnahmen der Faserstifte mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigen die freiliegenden Fasern sowie Bestandteile der Stiftmatrix deutlich an.

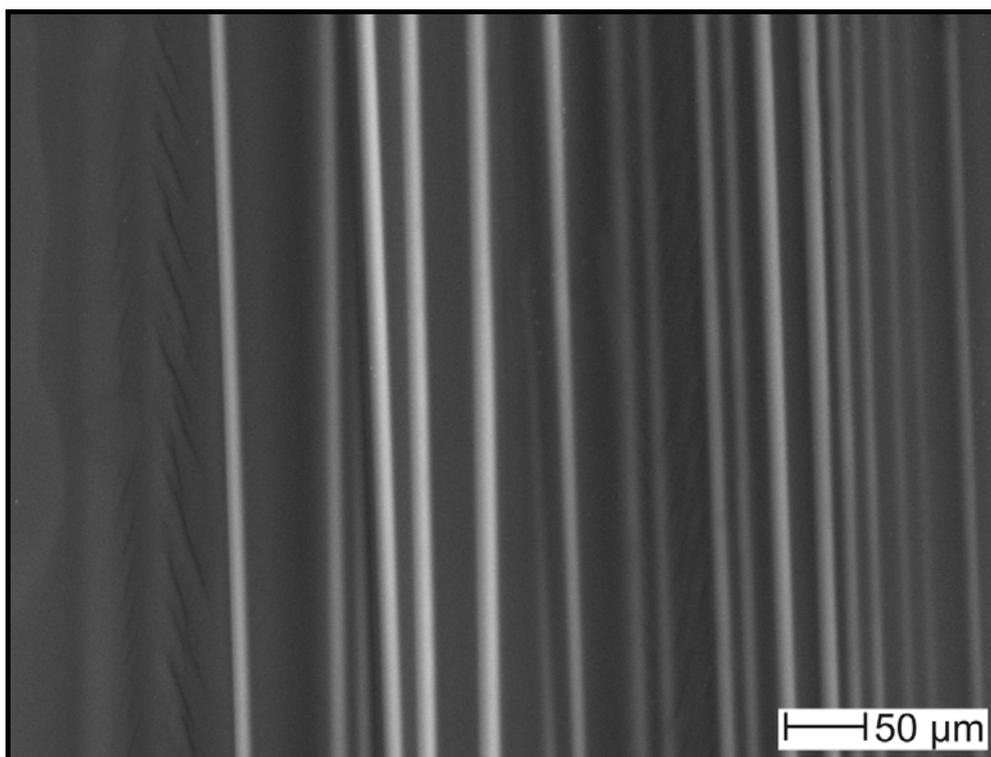
Die vorgefertigten Faserstifte weisen, im Gegensatz zum individuell formbaren everStick Post, auffallend mehr freiliegende Fasern sowie Unterschnitte auf. Zwischen den vorgefertigten Stifttypen (Unicore Post, FRC Postec Plus) konnten allerdings keine ausgeprägten Unterschiede festgestellt werden. Der individuell formbare everStick Post jedoch verfügt über eine deutlich glattere Oberfläche, die mit einer dünnen PMMA-Schicht überzogen ist. Die einzelnen Aufnahmen der Faserstifte sind in den Abbildungen 15 bis 17 dargestellt.



**Abb. 15** REM-Aufnahme der Oberfläche des FRC Postec Plus mit gut sichtbaren freiliegenden Fasern sowie Matrixbestandteilen



**Abb. 16** REM-Aufnahme des Unicore Post zeigt ebenfalls freiliegende Fasern sowie Matrixbestandteile an der Stiftoberfläche



**Abb. 17** REM-Aufnahme des everStick Posts, überzogen mit einer Stick-Resin-Schicht entsprechend den Herstellungsvorgaben

## 6. Diskussion

### 6.1 Diskussion von Material und Methoden

Die vorliegende Studie widmete sich der Frage, welche Effekte Silanisierung und thermozyklische Wechselbelastung auf die Haftkraft zwischen Kompositmaterialien und unterschiedlichen faserverstärkten Wurzelstiften haben, und zog zu deren Beantwortung vorrangig die Auswertung von Ausstoßversuchen heran.

Verwendet wurden dafür faserverstärkte Wurzelkanalstifte von drei Herstellern. Diese Auswahl sollte einen möglichst breiten Querschnitt der sich am Markt befindlichen Stifttypen repräsentieren.

So unterschieden sich die Faserstifte sowohl in ihrem Aufbau (Glasfaserstifte: FRC Postec Plus, everStick Post; Quarzfaserstift: Unicore Post) wie auch in ihrem Stiftdesign (konfektionierte Faserstifte: FRC Postec Plus, Unicore Post; individuell formbar: everStick Post). Die konfektionierten Stifte bestehen zu großen Teilen aus an der Oberfläche freiliegenden Glas- beziehungsweise Quarzfasern, eingebettet in eine stark vernetzte Polymer-Matrix. Der individuell formbare everStick Post besteht aus einem interpenetrierenden Polymer-Netzwerk, in welches die Glasfasern eingebettet sind. An der Oberfläche des everStick Posts befindet sich eine mit PMMA angereicherte Schicht.

Die in dieser Studie verwendeten Aufbaukomposite werden vom jeweiligen Hersteller als Aufbaumaterial in Verbindung mit Faserstiften empfohlen. Beide Komposite wurden zusammen mit dem entsprechenden Adhäsivsystem des gleichen Herstellers verwendet. Sie unterschieden sich bezüglich ihrer Viskosität (niedrig viskös: Multi Core Flow; hoch viskös: Clearfil™).

Die Vorbehandlung der Faserstifte erfolgte mit Silanen und entsprechend der Vorgaben des Kompositherstellers. Die Silane wurden als Vorbehandlungsmethode ausgewählt, da sie die Fähigkeit besitzen, einen chemischen Verbund zwischen einer anorganischen Oberfläche und einer organischen Matrix herstellen zu können. Die verwendeten Silane (3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan) sind folglich in der Lage, eine chemische Bindung mit den freiliegenden Fasern der faserverstärkten Wurzelkanalstifte einzugehen. Diese Eigenschaft war grundlegend für die Hypothese, dass Silane den Haftverbund auf möglichst positive Weise beeinflussen.

#### 6.1.1 Herstellung der Prüfkörper

Um einen genormten Kompositaufbau zu gewährleisten, wurden spezielle Plastikformen (Eigenbau der Charité) entworfen und hergestellt. Dies erst ermöglichte ein standardisiertes Vorgehen bei der Probenherstellung sowie uniforme Probekörper. Dass sich die Plastikformen öffnen ließen, gestattete eine stress- und

spannungsfreie Entnahme der Prüfkörper, wodurch auch deren Beschädigung vor den Ausstoßversuchen verhindert werden konnte.

Alle verwendeten Materialien wurden unter strikter Einhaltung der Herstellerangaben verarbeitet. Da es sich bei den Aufbaumaterialien um zäh fließende Massen handelt, kann es beim Einbringen in die Hohlform zum Einschließen von Luftblasen kommen, welche die Qualität des Aufbaus beeinträchtigen können [MONTICELLI et al. 2005]. Durch eine schichtweise Befüllung der Hohlform unter visueller Kontrolle sollte dies vermieden werden.

### 6.1.2 Thermozyklische Wechselbelastung

Die Lagerung von Proben in physiologischer Kochsalzlösung sowie die thermozyklische Wechselbelastung sind häufig angewandte Verfahren von In-Vitro-Versuchen, mit denen der in der Mundhöhle auftretende thermale Stress simulieren wird. Dieser Stress kann durch den wechselnden Verzehr von warmen und kalten Speisen [PALMER et al. 1992] sowie durch das Atmen entstehen.

Um nicht fälschlicherweise positive Ergebnisse durch Überstrapazierung oder falsch negative Ergebnisse durch zu geringe Belastung zu erzielen, sollten die verwendeten Temperaturen nur realistischen Werten entsprechen, die tatsächlich im Mund auftreten [PALMER et al. 1992]. Klinischen Untersuchungen zufolge kann für Nahrungsmittel und Getränke eine Maximaltemperatur von 55 bis 60 °C und eine Minimaltemperatur von 0 bis 5 °C in der Mundhöhle angenommen werden [PALMER et al. 1992]. Diese Werte entsprechen ebenfalls den ermittelten Medianwerten einer Literaturrecherche, in der 130 Studien zur künstlichen Alterung durch Temperaturwechsel ausgewertet wurden [GALE und DARVELL 1999], und bildeten deshalb die Grundlage für die in vorliegender Studie verwendeten Temperaturen und Wässerungszeiten.

Grundsätzlich kann es durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aller Verbundmaterialien zu Spannungen kommen. Wenn die auftretenden Spannungen und damit wirkenden Kräfte entlang der Kontaktflächen größer sind als die des adhäsiven Verbundes, kann es zu einer Spaltbildung zwischen Stift und Aufbaukomposit kommen. Darüber hinaus kann es durch die Langzeitbelastung in feuchtem Milieu zu einer Hydrolyse des Silans kommen, die schließlich den Verbund zwischen Faserstift und Aufbaumaterial schwächt. Im Gegensatz zu einer alleinigen Wasserlagerung stellt die thermische Wechselbelastung durch die Simulation der in der Mundhöhle auftretenden Temperaturschwankungen daher eine gute Beurteilungsmethode für Langzeitprognosen von Verbundmaterialien dar [LUTZ et al. 1984; CRIM et al. 1985].

### 6.1.3 Ausstoßversuch und Einfluss der Probenschichtdicke

Zur Ermittlung von Haftwerten an Wurzelstiften werden in der Literatur Ausstoßversuche [BOSCHIAN PEST *et al.* 2002], Auszugsversuche [DRUMMOND 2000] und Mikrozugfestigkeitsversuche [GORACCI *et al.* 2004] beschrieben. In der vorliegenden Studie wurden Ausstoßversuche zur Ermittlung der Haftwerte durchgeführt.

Der von Mandel zuerst vorgestellte Push-Out-Test (auch Microdebonding-Test oder Indentation-Test genannt) fand anfänglich Verwendung, um die Haftfestigkeit zwischen Faser und Matrix bei keramischen Faserverbundwerkstoffen zu untersuchen, und wurde später auf polymere Faserverbundwerkstoffe übertragen [MANDELL *et al.* 1980]. Heute gilt er als bewährtes Verfahren zur Untersuchung des Knochen-Implantat-Verbundes [SOLTÉSZ und BAUDENDISTEL 1990], zur Bestimmung der Komposit-Dentin-Haftung [HALLER *et al.* 1991] und vor allem im Wurzelbereich zur Beurteilung von unterschiedlichen Segmenten [BITTER *et al.* 2006; PERDIGAO *et al.* 2006].

Ein großer Vorteil der Ausstoßversuche ist die weitgehende Eliminierung von Kerbspannungen und Biegemomenten [HALLER *et al.* 1991]. Bei Scher- und Zugversuchen hingegen treten nicht uniforme Belastungsspitzen und Kerbspannungen häufig auf und führen so zu ungenauen Ergebnissen [FRANKENBERGER 2002]. Goracci beschreibt den Ausstoßversuch in ihren Studien als verlässliches Mittel, um die Verbundfestigkeit von Faserstiften zum Wurzelentin zu messen [GORACCI *et al.* 2004]. Besonders vorteilhaft ist die einfache Probenherstellung gegenüber der laborintensiven und technisch anspruchsvollen Probenherstellung bei Mikrozugfestigkeitsversuchen. Bei letzterer treten Defekte und Mikrorisse, die vorzeitiges Verbundversagen hervorrufen, schneller auf, etwa bei der Herstellung der Proben mit dem Sägemikrotom oder beim Herauspräparieren der Verbundfläche [BOUILLAGUET *et al.* 2003; GORACCI *et al.* 2004; SOARES *et al.* 2008]. Darüber hinaus erwiesen sich die Schwankungen in der Messwerteverteilung bei Ausstoßversuchen als akzeptabel [GORACCI *et al.* 2004; Soares *et al.* 2008].

Als nachteilig indes gilt die schwierige Ausrichtung der Proben zum Ausstoßstempel [DRUMMOND *et al.* 1996]. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass der Stempel bei jeder Probe in der exakt gleichen Position zum Faserstift platziert werden kann, wodurch extraaxiale Druckspannungen entstehen, die zu Messungenauigkeiten führen können [DRUMMOND *et al.* 1996]. Um Positionierungsfehler zu vermeiden, wurde in dieser Studie ein speziell angefertigter Auflagetisch zur Fixierung der Proben verwendet. Somit konnte gewährleistet werden, dass der Ausstoßstempel zu jedem Faserstift gleich positioniert werden konnte und ihn damit immer zentral belastete.

Die ermittelten Haftwerte der vorliegenden Studie fielen im Vergleich zu ähnlichen In-vitro-Studien deutlich höher aus [GORACCI *et al.* 2005; PEREZ *et al.* 2006]. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass in den Studien von Goracci und Perez der Verbund zwischen Befestigungskomposit und Wurzelkanaldentin die limitierende Einflussgröße und häufigste Ursache für Retentionsverluste war [GORACCI *et al.* 2005; PEREZ *et al.* 2006]. Darüber hinaus können die in der vorliegenden Studie ermittelten hohen Haftwerte vermutlich auf die höhere Schichtdicke der Proben zurückgeführt werden .

Die bei Ausstoßversuchen gemessenen Kräfte setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Zu Beginn der Belastung weist die Kraft-Verschiebungs-Kurve einen linearen Charakter auf, was auf eine unversehrte Verbindung zwischen den Kompositbestandteilen sowie auf ein elastisches Verhalten der Probe hindeutet. Im zweiten Teil der Kraft-Verschiebungs-Kurve zeigt sich jedoch ein nicht-linearer Verlauf. Dieser hängt mit einem progressiven Ablösen der Fasern von der Matrix im Grenzschichtbereich zusammen [BEHEL und SOTTOS 1998]. Dabei spielen Reibungskräfte, Kräfte der chemischen Adhäsion zwischen Faser und Kompositmatrix sowie mechanische Friktionskräfte, verursacht durch die Aufschumpfung des Komposits auf den Faserstift eine große Rolle.

In der vorliegenden Untersuchung wurden für den Ausstoßversuch Proben mit einer Sollhöhe von 2 mm herangezogen, so dass ein fassringartiges Schrumpfen des Komposits auf den Faserstift während der Polymerisation anschließend zu einer Erhöhung der Haftkräfte beigetragen haben sollte [GORACCI *et al.* 2004].

## 6.2 Diskussion der Ergebnisse

### 6.2.1 Einfluss der Faserstifte

In dieser Untersuchung wurden sowohl vorgefertigte wie auch individuell formbare Faserstifte verwendet. Dabei wies der individuell formbare everStick Post die höchsten Haftwerte zu den verwendeten Kompositen auf und bestätigte die Ergebnisse vorheriger Studien [LE BELL *et al.* 2004; LE BELL *et al.* 2005; BITTER *et al.* 2007]. Die nachgewiesenen höheren Haftwerte könnten aus der Zusammensetzung des everStick Stiftes resultieren, die eine Diffusion von Monomeren in die Stiftmatrix erlaubt [VALLITTU 2002]. Voraussetzung für diese Diffusion ist, dass die Löslichkeit der verwendeten Adhäsive mit jener des PMMA übereinstimmt. Für Adhäsivsysteme, welche Bis-GMA und Hydroxy-Ethyl-Methacrylat (HEMA) oder Triethylen-Glycol-Dimethacrylat (TEGDMA) enthalten, konnten eine solche Löslichkeit nachgewiesen werden [Mannocci *et al.* 2005]. Diese Ergebnisse konnten durch die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten HEMA-haltigen Adhäsive bestätigt werden.

Ferner wurden die everStick Faserstifte erst kurz vor Herstellung der Aufbauten geformt und polymerisiert, weshalb zusätzlich ein höherer Restmonomergehalt für die erhöhten Haftwerte gesorgt haben könnte. Auch in der Analyse der Bruchmodi spiegeln sich die hohen Ausstoßwerte des everStick Posts wider. Im Vergleich zu den anderen Faserstiften zeigten sich bei diesem Faserstift deutlich mehr Kohäsionsbrüche sowie gemischte Adhäsivbrüche mit überwiegendem Kohäsivbruch. Diese erhöhte Anzahl deutet darauf hin, dass der Verbund zwischen Stift und Aufbaumaterial die Stabilität des Stiftes überstiegen hat.

Konfektionierte Faserstifte wie der FRC Postec Plus und der Unicore Post, die in dieser Studie zur Anwendung kamen, besitzen währenddessen eine hoch vernetzte Polymer-Matrix. In dieser Matrix kann, aufgrund der hohen Anzahl an Karbondoppelbindungen, kaum eine Polymerisation mit freien Radikalen stattfinden [LASTUMAKI *et al.* 2002]. Diese Tatsache bestätigen auch die hier vorliegenden Ergebnisse, die deutlich niedrigeren Haftwerte bei den Ausstoßversuchen sowie das Überwiegen der adhäsiven Bruchmodi zwischen Aufbaumaterial und konfektionierten Faserstiften.

Die Penetration und Eindringtiefe von Monomeren in eine Polymer-Matrix ist abhängig von der Einwirkzeit, der Temperatur, der Löslichkeit des Monomers sowie von der Struktur der Matrix [KALLIO *et al.* 2003]. Die in dieser Studie verwendeten Applikationszeiten und Temperaturen entsprachen den Herstellerangaben und wurden genauestens eingehalten. Vermutlich könnte eine längere Applikationsdauer zu einer größeren Eindringtiefe des Monomers in die Polymer-Matrix führen [KALLIO *et al.* 2003]. Da dies im Klinikalltag jedoch nicht realistisch ist, wurde diese Hypothese in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

### 6.2.2 Einfluss der Silanisierung

Silane sind Zwittermoleküle und in der Lage, einen Verbund zwischen organischer und anorganischer Matrix herzustellen. Sie können sich einerseits mit ihrem organischen Anteil an die Matrix eines Komposits binden und andererseits über Si-O-Bindungen mit ihrem anorganischen Teil einen Verbund mit dem anorganischen Anteil des Faserstiftes eingehen [MATINLINNA *et al.* 2004]. Jener Verbund zum Komposit entsteht durch Doppelbindungen der Methacrylat-Gruppen. Dabei reagieren die im Silan enthaltenen Methacryl-Gruppen mit denen der Monomere eines aufgetragenen Kunststoffes durch radikalische Polymerisation [MATINLINNA *et al.* 2004]. Die Bindung des Silans an anorganische Substanzen erfolgt durch die Umsetzung des Silans zu Silanol. Durch Hydrolyse bilden sich dabei aus den Methoxy-Gruppen des Silans Hydroxyl-Gruppen. Diese Hydroxyl-Gruppen sind in der Lage, mit anderen Hydroxyl-Gruppen zu reagieren, die an den Oberflächen vieler anorganischer Verbindungen zu finden sind [MATINLINNA *et al.* 2004]. Eine

solche Bindung kommt jedoch nur mit den an der Oberfläche freiliegenden und somit für das Silan zugänglichen Fasern und Füllpartikeln zustande [FERRARI und SCOTTI 2002]. Darüber hinaus wird die Benetzbarkeit der Stifte mit Adhäsiven durch die Silanisierung verbessert [PARK und JIN 2001].

Dennoch werden die Effekte der Silanisierung in der Literatur kontrovers diskutiert. Anders als in dieser Studie konnte in einigen Studien keine Steigerung der Haftwerte durch die Silanisierung von faserverstärkten Wurzelkanalstiften festgestellt werden [SAHAFI *et al.* 2003; BITTER *et al.* 2006; PERDIGAO *et al.* 2006; RATHKE *et al.* 2009].

Perdigao *et al.* untersuchte den Einfluss der Silanisierung (Monobond-S) auf den Haftverbund zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften (DT Light Post, FRC Postec, ParaPost Fiber White) und den vom jeweiligen Hersteller empfohlenen Befestigungskompositen (Post Cement Hi-X; Variolink II, ParaPost Resin Cement). Dazu wurden 54 Faserstifte mit und ohne vorherige Silanisierung in humane Canini inseriert. Die Proben wurden anschließend in 2 mm hohe Scheiben zerschnitten und in destilliertem Wasser gelagert. Nach der Wasserlagerung wurden Ausstoßversuche durchgeführt und die Bruchmodi analysiert. Dabei wurde hauptsächlich (60,5 %) adhäsives Versagen zwischen Faserstift und Befestigungskomposit sowie adhäsives Versagen zwischen Wurzeldentin und Faserstift beobachtet (39,5 %) beobachtet. Durch die Silanisierung konnte in dieser Studie keine signifikante Erhöhung der Haftwerte erreicht werden ( $p > 0,403$ ; ohne Silan [12,7 (8,4) MPa], mit Silan [14,1 (7,0) MPa]). Die Ineffizienz der Silane wird in jener Studie auf die geringe Fließ- und Benetzungsfähigkeit der verwendeten Befestigungskomposite zurückgeführt. Die Autoren vermuten, dass durch die Verwendung fließfähiger Komposite, wie sie in der hier vorliegenden Studie verwendet wurden, ein innigerer Verbund zwischen Faserstift, Silan und Komposit zustande kommt [PERDIGAO *et al.* 2006].

Rathke *et al.* dagegen führte die Ineffizienz der Silane auf den sehr schwachen oder sogar ausbleibenden Verbund zwischen den funktionellen Gruppen des Silans (Silanolgruppen) und der Kunststoffbasis der Stifte zurück, da letztere an der Oberfläche kaum Silizium enthält. Weitere Gründe vermutet Rathke in der geringen Anzahl von freiliegenden Fasern und Füllkörpern sowie in einer eventuell vorzeitigen Hydrolyse des Silans durch die umgebende Luftfeuchtigkeit [Rathke *et al.* 2009]. Auch in dieser Untersuchung wurde der Einfluss von Silanisierung (Monobond-S) und verschiedenen Bondingsystemen (Prime & Bond NT, Excite DSC, ED Primer II) auf den Haftverbund zu faserverstärkten Wurzelkanalstiften (DT White Post, DT Light Post, FRC Postec), Befestigungskompositen (Dyract Cem Plus, Variolink II, Panavia F, RelyX Unicem) und Wurzeldentin durch Ausstoßversuche ermittelt [RATHKE *et al.* 2009].

Die Arbeitsgruppen um Aksornmuang und Goracci untersuchten ebenfalls den Einfluss der Silanisierung auf den Haftverbund zwischen Faserstift und Kompositmaterial und konnten diesen durch das Auftragen von Silanen erhöhen [Aksornmuang et al. 2004; GORACCI *et al.* 2005].

Goracci et al. untersuchten in ihrer Studie den Einfluss der Silanisierung (Monobond-S) auf den Haftverbund zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften (DT Lightpost, FRC Postec) und fließfähigen Kompositen (Unifil Flow, Tetric Flow) durch Mikrozugfestigkeitsversuche. Die Steigerung der Haftkraft nach Applizierung eines Silans wird hier auf die bessere Benetzbarkeit der Stiftoberfläche zurückgeführt. Die Autoren vermuten, dass es aufgrund der geringen Viskosität der Silane zu einem innigeren Kontakt der Verbundmaterialien und somit zur Bindung durch physikalische Adhäsion kommt. Letztere soll eine chemische Bindung der Verbundmaterialien begünstigen [GORACCI *et al.* 2005].

Aksornmuang et al. führen die erhöhten Haftwerte nach Silanapplikation auf den chemischen Verbund (Siloxanverbindungen) zwischen den anorganischen Bestandteilen des Faserstiftes und den organischen Bestandteilen der Polymer-Matrix des Komposits zurück [AKSORNMUANG *et al.* 2004.]. Gegenstand dieser Untersuchung war der Haftverbund zwischen faserverstärkten Wurzelkanalstiften (Snowpost, Aestheti-Plus) und einem Aufbaukomposit (Clearfil DC Core) unter Anwendung eines Silans (Porcelain Bond Activator) als Vorbehandlungsmethode sowie eines Bondingsystems (Clearfil Liner Bond 2V, mit und ohne Lichthärtung).

In der vorliegenden Arbeit schließlich konnten die Haftwerte durch die Applikation der Silane ebenfalls signifikant gesteigert werden. Die größte Steigerung der Haftkräfte nach Silanisierung wurden bei den vorgefertigten Stiften FRC Postec Plus und Unicore Post erreicht. Dies ist wahrscheinlich auf den erhöhten Anteil von freiliegenden Fasern und Füllkörpern der vorgefertigten Faserstifte gegenüber dem everStick Post zurückzuführen. Die Oberfläche des individuell formbaren everStick Post hingegen ist mit einer mit PMMA angereicherten Schicht überzogen, so dass nur wenige freiliegende Faseranteile zur Anbindung des Silans per Siloxanverbindungen zur Verfügung stehen.

Im Umkehrschluss könnte eben durch den deutlich höheren Anteil freiliegender anorganischer Substanzen eine bessere Anbindung des Silans über Siloxanverbindungen an die konfektionierten faserverstärkten Wurzelkanalstifte ermöglicht worden sein. Da die Erhöhung der Haftwerte im Mittel nur zwei bis vier MPa betrug, ist deren klinische Relevanz jedoch fraglich [WRBAS *et al.* 2007].

### 6.2.3 Einfluss der thermischen Wechselbelastung

In dieser Studie konnte eine signifikante Reduktion der Haftkraft nach künstlicher Alterung durch Wasserlagerung und thermischer Wechselbelastung festgestellt

werden. Die verminderten Haftwerte nach längerer Wasserlagerung und thermischer Wechselbelastung stehen in Einklang mit anderen Studien [VALLITTU 2000; LASSILA *et al.* 2004].

Komposite unterliegen nach der Polymerisation einer Alterung und Degradation, welche durch Lagerung im feuchten Milieu, die daraus resultierende Wasseraufnahme sowie durch thermische Wechselbelastung beschleunigt werden kann [VALLITTU 2000]. Folgen dieser Einwirkungen sind Expansion und der so genannte Weichmachereffekt [Vallittu 2000], welcher zu einer Verminderung der Haftwerte führen kann [LASSILA *et al.* 2004]. Jene Wasseraufnahme konnte vor allem für die organische Matrix der Komposite nachgewiesen werden und verringert sich proportional zum Füllstoffanteil [EHRENSTEIN 2006].

Die Unterschiede in der Haftung, die auf eine reduzierte Langzeitstabilität des Verbundes zwischen Aufbaukomposit und Faserstift nach thermischer Wechselbelastung hindeuten, wurden möglicherweise durch die verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der untersuchten Kompositmaterialien beeinflusst. Lassila *et al.* wiesen in einer Studie nach, dass es während einer solchen thermischer Wechselbelastung zwischen den Fasern und den verstärkenden Matrixbestandteilen von Wurzelkanalstiften große Unterschiede bezüglich der thermischen Ausdehnungskoeffizienten gibt [LASSILA *et al.* 2004].

Die daraus resultierenden Spannungen könnten mit denen interagieren, welche gleichzeitig durch die verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der untersuchten Faserstifte und der Aufbaukomposite entstehen. Zusätzlich könnten sich während der Polymerisation durch das fassringartige Aufschrumpfen der Kunststoffzylinder auf die Wurzelstifte weitere Spannungen aufbauen und somit zu einer Schwächung des Haftverbundes führen.

Bouillaguet beschreibt einen schwächeren Haftverbund nach künstlicher Alterung, die insgesamt zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der faserverstärkten Wurzelstifte führte [BOUILLAGUET *et al.* 2006]. Infolge der Wasserlagerung könnte es zu einer Hydrolyse der Silane kommen, welche zum einen den Verbund zwischen Fasern und Polymer-Matrix innerhalb des Faserstifts sowie zum anderen den Haftverbund zwischen Kompositaufbau und Faserstift verbessern sollen [MEYER *et al.* 1994; LASSILA *et al.* 2002]. Daher ergibt sich für das klinische Vorgehen die Empfehlung, dass der faserverstärkte Wurzelkanalstift auch nach der Präparation mit Komposit bedeckt sein sollte, um eine Beeinträchtigung der physikalischen Eigenschaften durch die Wasseraufnahme zu verhindern.

Purton hingegen konnte keinen Einfluss der thermischen Wechselbelastung auf den Haftverbund feststellen [PURTON *et al.* 2003]. In dieser Studie wurden faserverstärkte Wurzelkanalstifte in humane Zahnwurzeln inseriert und anschließend

der Einfluss von Temperaturwechselbelastungen (3000 Zyklen á 60 s, Wasserbad 5 °C und 55 °C) auf den Haftverbund im Vergleich zu Kontrollgruppen (Wasserbad 37 °C) getestet. Die geringe Wirkung der thermischen Wechselbelastung auf den Haftverbund ist dabei wahrscheinlich auf einen isolierenden Effekt der Zahnwurzel zurückzuführen [BITTER *et al.* 2006].

#### 6.2.4 Einfluss des Komposittyps

In den hier dargestellten Versuchen wurden sowohl das niedrig visköse MultiCore Flow wie auch das hoch visköse Clearfil™ Core als Aufbaukomposit verwendet.

Einige Studien deuten darauf hin, dass es bei der Anwendung von fließfähigen Kompositaufbaumaterialien zur Ausbildung einer gleichmäßigeren und kompakteren Interdiffusionszone zwischen Faserstift und Aufbaumaterial als bei hoch viskösen Kompositen kommt [MONTICELLI *et al.* 2004; SADEK *et al.* 2006]. Die vorliegende Studie konnte jedoch keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Haftwerte beider Komposite nachweisen. Dieses Ergebnis wird durch eine jüngere Studie von Monticelli *et al.* bestätigt. Hier wurde der Haftverbund verschiedener Faserstifte zu zwei Aufbaumaterialien unter dem Aspekt der Vorbehandlungen analysiert. Dabei wurden ein hoch visköses (Core Paste XP) und ein niedrig visköses (UniFil Flow) Komposit zur Herstellung der Aufbauten verwendet. Nach der Durchführung von Mikrozugfestigkeitsversuchen konnten bezüglich der Haftwerte keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Kompositen festgestellt werden [MONTICELLI *et al.* 2006].

Wrbas hingegen konstatierte in einer 2007 veröffentlichten Studie einen solchen signifikanten Unterschied der Haftwerte bezüglich der verwendeten Aufbaukomposite zu den inserierten Faserstiften [WRBAS *et al.* 2007]. In dieser Studie kamen das hoch visköse Clearfil™ Core und das fließfähige MultiCore Flow in Verbindung mit DT Light Posts zur Anwendung. Nach der Durchführung von Zugversuchen konnten signifikant höhere Haftwerte für Clearfil™ Core ermittelt werden. Diese Werte führt Wrbas auf einen größeren Anteil von Füllstoffen im Clearfil™ Core (78,0 %), MultiCore Flow 71% und den daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften sowie der geringeren Polymerisationsschrumpfung zurück.

In der vorliegenden Studie zeigte sich währenddessen, dass die Haftkraft signifikant von der Kombination aus Stifftyp und Komposit beeinflusst werden kann. So erreichte das fließfähige MultiCore Flow in Kombination mit dem everStick Post, mit und ohne thermische Wechselbelastung, die höchsten Haftwerte bei den Ausstoßversuchen. Grundlage für diese stärkere Bindung könnte der erhöhte Gehalt von Monomeren im fließfähigen Aufbaumaterial MultiCore Flow sein. Dieser erhöhte Anteil könnte eine bessere Penetration in die mehrphasige Polymer-Matrix des

everStick Posts ermöglicht haben. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Haftkraft verschiedener Aufbaumaterialien zu Faserstiften von mehreren Faktoren abhängig ist, etwa von der chemischen Bindungsfähigkeit, der mikromechanischen Retentionen [GORACCI *et al.* 2005; SALAMEH *et al.* 2006], der Fließfähigkeit und folglich auch vom Monomergehalt [ALVAREZ-GAYOSSO *et al.* 2004].

#### 6.2.5 Analyse des Versagensmodus

Die Analyse der Versagensmodi zeigte bei dem individuell formbaren everStick Post, im Vergleich zu den konfektionierten Faserstiften FRC Postec Plus und Unicore Post, signifikant häufiger den gemischten Adhäsivbruch Typ I mit überwiegendem Kohäsivbruch im Stift sowie den Adhäsivbruch zwischen Stift und Aufbaumaterial. Der höhere Anteil an gemischten Adhäsivbrüchen vom Typ I deutet auf einen festeren Verbund zwischen Faserstift und Aufbaukomposit hin und steht in Einklang mit den erhöhten Haftwerten für den everStick Post, die in den Ausstoßversuchen ermittelt wurden. Betrachtet man nun die Versagensmodi im Hinblick auf die Vorbehandlung (Silanisierung), so lässt sich keine Beeinflussung der Versagensmodi feststellen. Dies steht ebenfalls in Einklang mit der nur sehr geringen Steigerung der Haftwerte durch die Silanisierung.

Dennoch sollte bei der Interpretation der Bruchmodi berücksichtigt werden, dass es Hinweise darauf gibt, dass es nicht immer der schwächste Punkt ist, an dem Risse entstehen [WATANABE UND NAKABAYASHI 1994]. Vielmehr könnten selbst die kleinsten Veränderungen im Versuchsaufbau, im Versuchsablauf sowie bei der Probenherstellung zu erheblichen Abweichungen der Haftwerte und den daraus resultierenden Bruchmodi führen [VERSLUIS *et al.* 1997].

## 7. Schlussfolgerung

In der vorliegenden Studie konnte eine der vier aufgestellten Nullhypothesen bestätigt werden: Die Haftkraft zwischen Faserstift und Aufbaumaterial wird nicht signifikant von der Art des Kunststoffes beeinflusst.

Die drei weiteren Nullhypothesen wurden jedoch nicht bestätigt. Vielmehr war es so, dass sich die Festigkeit des Haftverbundes durch die Vorbehandlung (Silanisierung) signifikant erhöhen ließ. Des weiteren wurde der Haftverbund durch die thermische Wechselbelastung im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant geschwächt. Die Haftung zum Aufbaukomposit schließlich wurde signifikant durch den Stifftyp beeinflusst.

1. Durch die Silanisierung der Faserstifte konnte die Haftkraft der Aufbaukomposite zu den Faserstiften, übereinstimmend mit anderen Studien [AKSORNMUANG *et al.* 2004; GORACCI *et al.* 2005], statistisch signifikant erhöht werden. Die größte Steigerung des Haftverbundes konnte bei den vorgefertigten Stiften FRC Postec Plus und Unicore Post erreicht werden. Die klinische Relevanz dieser Ergebnisse ist jedoch fraglich, da die Steigerung der Haftwerte lediglich zwei MPa betrug.

2. Sowohl durch Wasserlagerung wie auch durch thermische Wechselbelastung wurde die Haftkraft des Aufbaumaterials zum Faserstift in allen Materialkombinationen stark vermindert. Es empfiehlt sich daher, weitere klinische Langzeitstudien durchzuführen, um eine genauere Beurteilung der Hydrolyse und der damit verbundenen Schwächung des Haftverbundes zwischen Wurzelstift und Kompositaufbaumaterial zu ermöglichen. Ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen und deren Auswertung ist es außerdem empfehlenswert, dass in der klinischen Praxis der Stift auch nach der Präparation mit Komposit bedeckt bleibt, um eine Beeinträchtigung der physikalischen Eigenschaften aufgrund von Wasseraufnahme zu verhindern.

3. Hinsichtlich der Aufbaukomposite ließen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen erkennen. Es zeigte sich jedoch, dass die Haftkraft signifikant durch die Kombination von Stifftyp und Komposit beeinflusst wird, worin sich auch die Ergebnisse vorheriger Studien bestätigt finden [BITTER *et al.* 2007; MANNOCCI *et al.* 2008]. Die höchsten Haftwerte erreichte hierbei der individuell formbare everStick Post in Verbindung mit dem dünn fließenden MultiCore Flow.

## 8. Zusammenfassung

**Problemstellung:** Nach der Einführung faserverstärkter Wurzelkanalstifte auf dem Dentalmarkt 1990 stehen heute zahlreiche Aufbaukomposite und Faserstiftsysteme zur Versorgung endodontisch behandelter Zähne zur Verfügung. Sie unterscheiden sich bezüglich Faserart und Faseranteile, Oberflächentextur und Matrixzusammensetzung sowie im Hinblick auf Fülleranteil und Polymerisationsart. Bislang sind die Auswirkungen von Vorbehandlungen auf den Haftverbund, unter Berücksichtigung dieser Faktoren, jedoch nur unzureichend untersucht. **Zielsetzung:** Das Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die Effekte der Silanisierung als Vorbehandlung sowie des Thermocyclings auf den Haftverbund zweier Aufbaukomposite zu drei faserverstärkten Wurzelkanalstiften zu analysieren. Darüber hinaus sollte überprüft werden, ob die Stärke des Haftverbundes durch die verwendeten Komposite beziehungsweise Faserstifte beeinflusst wird. **Material und Methoden:** Zu diesem Zweck wurden insgesamt 240 Wurzelkanalstifte verwendet, die je nach Stifftyp in drei Gruppen ( $n = 80$ ) aufgeteilt wurden. Alle konfektionierten Glas- (FRC Postec Plus) und Quarzfaserstifte (Unicore Post) sowie die individuell formbaren Glasfaserstifte (everStick Post) wurden mit genormten Aufbauten aus dünn fließendem (MultiCore Flow) beziehungsweise hoch viskösem (Clearfil™ Core) Komposit versehen. Die Hälfte aller verwendeten Faserstifte wurde vor der Herstellung der Kompositaufbauten silanisiert, die restlichen Wurzelstifte blieben als Kontrollgruppe unbehandelt. Die Ermittlung der Haftwerte erfolgte durch Ausstoßversuche, initial nach 24 Stunden Lagerung in 0,9 %iger Kochsalzlösung sowie nach 28 Tagen Lagerung in 0,9 %iger Kochsalzlösung und anschließender thermischer Wechselbelastung (5000 Zyklen) mit einer Universalprüfmaschine. Die ausgestoßenen Proben wurden anschließend durch eine optische Bruchflächenanalyse ausgewertet. **Ergebnisse:** Die Haftkraft wurde signifikant durch das Thermocycling ( $p < 0,0005$ ), den Stifftyp ( $p < 0,0005$ ) und die Vorbehandlung ( $p < 0,0005$ ) beeinflusst, jedoch nicht durch den Komposittyp ( $p = 0,149$ ) (4-Wege ANOVA). Ebenfalls signifikanten Einfluss auf die Haftwerte hatten die Faktorkombinationen Stifftyp - Aufbaumaterial ( $p < 0,0005$ ), Aufbaumaterial - Vorbehandlung ( $p < 0,0005$ ), Aufbaumaterial - Thermocycling ( $p = 0,001$ ) und Stifftyp - Thermocycling ( $p = 0,018$ ). Durch das Silanisieren konnte nach 24-stündiger Wasserlagerung eine signifikante Steigerung ( $p < 0,005$ , Tukey-B) der Haftwerte erreicht werden (silanisiert [21,0 (6,3) MPa], unbehandelt [19,0 (6,2) MPa]). Die

initialen Haftwerte [24,0 (4,8) MPa] sanken nach der thermischen Wechselbelastung [16,0 (5,0) MPa] ( $p < 0,005$ , Tukey-B), wobei aber keine signifikanten Unterschiede der Haftwerte zwischen den vorbehandelten [16,9 (5,4) MPa] und den unbehandelten faserverstärkten Wurzelkanalstiften [15,1 (4,6) MPa] ( $p < 0,018$ , Tukey-B) auftraten. Nach 24-stündiger Wasserlagerung zeigte der silanisierte individuell formbare everStick Post im Post-Hoc-Test die höchsten Haftwerte [23,6 (6,5)] gegenüber dem FRC Postec Plus [18,8 (4,8)] und dem Unicore Post [18,0 (6,3)]. Auch nach der thermischen Wechselbelastung wies der silanisierte everStick Post [20,5 (6,8) MPa] statistisch signifikant ( $p < 0,005$ , Tukey-B) höhere Haftwerte auf, im Vergleich zu den anderen silanisierten Faserstiften (Unicore Post [15,1 (3,8) MPa], FRC Postec Plus [15,3 (2,9) MPa]). **Schlussfolgerung:** Die Ergebnisse der vorliegenden In-vitro-Studie belegen, dass der Haftverbund zwischen Faserstift und Komposit durch die Silanisierung der Faserstifte geringfügig verbessert werden kann. Zudem hat die Kombination von Stiftsystem und Aufbaukomposit eine große Bedeutung für den dauerhaften Haftverbund.

**Schlagwörter:** faserverstärkte Wurzelkanalstifte, Kompositaufbaumaterialien, Ausstoßversuche, thermische Wechselbelastung, Silanisierung

**Klinische Bedeutung:** Durch die Verringerung der initialen Haftwerte nach der thermischen Wechselbelastung ergibt sich die Empfehlung, dass der Stift auch nach der Präparation mit Komposit bedeckt bleiben sollte, um eine Beeinträchtigung seiner physikalischen Eigenschaften durch Wasseraufnahme zu verhindern.

## 9. Abstract

**Statement of problem:** Since the introduction of fiber reinforced composite posts (FRC) in 1990, increasingly high numbers of different core build ups and FRC posts are available on the market to restore endodontically treated teeth. They vary in ratio between fibers and matrix, surface structure, matrix composition, filler ratio and kind of polymerization. Until today little is known about the effects of pretreatment and the long-term bonding behavior of different material combinations. **Objectives:** The aim of this study was to evaluate the effects of pre-treatment (silanization) and thermocycling on bond strengths of two core materials to three different types of fiber posts. Moreover, it should be studied if bond strength is affected by the type of core material respectively by type of fiber post. **Materials and methods:** A total of 240 fiber posts were used for this study. All investigated posts were surrounded by discs (thickness 2 mm) of two different core materials. The bond strength of prefabricated posts (FRC Postec Plus, Unicore Post) and as well as individually formed glass fiber posts (everStick Post) to either a flowable (MultiCore Flow) or a highly viscous composite resin core material (Clearfill™ Core), were measured by using push-out test. All posts were investigated with or without the application of a silane. Half of the specimens were stored in distilled water for 28 days, and were subsequently subjected to thermocycling (5000 cycles, 5 to 55 °C), whereas the other half was investigated after 24 h water storage. After push-out testing each specimen was observed using a stereomicroscope (DV 4; Zeiss, Jena, Germany) at 40 × magnification to determine the failure mode. **Results:** Analysis of variance demonstrated that bond strengths were significantly affected by thermocycling ( $p < 0,0005$ ), post type ( $p < 0,0005$ ), and pre-treatment ( $p < 0,0005$ ) but not by the core material ( $p = 0,149$ , 4-way ANOVA). Significant interactions were observed among post type and core material ( $p < 0,0005$ ), core material and pre-treatment ( $p < 0,0005$ ), core material and thermocycling ( $p < 0,01$ ) as well as between post type and thermocycling ( $p = 0,018$ ). Considering all investigated posts together, silanization significantly increased mean (SD) bond strengths [21,0 (6,3) MPa] compared to the untreated posts [19,0 (6,2) MPa] after 24 h water storage ( $p < 0,005$ , Tukey-B). After TC, bond strengths were reduced from 24,0 (4,8) to 16,0 (5,0) ( $p < 0,005$ , Tukey-B) and no difference between untreated [15,1 (4,6)] and silanized posts [16,9 (5,4)] could be observed ( $p < 0,018$ , Tukey-B). After 24 h water storage post-hoc comparisons including all silanized posts revealed that the everStick posts

demonstrated significantly higher bond strengths [27,3 (4,3) MPa] compared to FRC Postec Plus [23,8 (4,2) MPa] and Unicore Post [24,2 (3,6) MPa] ( $p < 0,05$ , Tukey-B). After thermocycling, the silanized everStick Post still demonstrated superior bond strength values [20,5 (6,8) MPa] compared to all other silanized posts types ( $p < 0,05$ , Tukey-B), no differences between FRC Postec Plus [15,3 (2,9) MPa] and Unicore Post [15,1 (3,8) MPa] could be detected. **Conclusions:** The findings of the present study demonstrate that bond strength can be increased negligible by silanization. Combination of fiber post and core material affects long-term stability of bond strength.

**Keywords:** fiber posts, composite core materials, push-out bond strength, silanization, thermocycling.

**Clinical Significance:** The decrease of initial bond strength after thermocycling infers that fiber posts should be covered with composite material even after preparation to avoid negative impacts of physical properties caused by water absorption into the fiber posts.

## 10. Literaturverzeichnis

- Akagawa Y, Ichikawa Y, Nikai H, Tsuru H: Interface histology of unloaded and early loaded partially stabilized zirconia endosseous implant in initial bone healing. *J Prosthet*, 1993; 69: 599-604
- Akkayan B: An in vitro study evaluating the effect of ferrule length on fracture resistance of endodontically treated teeth restored with fiber-reinforced and zirconia dowel systems. *J Prosthet Dent*, 2004; 92: 155-162
- Aksornmuang J, Foxton RM, Nakajima M, Tagami J: Microtensile bond strength of a dual-cure resin core material to glass and quartz fibre posts. *J Dent*, 2004; 32: 443-450
- Aksornmuang J, Nakajima M, Foxton RM, Tagami J: Regional bond strengths of a dual-cure resin core material to translucent quartz fiber post. *Am J Dent*, 2006; 19: 51-55
- Alvarez-Gayosso C, Barcelo-Santana F, Guerrero-Ibarra J, Saez-Espinola G, Canseco-Martinez M: Calculation of contraction rates due to shrinkage in light-cured composites. *Dent Mat*, 2004; 20: 228-235
- Asmussen E, Peutzfeldt A, Heitmann T: Stiffness, elastic limit, and strength of newer types of endodontic posts. *J Dent*, 1999; 27: 275-278
- Asmussen E, Peutzfeldt A, Sahafi A: Finite element analysis of stresses in endodontically treated, dowel-restored teeth. *J Prosthet Dent*, 2005; 94: 321-329
- Balbosh A, Kern M: Effect of surface treatment on retention of glass fiber endodontic posts. *J Prosthet Dent*, 2006; 95: 23-118
- Barghi N, Berry T, Chung K: Effects of timing and heat treatment of silanated porcelain on the bond strength. *J Oral Rehabil*, 2000; 27: 407-412
- Bateman G, Ricketts DN, Saunders WP: Fibre-based post systems: a review. *Br Dent J*, 2003; 195:43-48
- Bechel VT, Sottos NR: Application of debond length measurements to examine the mechanics of fiber push-out. *J Mech. Phys. Solids*, 1998; 46: 1675-1697
- Bell AM, Lassila LV, Kangasniemi I, Vallittu PK: Bonding of fibre-reinforced composite post to root canal dentin. *J Dent*, 2005; 33: 533-539
- Le Bell AM, Tanner J, Lassila LV, Kangasniemi I, Vallittu P: Bonding of composite resin luting cement to fiber-reinforced composite root canal posts. *J Adhes Dent*, 2004; 6: 319-325
- Bitter K, Meyer-Lueckel H, Priehn K, Kanjuparambil J, Neumann K, Kielbassa AM: Effects of luting agent and thermocycling on bond strengths to root canal dentine. *Int Endod J*, 2006; 39: 809-818
- Bitter K, Meyer-Lueckel H, Priehn K, Martus P, Kielbassa AM: Bond strengths of resin cements to fiber-reinforced composite posts. *Am J Dent*, 2006; 19: 138-142
- Bitter K, Noetzel J, Neumann K, Kielbassa AM: Effect of silanization on bond strengths of fiber posts to various resin cements. *Quint Int*, 2007; 38: 121-128
- Bitter K, Noetzel J, Stamm O, Vaudt J, Meyer-Lueckel H, Naumann K, Kielbassa AM: Randomized clinical trial comparing the effects of post placement on

- failure rate of postendodontic restorations: preliminary results of a mean period of 32 months. *J Endod*, 2009; 35: 1477-1482
- Bitter K, Priehn K, Martus P, Kielbassa AM: In vitro evaluation of push-out bond strengths of various luting agents to tooth-colored posts. *J Prosthet Dent*, 2006; 95: 302-310
- Boschian Pest L, Cavalli G, Bertani P, Gagliani M: Adhesive post-endodontic restoration with fiber posts: push-out tests and SEM observations. *Dent Mater*, 2002; 18: 596-602
- Bottino MA, Baldissara P, Valandro LF, Galhano GA, Scotti R: Effects of mechanical cycling on the bonding of zirconia and fiber posts to human root dentin. *J Adhes Dent*, 2007; 9: 327-331
- Bouillaguet S, Schutt A, Alander P, Schwaller P, Buerki G, Michler J, Cattani-Lorente M, Vallittu PK, Krejci I: Hydrothermal and mechanical stresses degrade fiber-matrix interfacial bond strength in dental fiber-reinforced composites. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2006; 76: 98-105
- Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH: Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin. *Dent Mater*, 2003; 19: 199-205
- Cagidiaco MC, Garcia-Godoy F, Vichi A, Grandini S, Goracci C, Ferrari M: Placement of fiber prefabricated or custom made posts affects the 3-year survival of endodontically treated premolars. *Am J Dent*, 2008; 21: 179-184
- Carossa S, Lombardo S, Pera P, Corsalini M, Rastello ML, Preti PG: Influence of posts and cores on light transmission through different all-ceramic crowns: spectrophotometric and clinical evaluation. *Int J Prosthodont*, 2001; 14: 9-14
- Cohen BI, Pagnillo MK, Newman I, Musikant BL, Deutsch AS: Pilot study of the cyclic fatigue characteristics of five endodontic posts with four core materials. *J Oral Rehabil*, 2000; 27: 679-685
- Combe EC, Shoglouf A-MS, Watts DC, Wilson NHF: Mechanical properties of direct core build-up materials. *Dent Mat*, 1999; 15: 158-165
- Crim GA, Swartz ML, Phillips RW: Comparison of four thermocycling techniques. *J Prosthet Dent*, 1985; 53: 50-53
- De Rijk WG: Removal of fiber posts from endodontically treated teeth. *Am J Dent*, 2000; 13: 19B-21B
- Dean JP, Jeansonne BG, Sarkar N: In vitro evaluation of a carbon fiber post. *J Endod*, 1998; 24: 807-810
- Deliperi S, Bardwell DN, Coiana C: Reconstruction of devital teeth using direct fiber-reinforced composite resins: a case report. *J Adhes Dent*, 2005; 7: 165-117
- Drummond JL: In vitro evaluation of endodontic posts. *Am J Dent*, 2000; 13: 5B-8B
- Drummond JL, Sakaguchi RL, Racean DC, Wozny J, Steinberg AD: Testing mode and surface treatment effects on dentin bonding. *J Biomed Mater Res*, 1996; 32: 533-541
- Duret B, Reynaud M, Duret F: [A New concept of coronoradicular reconstruction: the Composipost (1)]. *Chir Dent France*, 1990; 60: 131-141

- Edelhoff D, Heidemann D, Kern M, Weigl P: Wissenschaftliche Stellungnahme der DGZMK, DGZ und DGZPW: Aufbau endodontisch behandelter Zähne. Dtsch Zahnärztl Z, 2003; 58: 199-201
- Ehrenstein GW: Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. Hanser München, 2006
- Eichner K, Kappert H: Zahnärztliche Werkstoffkunde und ihre Verarbeitung. Thieme Stuttgart, 2000
- Fernandes AS, Shetty S, Coutinho I: Factors determining post selection: a literature review. J Prosthet Dent, 2003; 90: 556-562
- Ferrari M, Cagidiaco MC, Goracci C, Vichi A, Mason PN, Radovic I, Tay F: Long term retrospective study of the clinical performance of fiber posts. Am J Dent, 2007; 291: 287-291
- Ferrari M, Cagidiaco MC, Grandini S, De Sanctis M, Goracci C: Post placement affects survival of endodontically treated premolars. J Dent Res, 2007; 86: 729-734
- Ferrari M, Goracci C, Sadek FT, Monticelli F, Tay FR: An investigation of the interfacial strengths of methacrylate resin-based glass fiber post-core build-ups by their components. J Adhes Dent, 2006; 8: 239-245
- Ferrari M, Scotti M: Fiber posts Characteristics and clinical applications. Masson Milano, 2002
- Ferrari M, Vichi A, Garcia-Godoy F: Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. Am J Dent, 2000; 13: 15B-18B
- Frankenberger R: Zur Dauerhaftigkeit des Dentinverbunds. Dtsch Zahnärztl Z, 2002; 57: 154-171
- Fredriksson M, Astback J, Pamenius M, Arvidson K: A retrospective study of 236 patients with teeth restored by carbon fiber-reinforced epoxy resin posts. J Prosthet Dent, 1998; 80: 151-157
- Gale MS, Darvell BW: Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. J Dent, 1999; 27: 89-99
- Galhano GA, Valandro LF, de Melo RM, Scotti R, Bottino MA: Evaluation of the flexural strength of carbon fiber-, quartz fiber-, and glass fiber-based posts. J Endod, 2005; 31: 209-211
- Glazer B: Endodontic post evolution: from metal to quartz. Oral Health, 2002; 5: 43-45
- Goracci C, Corciolani A, Vichi A, Ferrari M: Light-transmitting ability of marketed fiber posts. J Dent Res, 2008; 87: 1122-1126
- Goracci C, Grandini S, Bossu M, Bertelli E, Ferrari M: Laboratory assessment of the retentive potential of adhesive posts: A review. J Dent, 2007; 35: 827-835
- Goracci C, Raffaelli O, Monticelli F, Balleri B, Bertelli E, Ferrari M: The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization. Dent Mater, 2005; 21: 437-444
- Goracci C, Sadek FT, Fabianelli A, Tay FR, Ferrari M: Evaluation of the adhesion of fiber posts to intraradicular dentin. Oper Dent, 2005; 30: 627-635

- Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, Tay F, Ferrari M: The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci*, 2004; 112: 353-361
- Grandini S, Goracci C, Monticelli F, Tay FR, Ferrari M: Fatigue resistance and structural characteristics of fiber posts: three-point bending test and SEM evaluation. *Dent Mater*, 2005; 21: 75-82
- Grandini S, Goracci C, Tay FR, Grandini R, Ferrari M: Clinical evaluation of the use of fiber posts and direct resin restorations for endodontically treated teeth. *Int J Prosthodont*, 2005; 18: 399-404
- Haller B, Thull R, Klaiber B, Teuber M: An extrusion test for determination of bond strength to dentin. *J Dent Res*, 1991; 70: 525
- Heidemann D, Weigl P: Stifte im Wurzelkanal - Warum? *Endodontie Journal*, 2004; 2: 24-34
- Heydecke G, Butz F, Hussein A, Strub JR: Fracture strength after dynamic loading of endodontically treated teeth restored with different post-and-core systems. *J Prosthet Dent*, 2002; 87: 438-445
- Isidor F, Odman P, Brondum K: Intermittent loading of teeth restored using prefabricated carbon fiber posts. *Int J Prosthodont*, 1996; 9: 131-136
- Janda R: Allgemeine Prinzipien der Klebetechnik: Kleben und Klebetechniken. Hanser München, 1992
- Janssen U, Hülsmann M: Das Bruchlastverhalten endodontisch verankerter Aufbauten mit den Wurzelstiftsystemen Luscent-Anchor und Perma-Tex im In-vitro-Test. *Dtsch Zahnärztl Z*, 2003; 58: 331-336
- Kallio TT, Lastumaki TM, Vallittu PK: Effect of resin application time on bond strength of polymer substrate repaired with particulate filler composite. *J Mat Sci Mat Med*, 2003; 14: 999-1004
- Kockapan C: Curriculum Endodontie. Quintessenz Berlin, 2003
- Koutayas SO, Kern M: All-ceramic posts and cores: the state of the art. *Quint Int*, 1999; 30: 383-392
- Lang H, Korkmaz Y, Schneider K, Raab WH: Impact of endodontic treatments on the rigidity of the root. *J Dent Res*, 2006; 85: 364-368
- Lassila LV, Nohrstrom T, Vallittu PK: The influence of short-term water storage on the flexural properties of unidirectional glass fiber-reinforced composites. *Biomaterials*, 2002; 23: 2221-2229
- Lassila LV, Tanner J, Le Bell AM, Narva K, Vallittu PK: Flexural properties of fiber reinforced root canal posts. *Dent Mater*, 2004; 20: 29-36
- Lastumaki TM, Kallio TT, Vallittu P: The bond strength of light-curing composite resin to finally polymerized and aged glass fiber-reinforced composite substrate. *Biomaterials*, 2002; 23: 4533-4539
- Lastumaki TM, Lassila LV, Vallittu PK: The semi-interpenetrating polymer network matrix of fiber-reinforced composite and its effect on the surface adhesive properties. *J Mater Sci Mater Med*, 2003; 14: 803-809

- Lauer HC, Ottl P, Haibach O: Die prothetische Versorgung des avitalen Zahnes. Zahnarzt Magazin, 1996; 11: 15-19
- Lutz F, Cochran MA, Mörmann W: Adhäsive Restauration - Flop oder Hit? Schweiz Monatsschr Zahnheilk, 1984; 94: 1124-1127
- Magni E, Mazzitelli C, Papacchini F, Radovic I, Goracci C, Coniglio I, Ferrari M: Adhesion between fiber posts and resin luting agents: a microtensile bond strength test and an SEM investigation following different treatments of the post surface. J Adhes Dent, 2007; 9: 195-202
- Malferrari S, Monaco C, Scotti R: Clinical evaluation of teeth restored with quartz fiber-reinforced epoxy resin posts. Int J Prosthodont, 2003; 16: 39-44
- Mandell JF, Chen JH, McGarry FJ: A microdebonding test for in situ assessment of fibre-matrix bond strength in composite materials. Int J Adhes, 1980; 1: 4-40
- Manhart J: Wurzelkanalstifte aus faserverstärkten Komposit. Endodontie Journal, 2004; 3: 18-23
- Mannocci F, Ferrari M, Watson TF: Intermittent loading of teeth restored using quartz fiber, carbon-quartz fiber, and zirconium dioxide ceramic root canal posts. J Adhes Dent, 1999; 1: 153-158
- Mannocci F, Ferrari M, Watson TF: Mikroleakage of endodontically treated teeth restored with fibre posts and composite cores after cyclic loading: a confocal microscopic study. J Prosthet Dent, 2001; 85: 284-291
- Mannocci F, Machmouridou E, Watson TF, Sauro S, Sherriff M, Pilecki P, Pitt-Ford TR: Microtensile bond strength of resin-post interfaces created with interpenetrating polymer network posts or cross-linked posts. Med Oral Patol Oral Cir Bucal, 2008; 13: 745-752
- Mannocci F, Sherriff M, Watson TF: Three-point bending test of fiber posts. J Endod, 2001; 27: 758-761
- Mannocci F, Sherriff M, Watson TF, Vallittu PK: Penetration of bonding resins into fibre-reinforced composite posts: a confocal microscopic study. Int Endod J, 2005; 38: 46-51
- Martinez-Insua A, da Silva L, Rilo B, Santana U: Comparison of the fracture resistances of pulpless teeth restored with a cast post and core or carbon-fiber post with a composite core. J Prosthet Dent, 1998; 80: 527-532
- Matinlinna JP, Lassila LV, Ozcan M, Yli-Urpo A, Vallittu PK: An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. Int J Prosthodont, 2004; 17: 155-164
- Mentink AG, Creugers NH, Meeuwissen R, Leempoel PJB, Käyser AF: Clinical performance of different post and core systems - results of a pilot study. J Oral Rehabil, 1993; 20: 577-584
- Meyer MR, Friedman RJ, Del Schutte H Jr, Latour RA Jr: Long-term durability of the interface in FRP composites after exposure to simulated physiologic saline environments. J Biomed Mater Res, 1994; 28: 1221-1231
- Miettinen VM, Narva KK, Vallittu PK: Water sorption, solubility and effect of post-curing of glass fibre reinforced polymers. Biomaterials, 1999; 20: 1187-1194

- Möllersten L, Lockowandt P, Linden L: A comparison of strengths of five core and post-and-core systems. *Quint Int*, 2002; 33: 140-149
- Monticelli F, Ferrari M, Toledano M: Cement system and surface treatment selection for fiber post luting. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, 2008; 13: 214-221
- Monticelli F, Goracci C, Ferrari M: Micromorphology of the fiber post-resin core unit: a scanning electron microscopy evaluation. *Dent Mater*, 2004; 20: 176-183
- Monticelli F, Goracci C, Grandini S, Garcia-Godoy F, Ferrari M: Scanning electron microscopic evaluation of fiber post-resin core units built up with different resin composites. *Am J Dent*, 2005; 18: 61-65
- Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M: Clinical behavior of translucent-fiber posts: a 2-year prospective study. *Int J Prosthodont*, 2003; 16: 593-596
- Monticelli F, Toledano M, Osorio R, Ferrari M: Effect of temperature on the silane coupling agents when bonding core resin to quartz fiber posts. *Dent Mater*, 2006; 22: 1024-1028
- Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Cury AH, Goracci C, Ferrari M: Post-surface conditioning improves interfacial adhesion in post/core restorations. *Dent Mater*, 2006; 22: 602-609
- Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Sadek FT, Goracci C, Ferrari M: A simple etching technique for improving the retention of fiber posts to resin composites. *J Endod*, 2006; 32: 44-47
- Naumann M: Vorgekürzte Wurzelstifte aus glasfaserverstärktem Komposit und Titan - eine effektive Alternative der postendodontischen Rekonstruktion. *Zahn Prax*, 2003; 6: 398-402
- Naumann M: Wann Wurzelstifte indiziert sind - Klassifikation und Therapiekonzept. *Quintessence*, 2003; 54: 931-938
- Naumann M: Adhäsive postendodontische Rekonstruktion mit Glasfaserstiften - Was gibt es zu beachten? *Quintessenz*, 2009; 60: 809-820
- Naumann M, Blankenstein F, Dietrich T: Survival of glass fibre reinforced composite post restorations after 2 years - an observational clinical study. *J Dent*, 2005; 33: 305-312
- Nergiz I, Schmage P: Wurzelstifte im Wandel der Zeit. *Endodontie Journal*, 2004; 1: 10-17
- Ottl P, Hahn L, Lauer H, Fay M: Fracture characteristics of carbon fibre, ceramic and non-palladium endodontic post systems at monotonously increasing loads. *J Oral Rehabil*, 2002; 29: 175-183
- Özcan M, Vallittu PK: Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cements to ceramic. *Dent Mater*, 2003; 19: 725-731
- Palmer DS, Barco MT, Billy EJ: Temperature extremes produced orally by hot and cold liquids. *J Prosthet Dent*, 1992; 67: 325-327
- Park SJ, Jin JS: Effect of silane coupling agent on interphase and performance of glass fibers-reinforced unsaturated polyester composites. *J Coll Inter Sci*, 2001; 242: 174-179

- Patyk A, Friedrich M, Attin T: Untersuchung des Lichttransfers von Glasfaserstiften und der daraus resultierenden Polymerisation des Befestigungskomposits. *Dtsch Zahnärztl Z*, 2005; 60: 253-257
- Pegoretti A, Fambri L, Zappini G, Bianchetti M: Finite element analysis of a glass fibre reinforced composite endodontic post. *Biomaterials*, 2002; 23: 2667-2682
- Perdigao J, Gomes G, Lee IK: The effect of silane on the bond strengths of fiber posts. *Dent Mater*, 2006; 22: 752-758
- Perez BE, Barbosa SH, Melo RM, Zamboni SC, Ozcan M, Valandro LF, Bottino MA: Does the thickness of the resin cement affect the bond strength of a fiber post to the root dentin? *Int J Prosthodont*, 2006; 19: 606-609
- Pfeiffer P, Nergiz I, Schmage P, Platzer U: Yield strength of zirconia and glass fiber-reinforced posts. *J Dent Res*, 2002; 81: 428
- Portell FR, Bernier WE, Lorton L, Peters DD: The effect of immediate versus delayed dowel space preparation on the integrity of the apical seal. *J Endod*, 1982; 8: 154-160
- Purton DG, Chandler NP, Qualtrough AJ: Effect of thermocycling on the retention of glass-fiber root canal posts. *Quint Int*, 2003; 34: 366-369
- Qualtrough AJ, Mannocci F: Tooth-colored post systems: a review. *Oper Dent*, 2003; 28: 86-91
- Randow K, Glantz PO: On cantilever loading of vital and non-vital teeth. An experimental clinical study. *Acta Odontol Scand*, 1986; 44: 271-277
- Rathke A, Haj-Omer D, Muche R, Haller B: Effectiveness of bonding fiber posts to root canals and composite core build-ups. *Eur J Oral Sci*, 2009; 117: 604-610
- Raygot CG, Chai J, Jamson DL: Fracture resistance and primary failure mode of endodontically treated teeth restored with a carbon fiber-reinforced resin post in vitro. *Int J Prosthodont*, 2001; 14: 141-145
- Robbins JW: Restoration of the endodontically treated tooth. *Dent Clin North Am*, 2002; 46: 367-384
- Roberts D: The failure of retainers in bridge prostheses. An analysis of 2000 retainers. *Br Dent J*, 1970; 128: 117-124
- Rosentritt M, Furer C, Behr M, Lang R, Handel G: Comparison of in vitro fracture strength of metallic and tooth-coloured posts and cores. *J Oral Rehabil*, 2000; 27: 595-601
- Rzanny A, Welker D, Gomolka M, Küpper H: Stumpfaufbaumaterialien auf Kompositbasis - eine Verbesserung?. *Dtsch Zahnärztl Z*, 2002; 57: 550-553
- Sadek FT, Monticelli F, Goracci C, Tay FR, Cardoso PE, Ferrari M: Bond strength performance of different resin composites used as core materials around fiber posts. *Dent Mater*, 2006; 95-99
- Sadek FT, Monticelli F, Goracci C, Tay FR, Cardoso PE, Ferrari M: Bond strength performance of different resin composites used as core materials around fiber posts. *Dent Mater*, 2007; 23: 95-99
- Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K: Bond strength of resin cement to dentin and to surface-treated posts of titanium alloy, glass fiber, and zirconia. *J Adhes Dent*, 2003; 5: 153-162

- Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K: Retention and failure morphology of prefabricated posts. *Int J Prosthodont*, 2004; 17: 307-312
- Salameh Z, Papacchini F, Ounsi HF, Goracci C, Tashkandi E, Ferrari M: Adhesion between prefabricated fiber-reinforced posts and different composite resin cores: a microtensile bond strength evaluation. *J Adhes Dent*, 2006; 8: 113-117
- Schmitter M, Rammelsberg P, Gabbert O, Ohlmann B: Influence of clinical baseline findings on the survival of 2 post systems: a randomized clinical trial. *Int J Prosthodont*, 2007; 20: 173-178
- Schwartz RS, Robbins JW: Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review. *J Endod*, 2004; 30: 289-301
- Sidoli GE, King PA, Setchell DJ: An in vitro evaluation of a carbon fiber-based post and core system. *J Prosthet Dent*, 1997; 78: 5-9
- Soares CJ, Santana FR, Castro CG, Santos-Filho PC, Soares PV, Qian F, Armstrong S: Finite element analysis and bond strength of a glass post to intraradicular dentin: comparison between microtensile and push-out tests. *Dent Mat*, 2008; 24: 1405-1411
- Soltész U, Baudendistel E: Konzepte zur Ermittlung der Festigkeit des Verbundes Knochen-Implantat. 1990
- Sorensen JA, Engelman MJ: Effect of post adaptation on fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 1990; 64: 419-424
- Sorensen JA, Martinoff JT: Intracoronal reinforcement and coronal coverage: a study of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 1984; 51: 780-784
- Standlee JP, Caputo AA, Hanson EC: Retention of endodontic dowels: effects of cement, dowel length, diameter, and design. *J Prosthet Dent*, 1978; 39: 400-405
- Stiefenhofer A, Stark H, Hackhofer T: Biomechanische Untersuchungen von Stiftaufbauten mit Hilfe der Finiten Elemente-Analyse. *Dtsch Zahnärztl Z*, 1994; 49: 711-715
- Stober T, Rammelsberg P: The failure rate of adhesively retained composite core build-ups in comparison with metal-added glass ionomer core build-ups. *J Dent*, 2005; 33: 27-32
- Stockton LW: Factors affecting retention of post systems: a literature review. *J Prosthet Dent*, 1999; 81: 380-385
- Strub J, Türp JC, Blatz MB, Heydecke G: Vorbehandlung. Aufbau vitaler und avitaler Pfeilerzähne. *Praxis der Zahnheilkunde. Kronen- und Brückenprothetik*. Urban Fischer München, 1999; 63-69
- Tay F, Pashley DH: Monoblocks in root canals - a hypothetical or a tangible goal. *J Endod*, 2007; 4: 391-398
- Valandro LF, Yoshiga S, de Melo RM, Galhano GA, Mallmann A, Marinho CP: Microtensile bond strength between a quartz fiberpost and a resin cement: effect of post surface conditioning. *J Adhes Dent*, 2006; 8: 105-111
- Vallittu PK: Effect of 180 weeks water storage on the flexural properties of E-glass and silica fiber acrylic resin composite. *Int J Prosthodont*, 2000; 13: 334-339

- Vallittu PK: Faserverstärkte Komposite (FRC) in der zahnärztlichen Prothetik, eine Übersicht. *Dtsch Zahnärztl Z*, 2002; 57: 399-405
- Van Meerbeek B, de Munck J, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Vijay P, Van Landuyt K, Lambrechts P, Vanherle G: Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent*, 2003; 28: 215-235
- Vano M, Goracci C, Monticelli F, Tognini F, Gabriele M, Tay FR, Ferrari M: The adhesion between fibre posts and composite resin cores: the evaluation of microtensile bond strength following various surface chemical treatments to posts. *Int Endod J*, 2006; 39: 31-39
- Versluis A, Tantbiroj D, Douglas WH: Why do shear bond tests pull out dentin? *J Dent Res*, 1997; 76: 1298-1307
- Vichi A, Ferrari M, Davidson CL: Influence of ceramic and cement thickness on the masking of various types of opaque posts. *J Prosthet Dent*, 2000; 83: 412-417
- Watanabe I, Nakabayashi N: Measurement methods for adhesion to dentine: the current status in Japan. *J Dent*, 1994; 22: 67-72
- Weine FS, Wax AH, Wenckus CS: Retrospective study of tapered, smooth post systems in place for 10 years or more. *J Endod*, 1991; 17: 293-297
- Wolf D, Powers JM, O'Keefe KL: Bond strength of composite to etched and sandblasted porcelain. *Am J Dent*, 1993; 6: 8-155
- Wrbas KT, Schirmermeister JF, Altenburger MJ, Agrafioti A, Hellwig E: Bond strength between fibre posts and composite resin cores: effect of post surface silanization. *Int Endod J*, 2007; 40: 538-543
- Yanagida H, Matsumura H, Atsuta M: Bonding of prosthetic composite material to Ti-6Al-7Nb alloy with eight metal conditioners and a surface modification technique. *Am J Dent*, 2001; 14: 291-294
- Zillich RM, Corcoran JF: Average maximum post lengths in endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 1984; 52: 489-491
- Zöfel P: Statistik verstehen. Ein Begleitbuch zur computergestützten Anwendung, Addison-Wesley München, 2002

## 11. Anhang

### 11.1 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminiumoxid
CaO	Calciumoxid
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Chromdreioxid
$\text{B}_2\text{O}_3$	Boroxid
Bis-GMA	Bisphenyl-A-Glycidyl-Methacrylat
E-Modul	Elastizitätsmodul
EGDMA	Ethylen-Glycol-Dimethacrylat
Fa.	Firma
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Eisendreioxid
Gew.	Gewicht
Gpa	Giga-Pascal
$\text{H}_2\text{O}_2$	Wasserstoffperoxid
HEMA	Hydroxy-Ethyl-Methacrylat
mm	Millimeter
$\text{mm}^3$	Kubikmillimeter
N	Newton
Mpa	Mega-Pascal
PMMA	Polymethylmethacrylat
REM	Rasterelektronenmikroskop
SD	Standardabweichung
$\text{SiO}_2$	Siliziumoxid
TEGDMA	Triethylen-Glycol-Dimethacrylat

TiO <sub>2</sub>	Titanoxid
UDMA	Urethandimethacrylat
Vol.	Volumen
ZrO <sub>2</sub>	Zirkoniumdioxid
µm	Mikrometer
%	Prozent

### 11.2 Liste der verwendeten Materialien

2-Propanol; Apotheke der Charité - Universitätsmedizin, Berlin, Deutschland

AdheSe; Fa. Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Astralis 10; Fa. Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Clearfil™ Core; Fa. Kuraray, Okayama, Japan

FRC Postec Plus; Fa. Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

EverStick Post; Fa. StickTech, Turku, Finnland

Mikrometerschraube; Fa. Mitutoyo Messgeräte GmbH, Neuss, Deutschland

Monobond-S; Fa. Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

MultiCore Flow; Fa. Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Natriumchlorid, 0,9 %ige Lösung; Fa. DeltaSelect GmbH, Pfullingen, Deutschland

New Bond; Fa. Kuraray, Okayama, Japan

Can Scan Maxim 2040; Fa. Electron Optics LTD, Cambridge, Großbritannien

Stereomikroskop DV 4; Fa. Zeiss, Oberkochen, Deutschland

SPSS 14.0 für Windows; Fa. SPSS GmbH, München, Deutschland

Unicore Post; Fa. Ultradadent Products Inc., South Jordan, Utah, USA

Universalprüfmaschine Z 010; Fa. Zwick GmbH & Co. Kg, Ulm, Deutschland

### 11.3 Tabellenverzeichnis

<b>TABELLE I</b>	TECHNISCHE DATEN FRC POSTEC PLUS, STIFTGRÖÙE 1 .....	<b>27</b>
<b>TABELLE II</b>	TECHNISCHE DATEN UNICORE POST, STIFTGRÖÙE 3 .....	<b>28</b>
<b>TABELLE III</b>	TECHNISCHE DATEN EVERSTICK POST .....	<b>29</b>

<b>TABELLE IV</b>	MATERIALEIGENSCHAFTEN MULTICORE FLOW .....	<b>30</b>
<b>TABELLE V</b>	MATERIALEIGENSCHAFTEN CLEARFILTM CORE .....	<b>31</b>
<b>TABELLE VI</b>	ZUSAMMENSETZUNG MONOBOND-S .....	<b>32</b>
<b>TABELLE VII</b>	ZUSAMMENSETZUNG PORCELAIN BOND ACTIVATOR .....	<b>32</b>
<b>TABELLE VIII</b>	ZUSAMMENSETZUNG ADHESE.....	<b>33</b>
<b>TABELLE IX</b>	ZUSAMMENSETZUNG CLEARFIL NEW BOND .....	<b>33</b>
<b>TABELLE X</b>	ZUSAMMENSETZUNG STICK RESIN.....	<b>34</b>
<b>TABELLE XI</b>	HERSTELLERANGABEN ZUR KUNSTSTOFFVERARBEITUNG.....	<b>39</b>
<b>TABELLE XII</b>	HAFTWERTE ALLER UNTERSUCHTEN FASERVERSTÄRKTEN WURZELKANALSTIFTE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG FOLGENDERFAKTORKOMBINATIONEN: STIFTTYP - AUFBAUMATERIAL, AUFBAUMATERIAL - VORBEHANDLUNG, AUFBAUMATERIAL - THERMOCYCLING UND STIFTTYP - THERMOCYCLING.....	<b>45</b>
<b>TABELLE XIII</b>	INTERAKTIONEN ZWISCHEN STIFTTYPEN UND AUFBAUMATERIALIEN, AUFBAUMATERIAL UND VORBEHANDLUNG, AUFBAUMATERIAL UND THERMOCYCLING SOWIE STIFTTYP UND THERMOCYCLING, HAFTWERTE IN MPA (SD) .....	<b>46</b>

## 11.4 Abbildungsverzeichnis

<b>ABB. 1</b>	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER EINWIRKENDEN KRÄFTE VERSCHIEDENER STIFTTYPEN AUF EINEN EINWURZELIGEN ZAHN, MODIFIZIERT NACH HEIDEMANN, ENTNOMMEN AUS [HEIDEMANN UND WEIGL 2004].....	<b>14</b>
<b>ABB. 2</b>	ÜBERSICHT ZUM VERSUCHSAUFBAU .....	<b>35</b>
<b>ABB. 3</b>	STIFTINSERTION IN DIE GEÖFFNETE PLASTIKHOHLFORM .....	<b>37</b>
<b>ABB. 4</b>	GESCHLOSSENE PLASTIKFORM MIT INSERIERTEM EVERSTICK POST .....	<b>37</b>
<b>ABB. 5</b>	SPEZIELL ANGEFERTIGTE PLASTIKFORM IN GEÖFFNETEM ZUSTAND .....	<b>38</b>
<b>ABB. 6</b>	GESCHLOSSENE PLASTIKFORM MIT INSERIERTEM FASERSTIFT .....	<b>39</b>
<b>ABB. 7</b>	EINFÜLLEN DES KOMPOSITMATERIALS IN DIE HOHLFORM .....	<b>39</b>
<b>ABB. 8</b>	ENTNAHME DER PROBE AUS DER GEÖFFNETEN PLASTIKFORM.....	<b>40</b>
<b>ABB. 9</b>	EIGENBAU DER CHARITÉ FÜR DIE THERMISCHE BELASTUNG .....	<b>41</b>
<b>ABB. 10</b>	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES AUSSTOßVERSUCHES.....	<b>41</b>
<b>ABB. 11</b>	HAFTWERTE DER FASERSTIFTE IN MPA IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN VERWENDETEN KOMPOSITEN, OHNE BERÜCKSICHTIGUNG DER VORBEHANDLUNG.....	<b>48</b>
<b>ABB. 12</b>	ADHÄSIVES VERSAGEN ZWISCHEN FASERSTIFT UND KOMPOSIT .....	<b>50</b>
<b>ABB. 13</b>	ADHÄSIVES VERSAGEN, GEMISCHT MIT KOHÄSIVEN VERSAGEN IM STIFT .....	<b>50</b>
<b>ABB. 14</b>	REIN KOHÄSIVES VERSAGEN IM FASERSTIFT .....	<b>51</b>
<b>ABB. 15</b>	REM-AUFNAHME DER OBERFLÄCHE DES FRC POSTEC PLUS MIT GUT SICHTBAREN FREILIEGENDEN FASERN SOWIE MATRIXBESTANDTEILEN .....	<b>52</b>
<b>ABB. 16</b>	REM-AUFNAHME DES UNICORE POST ZEIGT EBENFALLS FREILIEGENDE FASERN SOWIE MATRIXBESTANDTEILE AN DER STIFTOBERFLÄCHE.....	<b>52</b>
<b>ABB. 17</b>	REM-AUFNAHME DES EVERSTICK POST ÜBERZOGEN MIT EINER STICK- RESIN-SCHICHT ENTSPRECHEND DEN HERSTELLUNGSVORGABEN.....	<b>53</b>

### **11.5 Danksagung**

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Andrej M. Kielbassa (Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie des CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin) danke ich für die freundliche Überlassung des interessanten Themas, für die wissenschaftliche Betreuung und die Erstellung des Erstgutachtens.

Frau OÄ Dr. Kerstin Bitter (Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie des CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin) danke ich für die hilfreiche und geduldige Betreuung dieser Arbeit.

Des weiteren danke ich Frau Gabriele Bölling (Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre der Charité - Universitätsmedizin Berlin) für die freundliche Unterstützung bei den Ausstoßversuchen. Ebenfalls danken möchte ich Dr. Konrad Neumann (Institut für Biometrie und Klinische Epidemiologie der Charité - Universitätsmedizin Berlin) für die Beratung bei der statistischen Auswertung.

### **11.6 Lebenslauf**

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

### **11.7 Eidesstattliche Erklärung**

Ich, Martin Köppen, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Der Effekt der Silanisierung auf die Haftung zwischen Aufbaumaterialien und verschiedenen faserverstärkten Kompositwurzelskanalstiften“ selbst verfasst, und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.

Datum: 22. November 2010

---

Unterschrift