

Aus der Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie
CharitéCentrum 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Campus Benjamin Franklin
der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Einfluss der Oberflächenbehandlung auf die Haftung
unterschiedlicher Befestigungskomposite an
zahnfarbenen Wurzelkanalstiften**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae(Dr. med. dent.)
vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von
Zahnarzt Karsten Werner Priehn
aus Berlin

Gutachter: 1. Prof. Dr. A. M. Kielbassa
 2. Prof. Dr. K.-R. Jahn
 3. Prof. Dr. D. Heidemann

Datum der Promotion: 21.11.2008

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Literaturübersicht | 3 |
| 2.1 | Wurzelkanalstifte | 3 |
| 2.1.1 | Metallische Wurzelkanalstifte | 4 |
| 2.1.2 | Zahnfarbene Wurzelkanalstifte | 6 |
| 2.2 | Befestigung von Wurzelkanalstiften | 10 |
| 2.3 | Oberflächenvorbehandlung | 12 |
| 2.3.1 | Grundprinzipien | 12 |
| 2.3.2 | Silanisierung | 13 |
| 2.3.3 | Silikatisierung | 14 |
| 2.3.4 | Einfluss der Vorbehandlung auf den Keramik-Kunststoff-Verbund | 15 |
| 2.3.5 | Einfluss der Vorbehandlung auf den Kunststoff-Kunststoff-Verbund | 16 |
| 3 | Fragestellung | 19 |
| 4 | Material und Methode | 20 |
| 4.1 | Material | 20 |
| 4.1.1 | CosmoPost-Wurzelstifte | 20 |
| 4.1.2 | FRC Postec-Wurzelstifte | 22 |
| 4.1.3 | Befestigungskunststoffe | 22 |
| 4.1.4 | Haftvermittler | 24 |
| 4.1.5 | Hilfsmaterialien | 25 |
| 4.2 | Methode | 27 |
| 4.2.1 | Herstellung der Kunststoffzylinder mit künstlicher Stiftbohrung | 27 |
| 4.2.2 | Vorbehandlung und Befestigung der Wurzelstifte | 27 |
| 4.2.3 | Sägen der Proben | 28 |
| 4.2.4 | Ausstoßversuche | 29 |
| 4.2.5 | Analyse des Versagensmodus | 31 |
| 4.2.6 | REM-Aufnahme der Wurzelstiftoberflächen | 32 |
| 4.3 | Statistische Auswertung | 32 |
| 5 | Ergebnisse | 34 |
| 5.1 | Haftwerte FRC Postec-Wurzelstifte | 34 |
| 5.2 | Haftwerte CosmoPost-Wurzelstifte | 36 |
| 5.3 | Vergleich Keramik- und Glasfaserstifte | 37 |
| 5.5 | REM-Aufnahmen der Wurzelsitftoberflächen | 42 |
| 6 | Diskussion | 45 |
| 6.1 | Diskussion von Material und Methode | 45 |
| 6.1.1 | Zahnfarbene Wurzelkanalstifte | 45 |
| 6.1.2 | Vorbehandlungsmaßnahmen der Wurzelstifte | 45 |
| 6.1.3 | Auswahl der Befestigungsmaterialien | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.2 | Testverfahren..... | 47 |
| 6.2.1 | Ausstoßversuch..... | 47 |
| 6.3 | Versuchsbedingungen..... | 48 |
| 6.4 | Diskussion der Ergebnisse..... | 50 |
| 6.4.1 | Einfluss der Vorbehandlungsmaßnahmen..... | 50 |
| 6.4.2 | Einfluss des Befestigungsmaterials..... | 54 |
| 6.4.3 | Einfluss der Stiftmaterialien..... | 56 |
| 6.4.4 | Versagensmodusanalyse..... | 58 |
| 7 | Schlussfolgerung..... | 60 |
| 8 | Zusammenfassung..... | 62 |
| 9 | Summary..... | 63 |
| 10 | Literaturverzeichnis..... | 64 |
| 11 | Anhang..... | 80 |
| 11.1 | Abkürzungsverzeichnis..... | 80 |
| 11.2 | Technische Daten der Wurzelkanalstifte..... | 81 |
| 11.3 | Materialliste..... | 83 |
| 12 | Danksagung..... | 86 |
| 13 | Curriculum Vitae..... | 87 |
| 14 | Erklärung an Eides Statt..... | 88 |

1 Einleitung

Tief zerstörte, endodontisch behandelte Zähne, die eine zu geringe Oberfläche für die Befestigung einer Aufbaufüllung bieten sowie starken extraaxialen Belastungen ausgesetzt sind, lassen sich mit Hilfe von Wurzelkanalstiften restaurieren. Diese können die Wurzel zwar nicht stabilisieren, führen jedoch zu einer erhöhten Retention des postendodontischen Aufbaus (Sorensen et al. 1990). In mehreren klinischen Studien konnte gezeigt werden, dass der Retentionsverlust von Wurzelkanalstiften der häufigste Misserfolg ist, während Wurzelfrakturen die schwerwiegendste Versagensursache darstellen (Axelsson et al. 1991; Bergman et al. 1989; Testori et al. 1993).

Insbesondere in ästhetisch anspruchsvollen Regionen kommen heutzutage immer häufiger zahnfarbene Wurzelkanalstifte aus faserverstärktem Kunststoff oder aus Keramik zum Einsatz, da sie im Vergleich zu metallischen Stiftversorgungen eine bessere Lichttransmission aufweisen (Michalakis et al. 2004) und keine Verfärbungen durch korrosive Prozesse hervorrufen (Kedici et al. 1998). Bei faserverstärkten Kunststoffstiften wird zusätzlich aufgrund ihres dentinähnlichen E-Moduls eine Verringerung des Risikos von Wurzelfrakturen diskutiert (Ferrari et al. 2000; Schwartz et al. 2004).

Zahnfarbene Wurzelkanalstifte werden adhäsiv im Wurzelkanal verankert. Neben der erhöhten Dichtigkeit, die bei der adhäsiven Befestigung nachgewiesen wurde (Bachicha et al. 1998), konnten ein erhöhter Widerstand gegenüber Abzugskräften und eine günstigere Verteilung auftretender Spannungsspitzen im Vergleich zur konventionellen Zementierung gezeigt werden (Stiefenhofer et al. 1994; Wong et al. 1995). Hier stellt sich die Frage nach der Auswahl des Befestigungskomposites; es stehen sowohl licht-, dual- als auch chemisch härtende Komposite zur Verfügung. Darüber hinaus werden verschiedene Methoden zur Vorbehandlung der Stiftoberfläche beschrieben, die den Haftverbund zwischen Befestigungskomposit und Stift verbessern sollen (Sahafi et al. 2003).

Für Wurzelkanalstifte aus Keramik hat sich die tribochemische Beschichtung als sehr effektiv herausgestellt (Özcan et al. 1998). Bei der Vorbehandlung von Glasfaserstiften zeigt die Literatur jedoch uneinheitliche Ergebnisse (Sahafi et

al. 2004; Sahafi et al. 2003; Schönbrodt et al. 2003) und auch die Hersteller geben hierzu unterschiedliche Empfehlungen.

Das Ziel der vorliegenden Studie war, verschiedene Vorbehandlungsmethoden an Glasfaserstiften zu untersuchen, die den Haftverbund zwischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit verbessern sollen. Darüber hinaus sollte überprüft werden, ob der Haftverbund auch von der Art des Befestigungskomposites abhängig ist und inwieweit die Haftwerte unterschiedlicher Befestigungskomposite an Glasfaserstiften mit denen an Zirkoniumdioxidstiften vergleichbar sind.

2 Literaturübersicht

2.1 Wurzelkanalstifte

Nach der endodontischen Behandlung eines Zahnes stellt sich die Frage der konservierenden und prothetischen Weiterversorgung. In Situationen, bei denen nur wenig koronale Restzahnhartsubstanz für die Retention des Aufbaus besteht oder bei denen mit einer überdurchschnittlichen Scher- und Zugbeanspruchung des Pfeilerzahnes zu rechnen ist, bieten Wurzelkanalstifte die Möglichkeit, zusätzliche Retentionsfläche zu schaffen. Dem Zahnarzt steht hierzu eine Vielzahl an unterschiedlichen Stiftstumpfaufbau-Systemen zur Verfügung. Wurzelkanalstifte und Aufbausysteme lassen sich nach dem Material (Metall, Keramik, Kunststoff), dem Herstellungsverfahren (individuell, halbkonfektioniert oder vollkonfektioniert), der Form (konisch, zylindrisch oder zylindrisch-konisch) und der Oberflächenstruktur (glatt, aufgeraut oder mit Gewinde) einteilen (Lauer et al. 1996).

Das Material für die Wurzelkanalstifte sollte neben einer sehr guten Bioverträglichkeit eine hohe Bruchfestigkeit und Passgenauigkeit aufweisen sowie einfach zu verarbeiten sein. Diese Voraussetzungen werden durch die Verwendung ausgewählter Metall-Legierungen (Titan, Gold-Platin, Gold-Iridium) sowie bestimmter metallfreier Materialien erfüllt (Arvidson et al. 1978; Ottl et al. 2002; Wirz et al. 1982). Moderne metallfreie Stiftsysteme bestehen entweder aus hochfester Keramik (Zirkoniumdioxid) oder aus Kompositmaterialien, die als Grundmasse Acrylate oder Epoxidharze verwenden und durch synthetische Fasern aus Karbon, Quarz oder Glas verstärkt werden.

Bezüglich ihres Herstellungsverfahrens erzielen individuell gefertigte Stifte die beste Formkongruenz zum Wurzelkanal und eignen sich vor allem für stark zerstörte Zähne (Bergman et al. 1989). Gewinde tragende Stifte mit zylindrischer Geometrie erreichen die höchsten Retentionswerte (Standlee et al. 1978), verursachen jedoch im Vergleich zu anderen Stiftsystemen höhere Spannungskonzentrationen innerhalb der Wurzel (Standlee et al. 1992). Dadurch wird das Risiko einer Wurzelfraktur deutlich erhöht (Caputo et al. 1973; Thorsteinsson et al. 1992). Passive, gewindefreie Stifte mit zylindrischer

Geometrie zeigten in Studien gute klinische Langzeiterfolge. Einige Autoren empfehlen daher, sie aufgrund der besseren Retention (Colley et al. 1968; Johnson et al. 1978) den konischen Stiften vorzuziehen, besonders in den Fällen, bei denen die Stiftlänge geringer als die Kronenlänge ist (Sorensen et al. 1984). Passive konische Stifte entsprechen am besten der Wurzelanatomie und der Form der Wurzelkanalaufbereitung. Durch diese Geometrie wird eine hervorragende Passung und Kontinuität zur Schichtdicke des zirkumkanalären Dentins erreicht. Die Gefahr der Wurzelperforation wird dadurch minimiert. Das erhöhte Risiko von Retentionsverlusten (Colley et al. 1968; Standlee et al. 1978) versucht man durch adhäsive Eingliederung mit Befestigungskunststoffen, retentive Oberflächenstruktur des Stiftes und Aufrauung der Wurzelkanalwand zu reduzieren (Nergiz et al. 1993).

2.1.1 Metallische Wurzelkanalstifte

Stiftstumpfaufbausysteme aus Metall stellen heutzutage immer noch das Standardverfahren beim Aufbau stark zerstörter wurzelkanalbehandelter Zähne dar. Es werden sowohl konfektionierte Stifte als auch halbindividuell und individuell gegossene Stiftaufbauten aus Edelmetalllegierungen und Nichtedelmetalllegierungen hergestellt. In Laborstudien zeichnen sich die Stifte durch ihre hohe Festigkeit aus (Martinez-Insua et al. 1998; Sidoli et al. 1997). Da metallische Stiftstumpfaufbauten einen erheblich höheren Elastizitätsmodul als Dentin besitzen, entstehen bei Belastung Spannungsspitzen an einzelnen Dentinarealen (Assif et al. 1989). Hierdurch können Wurzelfrakturen im mittleren und apikalen Wurzeldrittel entstehen, die zur Extraktion des Zahnes führen (Cormier et al. 2001; Heydecke et al. 2002; Martinez-Insua et al. 1998; Sidoli et al. 1997).

Bei ästhetisch hochwertigen Restaurationen ist der Einsatz von Metallstiften stark eingeschränkt. Aufgrund ihrer schlechten Transluzenz können sie durch Vollkeramikronen und die marginale Gingiva grau durchscheinen (Meyenberg et al. 1995; Zalkind et al. 1998). Ein weiterer Nachteil von metallischen Stiftaufbauten kann in den elektrochemischen Eigenschaften des Materials liegen. Für Stiftaufbauten aus nicht korrosionsbeständigen Legierungen konnten klinisch Verfärbungen durch Einlagerung von Korrosionsprodukten in

Zahnhartsubstanz und Mukosa beobachtet werden (Arvidson & Wroblewski 1978; Wirz & Christ 1982). In der gemeinsamen Stellungnahme von DGZMK, DGZPW und DGZ wird daher die Verwendung von korrosionsbeständigen Titan, Gold-Platin- und Gold-Iridium-Legierungen gefordert (Edelhoff et al. 2003).

Über metallische Stiftsysteme existierten eine Vielzahl klinischer Studien. Die Misserfolgsraten metallischer Stiftsysteme differieren erheblich in Abhängigkeit vom Stiftdesign (Sorensen & Engelman 1990; Sorensen & Martinoff 1984), vom Verhältnis Stift- zu Kronenlänge (Sorensen & Martinoff 1984), von der Art der prothetischen Versorgung (Mentink et al. 1993) sowie von der Herstellungsmethode (Creugers et al. 1993) und werden mit Werten zwischen 0,6 % (Weine et al. 1991) und 22,4 % (Roberts 1970) angegeben. Stark zerstörte Zähne, die mit individuell gegossenen Stiftaufbauten und Kronen versorgt wurden, zeigten nach sechs Jahren eine klinische Erfolgsrate von 90,6 % (Bergman et al. 1989). Zu einem ähnlichen Ergebnis kam eine Metaanalyse, die für gegossene Stiftaufbauten über einen Beobachtungszeitraum von 6 Jahren eine Erfolgsrate von 91 % und für geschraubte Stifte mit einem Kompositaufbau eine Erfolgsrate von 81 % beschrieb (Creugers et al. 1993). In einer weiteren Studie wurden 456 konische und 332 zylindrische Metallstifte über einen Zeitraum von vier bis fünf Jahren nachuntersucht (Torbjørner et al. 1995). Die Misserfolgsrate für die konischen Stifte lag bei 15 % und für die zylindrischen Stifte bei 8 %. Der Hauptversagensgrund war Retentionsverlust.

2.1.2 Zahnfarbene Wurzelkanalstifte

Zur ästhetischen Rekonstruktion mit vollkeramischen Kronen stehen zahnfarbene Wurzelstifte zur Verfügung. Diese bestehen aus Zirkoniumdioxidkeramik oder aus faserverstärktem Komposit (Bateman et al. 2003; Heydecke et al. 2002).

2.1.2.1 Wurzelkanalstifte aus Zirkoniumdioxidkeramik

Wurzelstifte aus teilstabilisiertem Zirkoniumdioxid wurden Mitte der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts erstmals vorgestellt (Meyenberg et al. 1995). Reines Zirkoniumdioxid besitzt drei temperaturabhängige Phasen. Beim Abkühlprozess einer reinen ZrO_2 -Schmelze kristallisiert zuerst die kubische Phase, die sich dann in die tetragonale und diese dann wieder in die monokline Phase umwandelt. Beim Abkühlen tritt beim tetragonal-monoklinen Phasenübergang eine starke Volumenzunahme auf, was zu einer Zerstörung massiver Bauteile und damit zu Instabilität führt. Durch die gezielte Zugabe von 3-6 Gew.% Yttriumoxid (Y_2O_3) gelingt es, die tetragonale Zirkoniumdioxidmodifikation bis zur Raumtemperatur zu stabilisieren und eine mittlere Korngröße kleiner $0,6 \mu m$ zu erreichen (Piconi et al. 1999). Durch diese Maßnahme wird das Risswachstum innerhalb der Keramik deutlich reduziert. Tritt ein Riss auf, wandeln sich die tetragonalen Kristalle an der Riss Spitze in monokline Kristalle um, was mit einer Volumenzunahme von zirka 5 Prozent verbunden ist, so dass an der Riss Spitze Druckspannungen entstehen und das Risswachstum gestoppt wird. Bedingt durch diese Modifikation verfügen Wurzelstifte aus yttriumstabilisiertem Zirkoniumdioxid über hervorragende mechanische Eigenschaften. Neben ihrer hohen Risszähigkeit verfügen die Zirkoniumdioxidstifte über eine Biegefestigkeit, die mit der von Titanstiften vergleichbar ist (Heydecke et al. 2002; Heydecke et al. 2001; Pontius et al. 2002). Zusätzlich bieten vollkeramische Stifte durch ihre dentinähnliche Farbwirkung eine exzellente Ästhetik (Meyenberg et al. 1995). Zirkoniumdioxid unterliegt keinen korrosiven Prozessen (Christel et al. 1989) und verfügt über eine hervorragende biologische Verträglichkeit (Akagawa et al. 1993; Ichikawa

et al. 1992). Als Nachteile von Keramikstiften sind ihre schwere Entfernbarkeit nach Stiffaktur (Qualtrough et al. 2003) und das Risiko einer Wurzelfaktur zu nennen (Asmussen et al. 1999; Rosentritt et al. 2000). Bei der Auswertung von In-vitro-Frakturmustern nach maximaler linearer Belastung konnte gezeigt werden, dass Keramikstifte im Vergleich zu Metallstiften aufgrund ihrer Sprödigkeit eher brechen als dezementieren (Rosentritt et al. 2000). Aufgrund ihres zum Dentin um ein vielfach höheren Elastizitätsmoduls werden Spannungsspitzen im Wurzeldentin erzeugt, die das Risiko einer Fraktur der Zahnwurzel erhöhen (Asmussen et al. 1999; Rosentritt et al. 2000).

Klinische Studien zu Zirkoniumdioxidkeramikstiften gibt es nur wenige. Bisher publizierte Kurzzeitstudien zeigten jedoch gute Ergebnisse. Die klinischen Untersuchungen hatten einen durchschnittlichen Beobachtungszeitraum von 11 bis 58 Monaten. Es wurden Stifte verschiedener Hersteller nach der direkten Methode und nach der indirekten Methode in Kombination mit einem gepressten Keramikaufbau inseriert. Die Stifte wiesen unterschiedliche Durchmesser auf und wurden sowohl adhäsiv als auch herkömmlich mit einem Glasionomerezement (KetacCem) befestigt. Die in den Studien evaluierten Front- und Seitenzähne wurden prothetisch mit Vollkeramikronen, Metallkeramikronen und mit keramischen Verblendschalen versorgt. Die Untersuchungen zeigten nach Ablauf des oben genannten durchschnittlichen Beobachtungszeitraums weder Frakturen der Stifte oder Wurzeln, noch Retentionsverluste (Kakehashi et al. 1998; Kern et al. 1998; Meyenberg et al. 1995; Nothdurft et al. 2006). In einer retrospektiven Studie von Paul et al. (Paul et al. 2004) wurden 79 Zirkoniumdioxidstifte mit direkten Kompositaufbauten und 34 Stifte mit Glaskeramikaufbauten nach einer mittleren Beobachtungszeit von über 4 Jahren kontrolliert. Alle Stifte waren adhäsiv befestigt. In der Gruppe mit den direkten Kunststoffaufbauten waren keine Verluste zu verzeichnen. In der Gruppe mit den indirekten Aufbauten traten drei Misserfolge in Form von Retentionsverlusten auf. Da sich weder die Geometrie noch die Weite der Stiftbettpräparation dieser Zähne zu den anderen Zähnen in dieser Gruppe unterschied und keine Stiffrakturen zu beobachten waren, führten die Autoren die Misserfolge auf die Anwendungsempfindlichkeit der adhäsiven Befestigung der Wurzelstifte zurück.

2.1.2.2 Wurzelkanalstifte aus glasfaserverstärktem Kunststoff

Glasfaserverstärkte Kunststoffstifte wurden Ende der neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts auf den Markt gebracht. Sie wurden entwickelt, um die ästhetischen Nachteile von Karbonfaserstiften zu kompensieren, verfügen jedoch über vergleichbare mechanische Eigenschaften (Asmussen et al. 1999; Galhano et al. 2005). Aufgrund der guten Vergleichbarkeit und der Fülle an Studien über Karbonfaserstifte, ist es unumgänglich, in diesem Rahmen Veröffentlichungen über Karbonfaserstifte zu zitieren. Karbonfaserverstärkte Kunststoffstifte sind die bisher am häufigsten untersuchten faserverstärkten Kunststoffstifte. Sie wurden erstmals 1990 in Form des Composipost-Stiftsystems (RTD, Grenoble, Frankreich) in der Literatur beschrieben (Duret et al. 1990). Diese Stifte bestehen aus durchgehenden, unidirektional ausgerichteten Karbonfasern mit einem Durchmesser von 8 μm , die in einer Epoxidharzmatrix eingebettet sind. In-vitro-Studien bescheinigen diesen Stiften eine hohe Bruch- (King et al. 1990) und Biegefestigkeit (Purton et al. 1996; Torbjørner et al. 1995). Nach Benetzung mit Wasser (Mannocci et al. 2001; Torbjørner et al. 1995) oder Temperaturlastwechseln (Drummond 2000; Drummond et al. 1999) ließ sich allerdings eine massive Abnahme dieser Werte beobachten. Bei der Befestigung von Karbonfaserstiften in Rinderzähnen wurde nach der Lagerung in Speichellösung für ein Jahr keine reduzierte Biegefestigkeit festgestellt (Mannocci et al. 2001). Eine besondere Charakteristik von Faserstiften ist der Elastizitätsmodul, der ähnlich dem des Dentins ist (Faserstift = 20 -40 GPa; Dentin = 18 GPa) (Asmussen et al. 1999; Galhano et al. 2005). Ein ähnliches Elastizitätsmodul von Stift und Zahn soll eine optimale Übertragung von einwirkenden Kräften auf die Zahnhartsubstanz ermöglichen, wodurch das Risiko von Wurzelfrakturen verringert wird (Asmussen et al. 1999; Duret et al. 1990). Eine In-vitro-Studie, in der Zähne mit Stiftaufbauten und Metallkronen versorgt wurden und anschließend einer zyklischen Belastung ausgesetzt wurden, kam zu dem Ergebnis, dass an Zähnen, die mit faserverstärkten Wurzelstiften restauriert wurden, weniger Wurzelfrakturen auftraten, als bei Zähnen, die mit einem Titanstift oder einem gegossenen Aufbau versorgt wurden (Isidor et al. 1996). Kam es trotzdem zu

einer Fraktur der Zahnwurzel, verlief sie meist so günstig, dass der Zahn mit Hilfe eines neu eingebrachten Stiftes versorgt werden konnte (Dean et al. 1998; King & Setchell 1990; Mannocci et al. 1999; Martinez-Insua et al. 1998). Im Falle eines solchen Misserfolgs, erwies sich die problemlose Entfernbarkeit der Faserstifte als sehr vorteilhaft (Ferrari et al. 2000; Gesi et al. 2003). Durch die parallele Faserausrichtung in der Kunststoffmatrix wird das Risiko einer Wurzelperforation während des Entfernens stark herabgesetzt, da die Fasern den Instrumenten eine gewisse Führung geben (de Rijk 2000). In einer über drei Jahre laufenden klinischen Studie konnten keine Wurzel- und Stiftfrakturen oder Retentionsverluste beobachtet werden (Fredriksson et al. 1998). Neben dem dentinähnlichen Elastizitätsmodul wird die adhäsive Befestigung mit Kunststoffen und die damit verbundene Bildung eines so genannten Monoblocks aus Dentin, Befestigungskunststoff und Faserstift für das günstige Frakturverhalten verantwortlich gemacht (Boschian Pest et al. 2002; Freedman 2001). Als größter Nachteil der Karbonfaserstifte bleiben die durch ihre schwarze Farbe bedingten, schlechten ästhetischen Eigenschaften. Besonders bei vollkeramischen Einzelzahnversorgungen führt die Verwendung von Karbonfaserstiften nur zu einem unbefriedigenden Ergebnis (Vichi et al. 2000). Die Zusammensetzung von Glasfaserstiften basiert auf einem Acrylat oder Epoxidharz, in das silanisierte Glasfasern eingetaucht werden. Auf diese Weise wird ein chemischer Verbund zwischen den Fasern und der Kunststoffmatrix hergestellt (Solnit 1991). Hinsichtlich ästhetischer Gesichtspunkte sind glasfaserverstärkte Kunststoffstifte den Karbonfaserstiften vorzuziehen (Akkayan et al. 2002; Robbins 2002; Rosentritt et al. 2000). Einige Glasfaserstifte zeichnen sich weiterhin durch eine gute Lichtdurchlässigkeit aus, so dass auch tiefer gehende Bereiche des Befestigungskunststoffes im Wurzelkanal mittels UV-Licht ausgehärtet werden können (Vichi et al. 2001). Bezüglich der klinischen Überlebensrate von Glasfaserstiften existieren nur wenige Studien. Eine jüngst veröffentlichte prospektive klinische Studie beobachtete für Glasfaserstifte nach 24 Monaten eine Misserfolgsrate von 12,8 % (Naumann et al. 2005). Die häufigste Versagensursache waren Stiftbruch oder Retentionsverlust. Hinsichtlich des Stiftdesigns (zylindrisch oder konisch) konnte kein statistisch signifikanter Einfluss festgestellt werden. Die

relativ hohe Misserfolgsrate wurde von den Autoren durch den hohen Zerstörungsgrad der untersuchten Zähne erklärt. Nahezu zwei Drittel der restaurierten Zähne waren bis auf Gingivaniveau zerstört.

Eine andere prospektive Studie beschrieb für endodontisch behandelte Zähne, die mit Quarzfaserstiften und Keramik- oder Metallkeramikkrone versorgt wurden, nach einem Zeitraum von 30 Monaten eine Misserfolgsrate von nur 1,7 % (Malferrari et al. 2003). Alle Fehlschläge traten bei der Abnahme der provisorischen Versorgung auf. Zwei der drei Zähne wiesen große Zahnhartsubstanzdefekte und weite Kanaldurchmesser auf. Dieser Sachverhalt wird durch eine Studie bestätigt, in der 225 Prämolaren mit drei verschiedenen Quarz- und Glasfaserstiften versorgt wurden (Monticelli et al. 2003). Die Misserfolgsrate betrug 6,2 %. Wiederum traten alle Fehlschläge während der Abnahme der Provisorien auf.

Eine retrospektive Studie, in der 1304 Zähne mit drei verschiedenen Faserstiftsystemen aufgebaut wurden, beobachtete nach sechs Jahren eine Misserfolgsrate von 3,2 % (Ferrari et al. 2000). In einer prospektiven klinischen Studie derselben Arbeitsgruppe wurden 240 Prämolaren mit unterschiedlichen Zahnhartsubstanzdefekten untersucht (Ferrari et al. 2007). Die eine Hälfte wurde mit einem Glasfaserstift und einer Metallkeramikkrone versorgt, die andere Hälfte wurde lediglich mit einem adhäsiven Kompositaufbau und einer Krone restauriert. Nach einem Untersuchungszeitraum von zwei Jahren wurde für die Stiftgruppe eine Überlebensrate von 92,5 % ermittelt. Die Zähne ohne Stiftversorgung, zeigten eine Überlebensrate von nur 70 %. Sämtliche Misserfolge in der Stiftgruppe waren Retentionsverluste des Stift-Kompositaufbaus. Alle Misserfolge in der Studie wurden an Zähnen mit starken Zahnhartsubstanzverlusten beobachtet.

2.2 Befestigung von Wurzelkanalstiften

Um einen Wurzelstift im Zahn zu verankern, stehen zwei verschiedene Befestigungsmethoden zur Verfügung. Es gibt zum einen die mechanisch-retentive bzw. mechanisch-frikative, zum anderen die adhäsive Verankerung (Simon et al. 1995). Die mechanisch-retentive bzw. mechanisch-frikative

Verankerung oder die Kombination beider Mechanismen stellt die gebräuchlichste Art der Befestigung dar. Die retentive Wirkung konventioneller Zemente, wie Zinkphosphatzement oder Glasionomerezement, beruht auf der mikromechanischen Verzahnung der Zementpartikel mit den entgegenstehenden Grenzflächen. Verschiedenartige Stiftoberflächen (glatt<gestrahlt<gerillt<geschraubt) können die Retention gegen Abzugs- und Rotationskräfte positiv beeinflussen (Standlee et al. 1978). Dabei ist aber immer zu beachten, dass es sich lediglich um einen mechanischen Verbund nach physikalischen Grundsätzen handelt. Einen echten chemischen Verbund können die konventionellen Zemente weder mit Metall noch mit Dentin eingehen. Zusätzlich spielt die Stiftform eine wichtige Rolle. Parallelwandige Stifte weisen eine höhere Friktion als konische Stifte auf, bei denen eine friktive Presspassung angestrebt wird (Kaelin et al. 1991; Kurer et al. 1977). Für zylindrische Stiftsysteme mit Gewinde konnten ebenfalls sehr hohe Retentionswerte nachgewiesen werden (Kurer et al. 1977; Ruemping et al. 1979; Standlee et al. 1978), bei der Insertion treten jedoch hohe Spannungskonzentrationen innerhalb der Wurzel auf, die das Wurzelfrakturrisiko stark vergrößern (Standlee et al. 1992). Aufgrund dieser Beobachtung wird der passiven Zementierung, bei der der Stift nicht in Kontakt mit der Wurzeloberfläche tritt, der Vorzug gegeben (Ferrari et al. 2002). Im Gegensatz dazu steht die Tatsache, dass niedergelassene Zahnärzte in Deutschland am häufigsten Schrauben zum Aufbau endodontisch behandelter Zähne einsetzen (Naumann et al. 2003).

Bei der adhäsiven Verankerung können chemisch-, licht- oder dualhärtende Befestigungskunststoffe verwendet werden, um die Wurzelstifte im Wurzelkanal zu verankern (Standlee & Caputo 1992). Hierfür kommen in erster Linie die nichtmetallischen Wurzelstifte in Frage. In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass sich durch die adhäsive Insertion von Wurzelkanalstiften die Retentionswerte im Vergleich zur konventionellen Zementierung erheblich steigern ließen (Duncan et al. 1998; Leary et al. 1995; Standlee & Caputo 1992). Die Wurzelstifte werden bei dieser Form der Befestigung passiv eingesetzt, so dass die Gefahr von Wurzelfrakturen bei der Stiftsetzung reduziert ist. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Analyse konnte zusätzlich gezeigt

werden, dass adhäsiv befestigte Wurzelstifte weniger Spannungen im Wurzelkanal verursachten als herkömmlich zementierte Stifte (Asmussen et al. 2005). In einer früheren Studie wurde bereits in Bruchversuchen eine erhöhte Widerstandsfähigkeit von Wurzeln mit adhäsiv befestigten Stiften gegenüber herkömmlich zementierten Stiften beschrieben (Mendoza et al. 1997). Darüber hinaus zeigten Studien eine verbesserte koronale Dichtigkeit von adhäsiv eingegliederten Wurzelstiften (Bachicha et al. 1998; Tjan et al. 1991).

Aufgrund der erhöhten Retention wurde die Möglichkeit diskutiert, adhäsiv befestigte Wurzelstifte weniger tief zu inserieren (Nissan et al. 2001). Dadurch wird das Risiko einer Perforation bei der Stiftbohrung gemindert und die Zahnhartsubstanz geschont; im apikalen Bereich kann ferner ein größerer Teil der Wurzelfüllung belassen werden. Dies ist ein nicht zu vernachlässigender Vorteil, da die Länge der apikal verbliebenen Wurzelkanalfüllung einen wesentlichen Einfluss auf die apikale Dichtigkeit hat. Es wurde festgestellt, dass mindestens 3 bis 6 mm Guttapercha apikal belassen werden sollten, um eine apikale Dichtigkeit zu gewährleisten (Kvist et al. 1989; Zillich et al. 1984). Nach heute immer noch geltenden Richtlinien sollte die Insertionstiefe des Wurzelkanalstiftes in etwa die gleiche Länge wie die der klinischen Krone haben (Rosen 1961), die Stifflänge sollte möglichst drei Viertel der verbleibenden Wurzellänge betragen (Leary et al. 1987) und der Stift sollte mindestens die Hälfte der Länge des von Knochen umgebenen Wurzelanteils haben (Stern et al. 1973).

2.3 Oberflächenvorbehandlung

2.3.1 Grundprinzipien

Das Ziel der Restauration endodontisch behandelter Zähne mit adhäsiv befestigten Wurzelkanalstiften ist, Stift, Befestigungskomposit, Aufbaumaterial und Zahnwurzel zu einer Einheit zusammenzufügen. Der Verbund zwischen den einzelnen Komponenten dieses so genannten „Monoblocks“ ist dabei essentiell. Neben der Haftung zwischen Wurzelkanalentin und Komposit, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll, spielt die Haftung zwischen Komposit und Stiftoberfläche eine wichtige Rolle.

Vom Prinzip her ist die adhäsive Befestigung eines Wurzelkanalstiftes in der Zahnwurzel nichts anderes als eine Klebung. Die Wirkungsweise eines Klebstoffes beruht auf den Phänomenen der Adhäsion und Kohäsion. Unter Adhäsion wird die Haftung des Klebstoffes auf den Oberflächen der zu verklebenden Stoffe verstanden. Kohäsion bezeichnet die Eigenstabilität des Klebstoffes. Beide Eigenschaften sind für die Stabilität einer Klebung verantwortlich.

Damit es zur Ausbildung von Haftkräften zwischen Klebstoff und den zu fügenden Materialien kommen kann, ist es wichtig, dass der Klebstoff eine möglichst gute Benetzbarkeit besitzt (Janda 1990). Eine besonders wichtige Maßnahme, um diesen Zustand zu erreichen liegt in der Vorbehandlung der Oberfläche des zu verklebenden Werkstoffes. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Oberflächenvorbereitungsmethoden, die von einfacher mechanischer Reinigung, Entfetten mit einem Lösungsmittel, Sandstrahlen und Ätzen bis hin zu speziellen und teilweise auch sehr aufwendigen Verfahren reichen. In den folgenden Abschnitten werden die beiden Vorbehandlungsmaßnahmen, die in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kamen, näher beschrieben.

2.3.2 Silanisierung

Die Silanisierung ist eine spezielle Oberflächenvorbereitung, die einen chemischen Verbund zur Folge hat. Silane wurden 1960 in glasverstärkten Kunststoffen auf den Markt gebracht. Aufgrund ihres Zwittercharakters können Silane als Mediatoren für den adhäsiven Verbund zwischen einer anorganischen Oberfläche und einer organischen Matrix eingesetzt werden (Matinlinna et al. 2004). Der chemische Reaktionsablauf beginnt zunächst mit der Hydrolyse der Methoxygruppen (OCH_3 -Gruppen) des Silans. Diese Umwandlung des Silans erfolgt in einem Lösungsmittel, das zusätzlich etwas Wasser und Säure enthält. Das Silan wird so zu Silanol umgesetzt. Die durch Hydrolyse der Methoxygruppen des Silans entstehenden Hydroxylgruppen sind in der Lage mit Hydroxylgruppen zu reagieren, die an den Oberflächen vieler anorganischer Verbindungen wie Gläsern, Keramiken, Siliziumdioxid (SiO_2), Titanoxid (TiO_2) Zirkoniumdioxid (ZrO_2) oder Aluminiumoxid (Al_2O_3) vorzufinden

sind. Durch diese chemische Reaktion, bei der Wasser freigesetzt wird, kann ein Verbund zwischen Silan und anorganischem Material erzeugt werden (Janda 1988; Janda 1990). Durch die Zuführung von Wärme kann dieser als Silanisierung bezeichnete Mechanismus zusätzlich verstärkt werden (Plueddemann 1991).

Die zweite Reaktion, die Silane ausführen können, kommt durch die ebenfalls in dem Molekül vorhandene Methacrylgruppe zustande. Diese kann mit den Methacrylgruppen der Monomere eines aufgetragenen Kunststoffes durch radikalische Polymerisation reagieren (Chen 1998; Matsumura 1989). Zur Silanisierung im Dentalbereich wird vornehmlich das 3-Methacryloyloxypropyltrimethoxysilan verwendet. Es spielt eine zentrale Rolle hinsichtlich des Verbundes zwischen anorganischen Füllstoffen und organischer Matrix beispielsweise bei Füllungskunststoffen und Kronen- und Brückenverblend-Kunststoffen.

2.3.3 Silikatisierung

Die Silikatisierung wurde ursprünglich entwickelt, um den Verbund von Komposit an Legierungsoberflächen in der Kronen- und Brückenverblendungstechnik zu verbessern (Tiller et al. 1984). Das Prinzip basiert darauf, auf der Metalloberfläche eine silikatische Zwischenschicht zu erzeugen, über die eine feste feuchtigkeitsresistente Bindung möglich ist. Verschiedene Verfahren sind zur Schaffung dieser Zwischenschicht entwickelt worden. Die in der vorliegenden Arbeit angewendete „intraorale Silikatisierung“ basiert auf dem Rocatec-Verfahren, welches 1989 auf dem deutschen Markt eingeführt wurde (Völlm 1989). Bei diesem Verfahren wird zunächst die Gerüstoberfläche zur Reinigung mit Aluminiumoxidpartikeln mit einem Druck von 2 - 4 bar abgestrahlt. Dann erfolgt die so genannte tribochemische Beschichtung mit Rocatec Plus, einem Aluminiumoxid-Strahlsand mit Kieselsäurebeschichtung. Dieser Strahlprozess dient dazu, SiO_2 -Partikel in die Oberflächenschicht des Metallgerüsts einzulagern. Als Resultat entsteht eine reine SiO_2 -Schicht ohne organische Anteile, die nach Aufbringen eines Silans eine chemische Verbindung mit einem Kunststoff eingehen kann (Matinlinna et al. 2004). Mit dem CoJet-System (3M ESPE) und einem Mikro-Pulverstrahlgerät

(Dento-Prep Rønvig, Kopenhagen, Dänemark), lässt sich dieses Verfahren auch direkt am Patientenstuhl anwenden. Das System beinhaltet die tribochemische Beschichtung der Oberfläche mit Siliziumdioxid modifizierten Aluminiumoxidpartikeln (CoJet Sand, 3M ESPE) und die anschließende Silanisierung (ESPE Sil, 3M ESPE). Verglichen mit dem Rocatec-Verfahren fehlt lediglich die initiale Reinigung der Oberfläche mit Aluminiumoxidstrahlsand. Basierend auf den Ergebnissen aus Studien über Keramik- und Metallkeramikreparaturen sollte die Sandstrahlung in einem Abstand von 2-10 mm senkrecht zur Oberfläche für 10-15 Sekunden bei einem Arbeitsdruck von 2,3 bar appliziert werden, um optimale Ergebnisse zu erhalten (Frankenberger et al. 2000; Niedermeier et al. 1998).

2.3.4 Einfluss der Vorbehandlung auf den Keramik-Kunststoff-Verbund

Genau wie der Metall-Kunststoff-Verbund erfordert auch der Keramik-Kunststoff-Verbund eine Vorbehandlung der Keramikoberfläche (Özcan et al. 2003). Bei Silikatkeramiken wird dies in der Regel durch eine Flusssäureätzung mit anschließender Silanisierung der Keramikoberfläche erzielt (Janda et al. 2003; Valandro et al. 2005). Im Gegensatz dazu lassen sich Keramiken, die keine Glasmatrix beinhalten (Aluminium- und Zirkoniumdioxidkeramiken), nicht auf diese Weise konditionieren (Derand et al. 2000; Kern et al. 1998; Özcan et al. 2001). Hier kann alternativ das oben beschriebene Silikatisierungsverfahren angewendet werden (Özcan & Vallittu 2003).

In Studien mit hochfesten Zirkoniumdioxidkeramiken, die den Keramik-Kunststoff-Verbund nach unterschiedlicher Vorbehandlung untersuchten, stellte sich das Rocatec-System als effektivste Vorbehandlungsmethode heraus (Atsu et al. 2006; Bottino et al. 2005; Valandro et al. 2005). Kern und Wegner hingegen erhielten durch den Einsatz spezieller Phosphatmonomere in den Befestigungssystemen (Panavia, Kuraray) für sandgestrahlte Zirkoniumdioxidkeramik sehr viel bessere Werte als für tribochemisch beschichtete Keramik kombiniert mit einem Bis-GMA-Kunststoff (Kern & Wegner 1998). Die gute Haftung an sandgestrahlten Zirkoniumdioxidkeramiken von Panavia 21 und Panavia F (Kuraray, Osaka, Japan), die mit MDP (10-methacryloxyethyltrimellitanhydrid) beide ein

funktionelles Phosphatmonomer enthalten, konnte in weiteren Studien bestätigt werden (Strub et al. 1999; Wegner et al. 2000). Eine andere Studie, in der in allen Gruppen Panavia F als Befestigungskomposit benutzt wurde, erhielt für die Vorbehandlung mit dem Rocatec-, als auch mit dem CoJet-System signifikant höhere Werte, als für die Gruppe in der die Oberfläche lediglich mit Aluminiumoxidpartikeln aufgeraut wurde (Bottino et al. 2005).

Der Effekt, den der Strahlprozess auf die Stabilität von hochfesten Keramiken hat, wird kontrovers diskutiert. Eine Analyse von strahlenförmigen Rissbildungen, die an Keramikplättchen verschiedener Schichtstärke künstlich erzeugt wurden, zeigte, dass Sandstrahlen oder Beschleifen der Keramikoberfläche zur Entstehung von Mikrorissen in der Keramik führen kann (Lawn et al. 2002). Andere Untersuchungen beschrieben, dass die Anrauhung der Oberfläche durch Sandstrahlen möglicherweise sogar einen stärkenden Effekt auf die Biegefestigkeit von Zirkoniumdioxidkeramik hat (Kosmac et al. 1999; Kosmac et al. 2000).

2.3.5 Einfluss der Vorbehandlung auf den Kunststoff-Kunststoff-Verbund

Konfektionierte Wurzelkanalstifte aus glasfaserverstärktem Komposit bestehen aus Glasfasern, die in Acrylat oder Epoxidharz eingebettet sind. Der hohe Konversionsgrad der Polymermatrix wirkt sich erschwerend auf den Kunststoff-Stift-Verbund bei der adhäsiven Befestigung im Wurzelkanal aus (Bell et al. 2004). Aufgrund dieser Tatsache scheint eine Vorbehandlung der Stiftoberfläche sinnvoll. Zur Verbesserung des Verbundes an der Grenzfläche Wurzelstift-Komposit werden daher verschiedene Oberflächenbehandlungen vorgeschlagen (Sahafi et al. 2003). Diese können sowohl chemischer als auch mechanischer Natur sein.

Eine Möglichkeit der chemischen Oberflächenbehandlung besteht im Auftragen einer Silanlösung (Perdigao et al. 2006; Sahafi et al. 2003). Silane können aufgrund ihrer dualen Reaktivität eine chemische Bindung zwischen einem Befestigungskomposit und den exponierten Glasfasern oder Füllkörpern auf der Stiftoberfläche herstellen (Matinlinna et al. 2004). Studien, die den Einfluss der Silanisierung von Glasfaserstiften näher untersucht haben, kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Zwei Studien berichteten über einen

haftfestigkeitssteigernden Effekt im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrollgruppe (Aksornmuang et al. 2004; Goracci et al. 2005), während andere Untersuchungen keinen Unterschied zwischen silanisierten und unbehandelten Stiften feststellen konnten (Perdigao et al. 2006; Sahafi et al. 2003). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die verbesserte Benetzbarkeit der Oberfläche durch Silane eine Schlüsselrolle für eine gesteigerte Adhäsion spielt, aber der genaue Reaktionsmechanismus noch nicht bis ins letzte Detail verstanden wurde (Matinlinna et al. 2004). In neueren Untersuchungen wurde versucht, mit verschiedenen chemischen Lösungen die Kompositmatrix von Glasfaserstiften anzulösen. Das Ziel war, den Anteil an exponierten Glasfasern an der Stiftoberfläche zu erhöhen, um eine größere Reaktionsfläche für Silanlösungen zu schaffen. Durch die Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid (10 % und 24 %) ließ sich die Dimethacrylatmatrix von Glasfaserstiften (GC fibre post; GC Corporation, Tokio, Japan) anlösen (Vano et al. 2006). Mit Hilfe von Natriumethoxid (Monticelli et al. 2006) und Kaliumpermanganat (Monticelli et al. 2006) ließen sich durch Anlösen der Epoxidharzmatrix von DT Light Post-Wurzelstiften (VDW GmbH, München, Deutschland) und anschließender Silanisierung erhöhte Haftwerte zu plastischen Stumpfaufbaumaterialien messen. Die Konditionierung der Stiftoberfläche mit Flusssäure führte mit der kombinierten Anwendung einer Silanlösung ebenfalls zu einer erhöhten Haftung an Aufbaumaterialien aus Komposit (Vano et al. 2006). Zwei weitere Studien, die die Haftung von Befestigungskompositen untersuchten, konnten den haftfestigkeitssteigernden Effekt nach Flusssäurebehandlung nicht feststellen (Sahafi et al. 2004; Sahafi et al. 2003).

Zur mechanischen Vorbehandlung von Glasfaserstiften mit Sandstrahlgeräten und der kombiniert mechanisch-chemischen Vorbehandlung mit dem CoJet-System existieren bisher nur sehr wenige Studien, mit unterschiedlichen Ergebnissen (Sahafi et al. 2004; Sahafi et al. 2003; Schönbrodt et al. 2003). Eine Studie ermittelte nach tribochemischer Beschichtung signifikant höhere Abzugskräfte als für sandgestrahlte und unbehandelte Glasfaserstifte (Schönbrodt et al. 2003). Sahafi und Peutzfeld et al. konnten mit Hilfe von Abscherversuchen ebenfalls eine gesteigerte Haftung nach Oberflächenbehandlung mit dem CoJet-System feststellen, erhielten allerdings

höhere Werte für die alleinige Sandstrahlung und die höchsten Werte für die Kombination von Sandstrahlung und Silanisierung (Sahafi et al. 2003). In einer weiteren Studie konnte die gleiche Arbeitsgruppe mit einem so genannten diametralen Spannungstest jedoch keine Unterschiede mehr zwischen den drei Vorbehandlungsmethoden und der Kontrollgruppe feststellen (Sahafi et al. 2004). Eine Möglichkeit der Erklärung für die Diskrepanz der Ergebnisse sehen die Autoren in den unterschiedlichen Prüfmethode, die in den Studien angewendet wurden (Sahafi et al. 2004).

3 Fragestellung

Für die Retention adhäsiv befestigter Wurzelkanalstifte spielt der Verbund des Befestigungskomposits zur Stiftoberfläche eine entscheidende Rolle. Aufgrund der kontroversen Studienergebnisse besteht jedoch bis heute keine eindeutige Empfehlung bezüglich der Vorbehandlung von glasfaserverstärkten Wurzelkanalstiften. Weiterhin stellt sich die Frage nach der Auswahl des Befestigungskomposits.

Das Ziel dieser In-vitro-Studie war es, den Einfluss der Vorbehandlung auf den Haftverbund zwischen Glasfaserstift und Befestigungskomposit mit Hilfe eines Ausstoßversuches zu überprüfen. Darüber hinaus sollte die Haftung von sechs verschiedenen Befestigungskompositen an Glasfaserstiften mit der an Zirkoniumdioxidstiften verglichen werden.

Für die vorliegende Untersuchung wurde die Nullhypothese aufgestellt, dass die Haftung weder von der Stiftart, der Oberflächenvorbehandlung, noch von der Art des Befestigungskomposits beeinflusst wird.

4 Material und Methode

Die zu untersuchenden Materialien und Hilfsmaterialien werden zunächst in Kapitel 4.1 beschrieben, um danach in Kapitel 4.2 den Herstellungsprozess der Proben, die Versuchsdurchführung und die Analysemethode darzustellen.

4.1 Material

Das in der Abbildung 4.1 dargestellte Flussdiagramm gibt einen Überblick über die in den Versuchen eingesetzten Wurzelstiftsysteme, ihre Vorbehandlung und die Befestigungskomposite, mit denen sie eingesetzt wurden. Es wurden insgesamt 240 Wurzelstifte in vier Gruppen (n=60) aufgeteilt und mit drei verschiedenen Methoden vorbehandelt. Die Gruppen wurden jeweils mit sechs handelsüblichen Kompositen befestigt.

4.1.1 CosmoPost-Wurzelstifte

Das in den vorliegenden Versuchen eingesetzte CosmoPost-System der Ivoclar Vivadent AG besteht aus konfektionierten, zylindrokonischen Zirkoniumdioxid-Wurzelstiften. Das Grundmaterial besteht aus tetragonalen Zirconia-Polykristallen, die nach dem Pressvorgang heiß isostatisch nachverdichtet (HIP = hot isostatic postcompaction) wurden, so dass die Keramik frei von Porositäten ist (TZP BIO-HIP[®], Metoxit AG, CH-Thayngen). Die genaue Zusammensetzung und Eigenschaften sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen.

Die Stifte haben eine Gesamtlänge von 20,5 mm. Der koronale Anteil verläuft parallelwandig und ist 16 mm lang. Die apikalen 4,5 mm weisen eine Konizität von 6° auf. Es werden Stifte mit einem Durchmesser von 1,4 mm und 1,7 mm angeboten. Dazu gehören ein Wurzelkanaleröffner von 1,1 mm Durchmesser und je ein Kanalerweiterer von 1,4 mm (rote Farbmarkierung) bzw. 1,7 mm Durchmesser (schwarze Farbmarkierung) (Ivoclar-Vivadent-AG 2003).

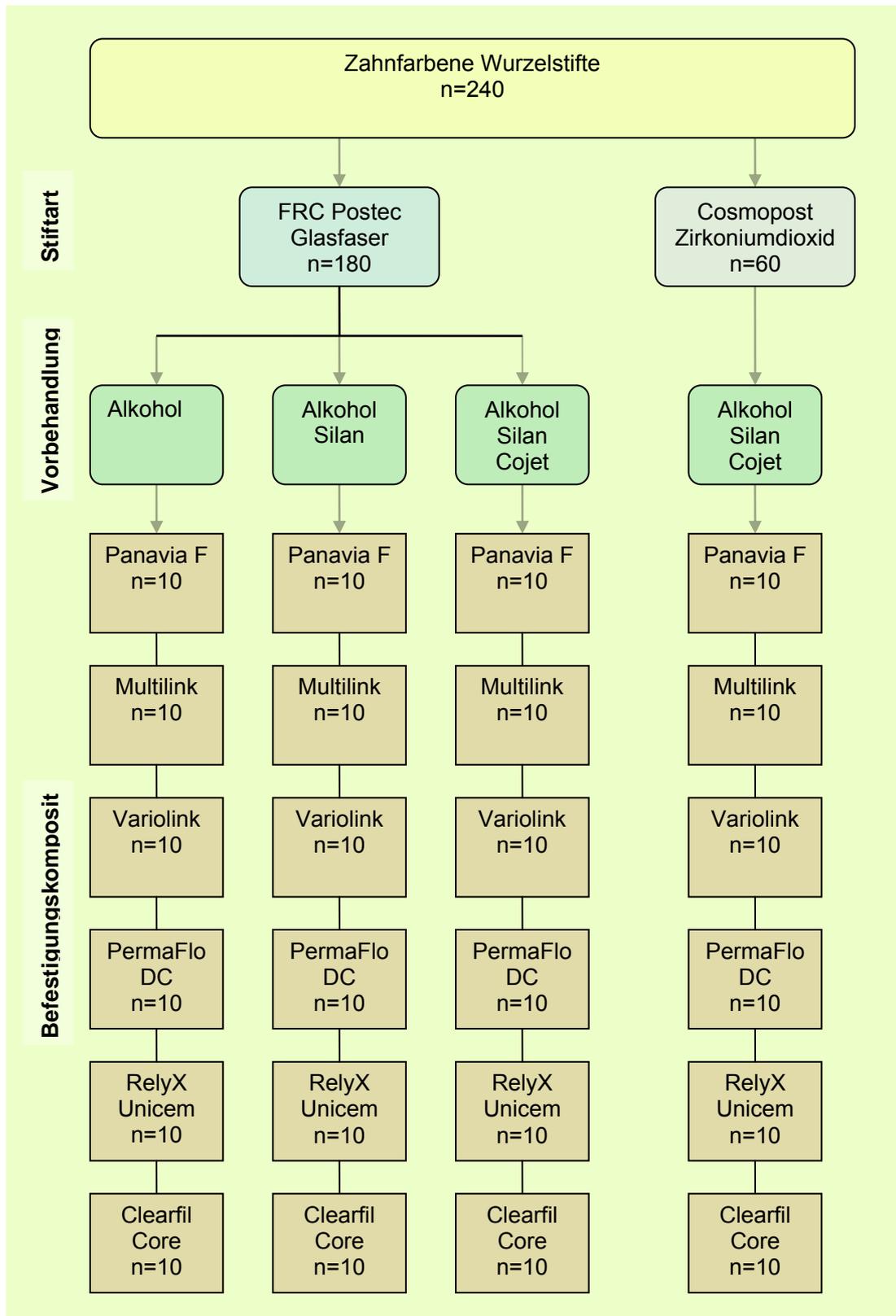


Abb. 4.1: Übersicht über den Versuchsaufbau mit Art und Anzahl der Stifte, den angewendeten Vorbehandlungen und den eingesetzten Befestigungskompositen

Die Oberfläche des CosmoPost weist bereits eine Mikrostruktur auf, die der einer geätzten Keramik entspricht. Das Abstrahlen der Stifte mit Al_2O_3 ist gemäß der Verarbeitungsanleitung ebenso wenig erforderlich wie eine Silanisierung (Ivoclar-Vivadent-AG 2003).

4.1.2 FRC Postec-Wurzelstifte

Die in der Studie verwendeten zylindrokonischen FRC Postec-Wurzelstifte (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) setzen sich aus Glasfasern und einer Polymermatrix aus Urethandimethacrylaten und Triethylenglykoldimethacrylat zusammen. Zusätzlich enthalten sind Ytterbiumtrifluorid für die Röntgenopazität und hochdisperses Siliziumdioxid. Die genaue Zusammensetzung und Eigenschaften sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen.

Der FRC Postec wird in den Größen 1 und 3 angeboten. Zur Anwendung kommen in der vorliegenden Untersuchung die Stifte der Größe 3 mit einer Gesamtlänge von 18,0 mm. Der Schaft hat einen Durchmesser von 2 mm und verläuft parallelwandig. Der apikale, konische Anteil hat eine Länge von 10,8 mm und einen Konuswinkel von $5,3^\circ$. Für die Präparation der Stiftbohrung werden Kalibrierbohrer der entsprechenden Größe verwendet (Ivoclar-Vivadent-AG 2001).

4.1.3 Befestigungskunststoffe

Zur Befestigung der Wurzelstifte wurden bewährte und neue Materialkonzepte verwendet, die sich in der Anzahl der Komponenten und in ihrem Aushärtemodus unterschieden. Es wurden sowohl rein chemisch härtende als auch dual härtende Systeme benutzt.

Gegenstand der Untersuchung waren die Befestigungskomposite Panavia F (Kuraray, Okayama, Japan), Multilink (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), Variolink II (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), PermaFlo DC (Ultradent Products, Salt Lake City, USA), RelyX Unicem (3M Espe, Seefeld, Deutschland) und Clearfil Core (Kuraray, Okayama, Japan). Ihre genaue Zusammensetzung, der Aushärtemodus und ihre Biegefestigkeit sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Tab. 4.1: Untersuchte Befestigungskomposite

| Komposit/ Zement | Hersteller | Zusammensetzung | Aushärtung | Biege- festigkeit |
|---------------------------|-----------------------|---|---------------------|-----------------------|
| Panavia™ F | Kuraray | Silanisiertes α -Quartzpulver, silanisiertes Bariumglaspulver, Natriumfluoride, Bis-GMA, TEGDMA, Benzoylperoxide, Triethanolamine, 10-MDP | Dualhärtend | 75 N/mm ² |
| Multilink® | Ivoclar Vivadent | Dimethacrylate, HEMA, Bariumglasfüller, Ytterbiumtrifluorid, Siliziumdioxidfüller | Chemisch härtend | 90 N/mm ² |
| Variolink® II | Ivoclar Vivadent | Silanisierte Bariumglasfüller, Ytterbiumtrifluorid, Bis-GMA, UDMA, TEGDMA, silanisiertes Mischoxid, Ba-Al-Fluoro- Silikatglas | Dualhärtend | 115 N/mm ² |
| PermaFlo® DC | Ultradent Products | Bis-GMA, Benzoylperoxide, tertiäre Amine | Dualhärtend | 128 N/mm ² |
| RelyX™ Unicem | 3M ESPE, | Silanisiertes Glaspulver, silanisierte Kieselsäure, methacrylierter Phosphorsäureester, Dimethacrylat, Acetat, substituiertes Pyridimidin, Calciumhydroxid, | Dualhärtend | 72 N/mm ² |
| Clearfil™ Core | Kuraray | Silanisiertes Silikatpulver, silanisiertes Glaspulver, TEGDMA, Bis-GMA, N, N'-diethanol-p-toluidin, kolloidales Silikat, Benzoylperoxid, 10-MDP | Chemisch härtend | 115 N/mm ² |

4.1.4 Haftvermittler

In der vorliegenden Untersuchung wurden die sechs verwendeten Befestigungskomposite mit den in Tabelle 4.2 beschriebenen Haftvermittlern kombiniert.

Tab. 4.2: Untersuchte Haftvermittler

| Haftvermittler | Hersteller | Komposit | Adhäsivsystem | Lösungsmittel | Zusammensetzung |
|-----------------------------------|--------------------|---------------|--|-----------------|---|
| Ed Primer | Kuraray | Panavia F | Selbstätzender Primer | Wasser | MDP, HEMA, N-methacryloxy-5-aminosalicylläure, N, N'-Diethanol-p-toluidin, Wasser |
| Multilink Primer A&B | Ivoclar Vivadent | Multilink | Selbstätzender Primer | Wasser | Wasser, Initiatoren, Phosphonsäure-acrylat, HEMA, mod. Polyacrylsäure |
| Excite DSC | Ivoclar Vivadent | Variolink II | Dualhärtendes Einkomponenten-adhäsiv | Ethanol | HEMA, Dimethacrylat, Phosphonsäure-acrylat, hochdisperses Siliciumdioxid, Ethanol |
| PermaFlo DC Primer A&B | Ultradent Products | PermaFlo DC | Mehrstufen Adhäsiv | Ethanol, Aceton | Nicht vom Hersteller beschrieben |
| New Bond | Kuraray | Clearfil Core | Chemisch härtendes Zweikomponenten-adhäsiv | Ethanol | N, N' -diethanol-p-toluidin, Natriumbenzol-sulfinat, Ethylalkohol, Bis-GMA, MDP, HEMA, Dimethacrylate, Benzoylperoxid |

4.1.5 Hilfsmaterialien

4.1.5.1 Technovit 4071

Technovit 4071 (Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) ist ein schnellhärtender, kaltpolymerisierender Kunststoff auf Basis von Methylmethacrylat in Form von Pulver und Flüssigkeit. Er wurde speziell für Schliffeinbettungen und für die Materialeinbettung entwickelt und besitzt eine Druckfestigkeit von 1920 kg/cm².

4.1.5.2 Tetric Ceram

Tetric Ceram ist ein für alle Füllungsklassen einsetzbares Hybridkomposit. Die genaue Materialzusammensetzung ist Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tab. 4.3: Zusammensetzung von Tetric Ceram

| Komposit/Zement | Hersteller | Zusammensetzung | Aushärtung | Biegefestigkeit |
|---------------------|---------------------|--|--------------|-----------------------|
| Tetric Ceram | Ivoclar Vivadent | Bis-GMA, Urethandimethacrylat, TEGDMA, Bariumglas, Ytterbiumtrifluorid, Ba-Al-Fluorsilikatglas, hochdisperses Siliziumdioxid, sphäroides Mischoxid, Katalysatoren, Stabilisatoren, Pigmente | Lichthärtend | 130 N/mm ² |

4.1.5.3 Dento-Prep

Der Mikro-Pulverstrahler Dento-Prep (Rønvig, Kopenhagen, Dänemark) ist ein kompaktes, voll sterilisierbares Gerät für den Einsatz von Strahlmitteln wie Aluminium- und Siliziumoxidpulver. Es kann mittels eines Turbinenadapters an eine zahnärztliche Behandlungseinheit angeschlossen werden. Der Luftdruck für den Betrieb sollte, je nach Anwendungsbereich und Strahlmittel, ca. 2 bis 8 bar betragen.

4.1.5.4 CoJet System

Das CoJet System (3M ESPE) dient zur intraoralen Reparatur bzw. zur intraoralen Silikatisierung von Metall- und Keramikrestorationen und stellt eine Modifizierung des Rocatec-Verfahrens dar.

Die in der Studie verwendeten Produktkomponenten sind:

-CoJet Sand: Hochreiner Korund (Aluminiumoxid) 30 µm mit Kieselsäure (SiO₂) modifiziert und

-3M ESPE Sil: Silan (3-Methacryloyloxypropyl-trimethoxysilan) in Ethanol

4.1.5.5 Monobond S

Monobond S (Ivoclar Vivadent) ist ein Silanhaftvermittler bestehend aus Ethanol, Wasser, Silan (3-Methacryloyloxypropyl-trimethoxysilan) und Essigsäure.

4.2 Methode

4.2.1 Herstellung der Kunststoffzylinder mit künstlicher Stiftbohrung

Um die Wurzelstifte im 90°-Winkel zu ihrer Längsachse befestigen zu können, wurden Kunststoffzylinder mit einer künstlichen Stiftbohrung hergestellt. Hierzu wurde in Teflonblöcke ein zylindrischer Schacht mit einer Tiefe von 25 mm und einem Durchmesser von 10 mm gefräst (Technische Abteilung, Charité-Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland). Die so entstandenen Formen wurden mit Vaselinespray gesprüht und mit nach Herstellerangaben angemischtem Technovit 4071 ausgegossen. Nach dem Aushärten wurden die Kunststoffzylinder ausgebettet und mit Schleifpapier (600er Körnung) auf eine Höhe von 25 mm zurückgeschliffen. Die Proben wurden anschließend in einem Frätsch (Technische Abteilung, Charité Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland) fixiert und mit einem Parallelfräsgerät (Parallelfräsgerät F1, Degussa, Hanau) eine zentrale Bohrung in Längsachse mit einer standardisierten Tiefe von 18 mm und einem Durchmesser von 3,5 mm angelegt. In diesen Schacht wurde Tetric Ceram in mehreren Portionen eingebracht. Nach jeder Schicht wurde mit einem dem jeweiligen Stiftsystem entsprechenden Kalibrierbohrer ein künstlicher Kanal in den Kunststoff gestanzt. Die Bohrer wurden dazu in das Parallelfräsgerät eingespannt und langsam rotierend auf und ab bewegt. Jede Schicht wurde mit einer Halogenlampe für 40 Sekunden ausgehärtet (150 – 1200 mV/ cm², Astralis 10, Ivoclar Vivadent). Die Kanalbohrung für das CosmoPost-System hatte eine Länge von 17 mm. Für die etwas kürzeren FRC Postec-Wurzelstifte betrug die Bohrtiefe 14,5 mm. Die Durchmesser entsprachen denen der verwendeten Stifte. Nach der Fertigstellung wurde jede Bohrung auf störfreien Sitz der Wurzelstifte überprüft.

4.2.2 Vorbehandlung und Befestigung der Wurzelstifte

Vor dem Einkleben in die Kunststoffzylinder wurden alle Stifte mit Alkohol gereinigt. Die Kontrollgruppe der Glasfaserstifte erhielt keine weitere Vorbehandlung. Auf die Stifte der zweiten Gruppe wurde die Silanlösung

Monobond S nach Herstellerangaben aufgetragen. Die dritte Gruppe der Kunststoffstifte wurde mit dem mit CoJet Sand gefüllten Dento-Prep-Gerät für 20 Sekunden mit einem Druck von 2,3 bar aus einer Entfernung von ca. 4 mm abgestrahlt und anschließend mit einer Silanlösung (3M ESPE Sil) eingepinselt. Die Zirkonoxidstifte der vierten Gruppe wurden ebenfalls mit dem Dento-Prep-Gerät abgestrahlt und mit Silanlösung (3M ESPE Sil) beschichtet. Die Strahldauer betrug 32 Sekunden bei einem Strahldruck von 2,8 bar aus 4 mm Entfernung. Der Strahlwinkel betrug 90° zur Stiftoberfläche.

Direkt nach der Vorbehandlung wurden die Stifte (ohne die Stiftoberfläche zu verunreinigen) mit dem Schaft zuerst in eine passgenaue Bohrung einer Acrylglasplatte mit einer Stärke von 3,5 mm (Technische Abteilung, Charité Universitätsmedizin Berlin) gesetzt (Abb. 4.2 A). Das koronale Stiffende schloss genau mit dem Rand der Platte ab und die Stiftachse stand hierzu im rechten Winkel. Bis auf die RelyX Unicem-Gruppe wurde auf alle Wurzelstifte ein dem System entsprechendes Bonding aufgetragen und nach der vorgegebenen Einwirkzeit mit dem nach Herstellerangaben angemischtem Befestigungskunststoff beschickt. Parallel dazu wurde der Kunststoff mit einem Lentulo (VDW-Antaeos, München, Deutschland) in die künstlichen Wurzelstiftbohrungen einrotiert. Anschließend wurden die Kunststoffzylinder zurück in die Teflonform gesetzt und die in der Acrylglasplatte steckenden Stifte wurden unter langsam pumpenden Bewegungen in den Stiftschacht gesteckt. Die Wurzelstifte wurden so tief gedrückt, bis die Platte auf dem Plateau der Teflonform aufsetzte und der obere Anteil des Stiffes mit der Acrylglasplatte abschloss. Durch diese Maßnahme wurde gewährleistet, dass alle Stifte auf einer einheitlichen Tiefe in den Kunststoffzylindern sitzen (Abb. 4.2 A). Nach dem Aushärten des Zements wurden die Proben beschriftet und für 24 Stunden in destilliertem Wasser gelagert.

4.2.3 Sägen der Proben

Zum Sägen der Stifte wurden jeweils 10 Kunststoffzylinder in Doppelreihe auf einen Plexiglasobjektträger mit Sekundenkleber (Nr. 1733, Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland) befestigt, so dass die Stiftachsen senkrecht zur Klebefläche standen. Über die Trägerplatten konnten die Proben an der

Vakuumsaugvorrichtung des Band-Trennschleifsystems (EXAKT Apparatebau, Norderstedt Deutschland) fixiert werden. Die Ausrichtung des Probenblockes erfolgte über eine am Trenntisch integrierte Mikrometerschraube. Die Sägebänddicke betrug 0,35 mm. Der tatsächliche Schneidverlust lag bei 0,45 mm. Der Probenblock wurde auf einem Schlitten mit einem Gewicht von 50 g in Richtung des Sägebandes bewegt. Die Geschwindigkeit des diamantierten Sägebandes lag bei 300 m/min. Alle Schnitte wurden unter ausreichender Wasserkühlung durchgeführt.

Mit dem ersten Schnitt wurden die oberen 4,5 mm des Stiftes abgetrennt. Danach wurden aus jedem Stift vier 2 mm dicke planparallele Scheiben gewonnen (Abb. 4.2 B). Alle abgetrennten Teile wurden beschriftet und es erfolgte die Messung der Höhe mit einer Mikrometerschraube (Mitutoyo Messgeräte GmbH, Neuss, Deutschland; Messgenauigkeit: 0,001 mm). Anschließend wurden die Proben für weitere 24 Stunden in destilliertem Wasser gelagert.

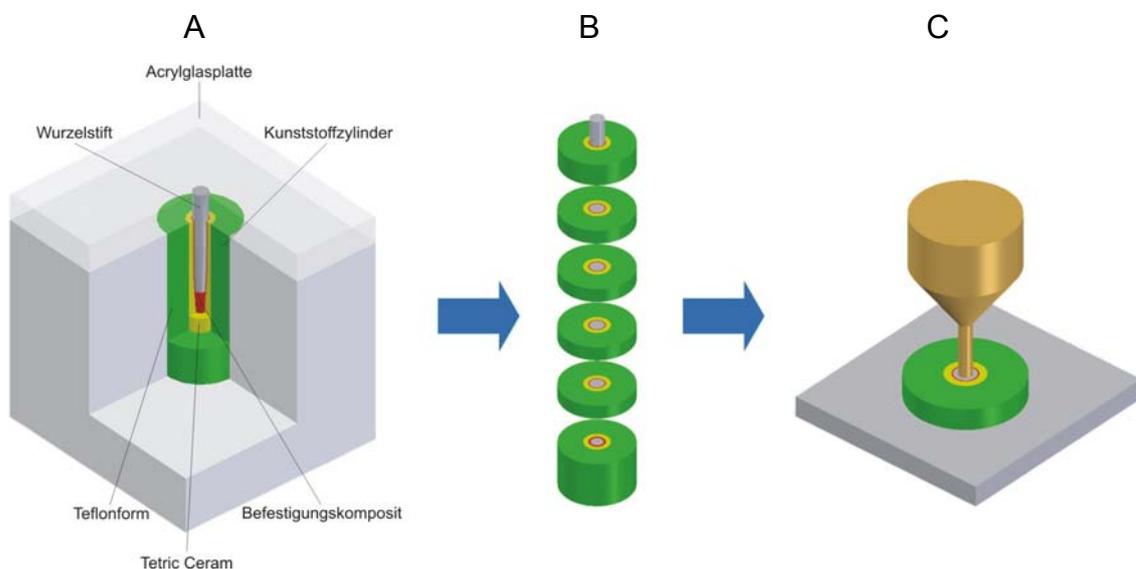


Abb. 4.2: Probenherstellung und Ausstoßversuch

4.2.4 Ausstoßversuche

Der Versuch wurde mit einer computergestützten Zwick-Universalprüfmaschine (Zwick; Roell, Ulm, Deutschland) und einer 2,5 kN Messdose durchgeführt.

Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,5 mm pro Minute (Abb. 4.2 C). Die Stiftanteile wurden senkrecht zu ihrer Stiftachse und entgegen ihrer Setzrichtung aus den Kunststoffscheiben herausgestoßen. Unter Beachtung des konischen Anteils des FRC-Postec-Wurzelstiftes wurden drei verschiedene Prüfstempelgrößen, sowie drei verschieden große Ausstoßöffnungen verwendet. Für die beiden oberen Scheiben wurden ein Stempeldurchmesser von 1,6 mm und ein Lochdurchmesser von 2,5 mm verwendet. Der Ausstoß der dritten Scheibe erfolgte mit einem Stempeldurchmesser von 1,2 mm und einem Öffnungsdurchmesser von 2,0 mm. Für die vierte Scheibe betrug die Stempelgröße 0,8 mm und die Größe der Öffnung 1,5 mm. Bei den Cosmopost-Stiften wurden für alle Scheiben ein Stempeldurchmesser von 1,2 mm und ein Lochdurchmesser von 2,0 mm benutzt. Durch diese Maßnahme war der Kunststoffanteil der Proben bei allen Stiftdurchmessern ausreichend auf der Metallplatte abgestützt.

Die Versagenslast wurde bei 10 % Kraftabfall in N gemessen und mit Hilfe der folgenden Formel in MPa umgerechnet:

$$\text{Versagenslast in N} / \text{Haftfläche in mm}^2 = \text{Bruchspannung in MPa}$$

Die für diese Formel benötigte Haftfläche des ausgestoßenen Stiftstückes wurde aus der gemessenen Höhe h der Probe und den gegebenen Stiftmaßen nach folgenden Formeln berechnet:

Koronaler zylindrischer Stiftanteil:

$$\text{Mantelfläche}_{\text{Zylinder}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

Apikaler konischer Stiftanteil:

$$\text{Mantelfläche}_{\text{Kegel}} = \pi \cdot s \cdot (r_1 + r_2)$$

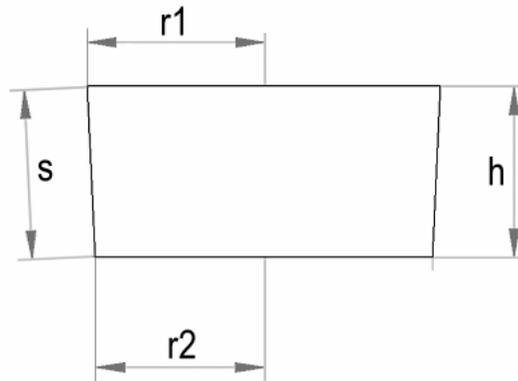


Abb. 4.3: Darstellung eines Stiftsegments und der zur Oberflächenberechnung notwendigen Strecken

4.2.5 Analyse des Versagensmodus

Die Beurteilung des Versagensmodus wurde unter einem Stereomikroskop (Zeiss, Oberkochen, Deutschland) bei einer 40fachen Vergrößerung durchgeführt. Die Analyse erfolgte an nur teilweise ausgestoßenen Proben, da die Stiftstücke bei einem Kraftabfall von 10 % nicht vollständig aus der Kunststoffscheibe herausgestoßen wurden. Die 960 Proben wurden von koronal beurteilt und dabei in zwei verschiedene Versagenstypen eingeteilt: Typ 1 - rein adhäsives Versagen zwischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit, Typ 2 - gemischte kohäsiv/adhäsive Fraktur, bei der die Bruchlinien sowohl zwischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit als auch kohäsiv im, beziehungsweise durch den Befestigungskunststoff verliefen (Abb. 4.4).

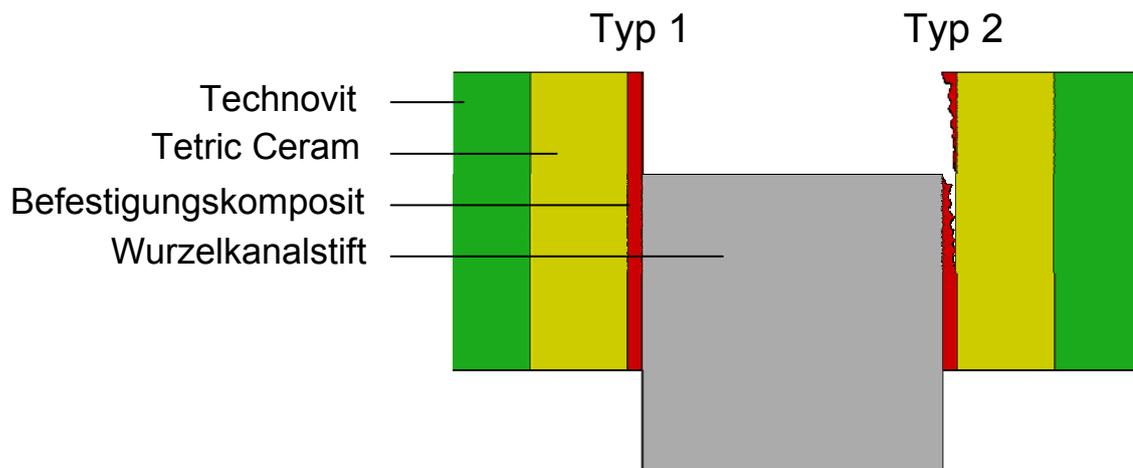


Abb. 4.4: Darstellung der Frakturmodi: Typ1 - rein adhäsiv; Typ 2 - gemischt kohäsiv/adhäsiv

4.2.6 REM-Aufnahme der Wurzelstiftoberflächen

Für die Analyse der einzelnen Oberflächen wurden qualitativ exemplarische rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (Cam Scan Maxim 2040; Cam Scan Maxim Electron Optics LTD, Cambridge, Großbritannien) der beiden Wurzelstifte angefertigt. Zu diesem Zweck wurden von beiden Stiftarten jeweils vor und nach dem Strahlen der Oberfläche mit dem Dento-Prep-Gerät Aufnahmen im Elektronenmikroskop senkrecht im Vakuumverfahren bei 250- bzw. 300-facher Vergrößerung gemacht.

4.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit dem Programm SPSS (Version 12.0 für Windows; SPSS GmbH, München, Deutschland).

Die ermittelten Werte wurden zunächst mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft. Der Einfluss des Materials und der Vorbehandlung auf die Haftung an Keramik und Glasfaserstiften wurde jeweils mit einer 2-Wege-ANOVA mit nachgeschaltetem Post-Hoc-Test (Tukey-B) auf Signifikanz geprüft.

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

Das Signifikanzniveau wurde jeweils auf 5 % festgelegt.

Mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA)

Bei mehrfaktoriellen Varianzanalysen wird der Einfluss mehrerer Faktoren (Befestigungszement und Stiftart) auf eine abhängige Variable (Haftung) überprüft.

Spannweitentest zur Bildung homogener Untergruppen (Post-Hoc-Test, Tukey-B)

Sind Abweichungen zwischen den Mittelwerten festgestellt worden, können diese mit Post-Hoc-Spannweitentests untersucht werden. Dabei steht die Bildung homogener Untergruppen im Vordergrund. Der Tukey-B-Test stuft dabei die Gruppenmittelwerte ein und berechnet den Spannweitenwert.

5 Ergebnisse

5.1 Haftwerte FRC Postec-Wurzelstifte

Die mittlere Haftkraft aller untersuchten Befestigungskunststoffe an der Glasfaserstiftoberfläche lag bei $19,89 \pm 5,63$ MPa. Die Haftung war signifikant von der Art des Komposites ($p < 0,001$), jedoch nicht von der Art der Vorbehandlung abhängig ($p = 0,133$; 2-Wege ANOVA); dennoch ließen sich zwischen diesen beiden Variablen signifikante Interaktionen beobachten ($p = 0,003$). Nach Anwendung des Post-Hoc-Tests erzielten Panavia F und Multilink signifikant höhere Haftwerte an unbehandelten Glasfaserstiften als an Stiften die tribochemisch beschichtet wurden ($p < 0,05$; Tukey-B). PermaFlo DC und RelyX Unicem hafteten hingegen signifikant besser an den mit dem CoJet-System vorbehandelten Stiften ($p < 0,05$; Tukey-B). Bei Variolink und Clearfil Core ließen sich keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Vorbehandlung feststellen ($p > 0,05$; Tukey-B) (Abb. 5.1). Zur Überprüfung der signifikanten Interaktionen wurde für jedes Material einzeln eine 1-Wege ANOVA mit dem Faktor Vorbehandlung durchgeführt (Abb. 5.1)

Tabelle 5.1 zeigt die Haftwerte (Mittelwert \pm Standardabweichung) der Befestigungsmaterialien an den Glasfaserstiften ohne Berücksichtigung der jeweiligen Vorbehandlung. Clearfil Core erzielte höhere Haftwerte ($27,1 \pm 4,09$ MPa) als alle anderen Befestigungskunststoffe, wobei PermaFlo DC ($13,31 \pm 2,51$ MPa) hinter allen getesteten Materialien lag. Die Haftkraft von Panavia F ($23,18 \pm 3,53$ MPa) und RelyX Unicem ($21,90 \pm 3,56$ MPa) war signifikant höher als die von Multilink ($17,22 \pm 2,44$ MPa) und Variolink ($16,61 \pm 3,06$ MPa) ($p < 0,001$).

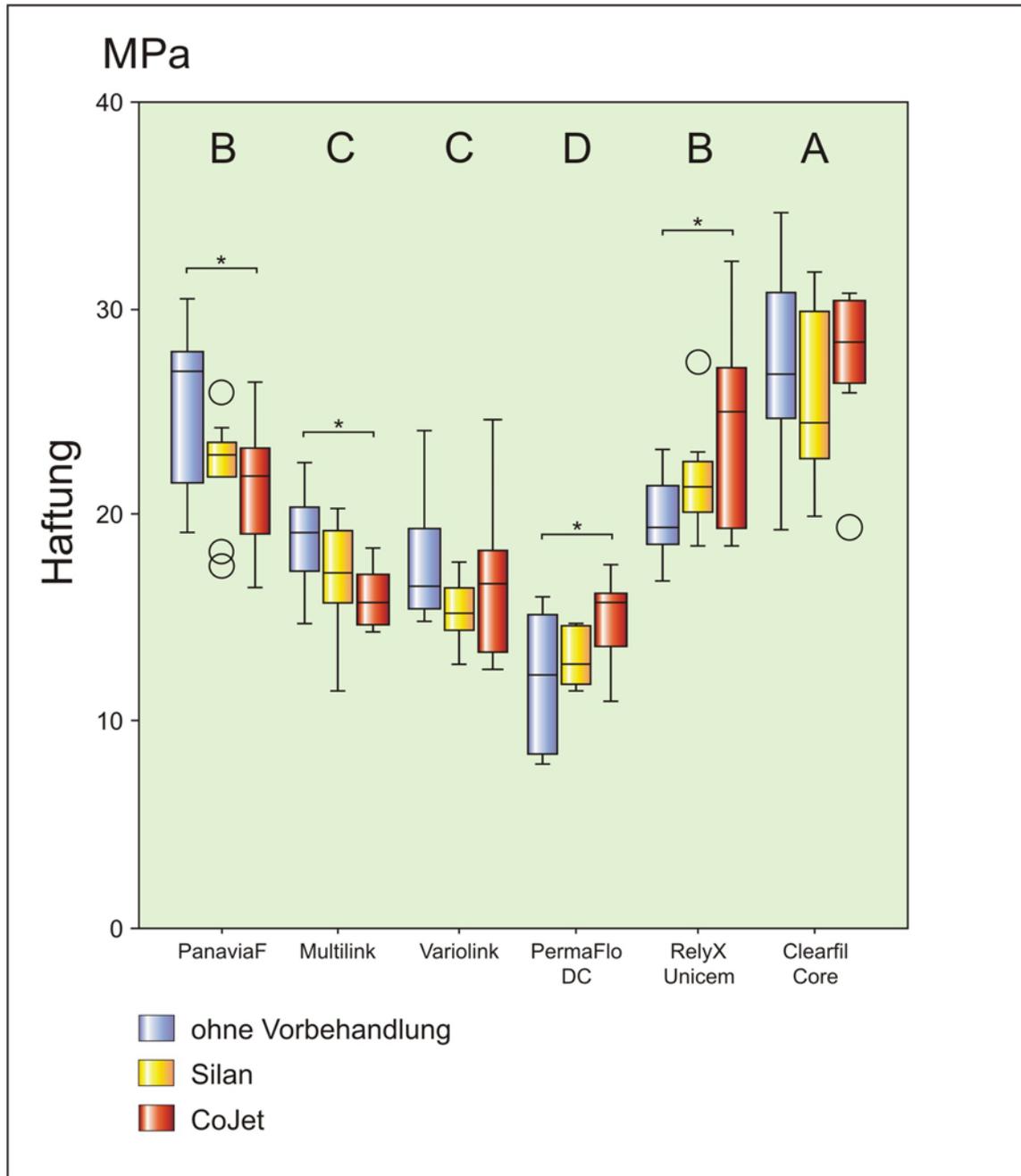


Abb. 5.1: Haftung der getesteten Befestigungskomposite an den Glasfaserstiften unter Berücksichtigung der Vorbehandlung. Dargestellt sind Box-and-whiskers-plots mit den jeweiligen Quartilen und Medianwerten. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Extremwerte sind mit einem Kreis, signifikante Unterschiede zwischen den Vorbehandlungen der einzelnen Materialien sind mit Sternchen gekennzeichnet ($p < 0,05$; Tukey-B)

Tab. 5.1: Haftwerte der Befestigungskomposite ohne Berücksichtigung der Vorbehandlungsmethode (Tukey-B)

| Material | Anzahl N | Mittelwert | Standardabweichung |
|---------------|----------|------------|--------------------|
| PermaFlo DC | 30 | 13,3144 | 2,507 |
| Variolink | 30 | 16,6122 | 3,064 |
| Multilink | 30 | 17,2243 | 2,438 |
| RelyX Unicem | 30 | 21,8965 | 3,559 |
| Panavia F | 30 | 23,1803 | 3,533 |
| Clearfil Core | 30 | 27,0962 | 4,092 |

5.2 Haftwerte CosmoPost-Wurzelstifte

Die Haftkraft an den Keramikstiften war signifikant von dem verwendeten Befestigungskomposit abhängig ($p < 0,001$; 1-Wege ANOVA). Die mittlere Haftkraft der Befestigungskunststoffe an den Zirkoniumdioxidstiften lag bei $15,64 \pm 3,23$ MPa.

Abbildung 5.2 zeigt die Ergebnisse der Ausstoßversuche der tribochemisch beschichteten CosmoPost-Wurzelstifte. Die signifikant niedrigsten Haftwerte von allen Befestigungskunststoffen wurden für Variolink gemessen ($11,03 \pm 1,58$ MPa). Die höchsten Haftwerte erzielte PermaFlo DC ($18,92 \pm 1,79$ MPa), die sich jedoch nicht signifikant von den Haftwerten von RelyX Unicem ($16,69 \pm 2,15$ MPa) und Panavia F ($16,63 \pm 2,78$ MPa) unterschieden. Die Haftwerte für Clearfil Core ($15,91 \pm 3,08$ MPa) und Multilink ($14,70 \pm 1,45$ MPa) waren niedriger als die Haftwerte für RelyX Unicem und Panavia F, wobei der Unterschied nicht signifikant war ($p < 0,05$; Tukey-B).

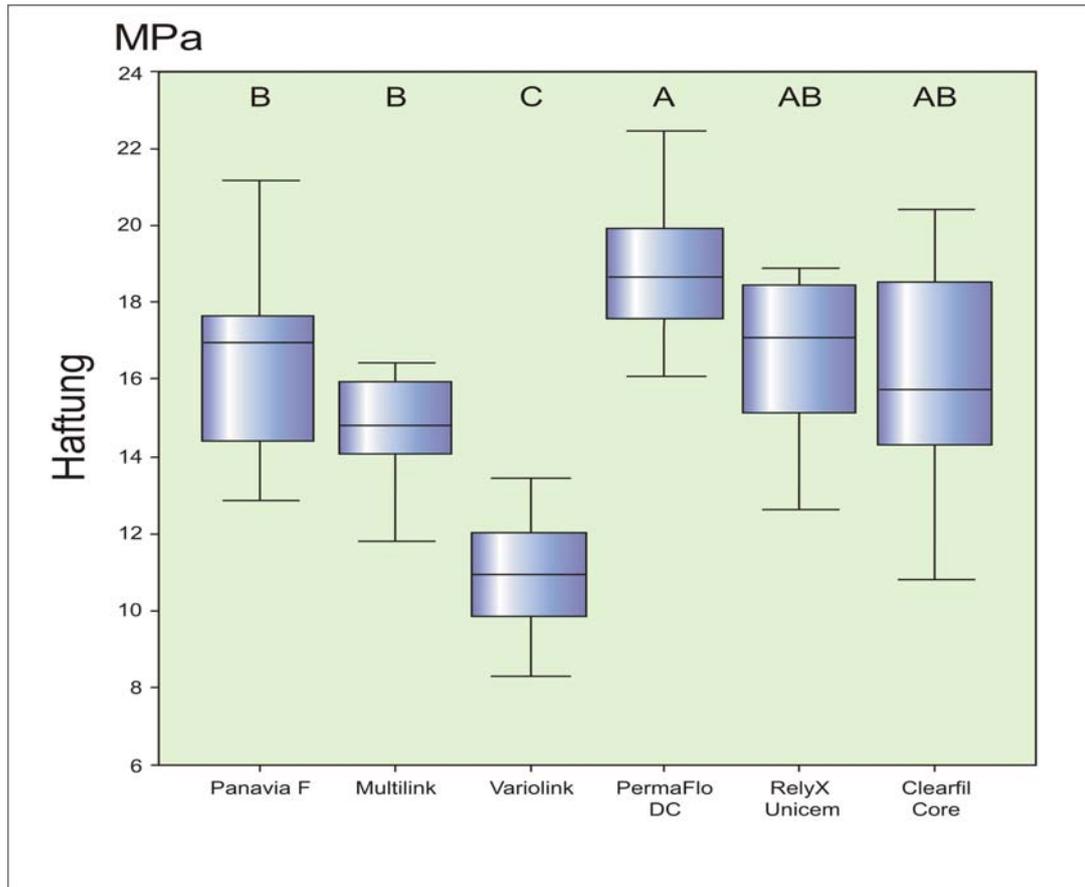


Abb. 5.2: Haftwerte der Befestigungskomposite an den CosmoPost-Wurzelstiften. Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien wurden mit Buchstaben gekennzeichnet

5.3 Vergleich Keramik- und Glasfaserstifte

Verglichen wurden die Haftwerte der sechs verschiedenen Befestigungskomposite an Glasfaserstiften und Keramikstiften, die mit dem CoJet-System vorbehandelt wurden. Die Durchführung einer multifaktoriellen Varianzanalyse (2-Wege ANOVA) mit der abhängigen Variable Haftung ergab, dass diese sowohl von der Einflussgröße Stifart ($p < 0,001$), als auch vom Befestigungsmaterial ($p < 0,001$) beeinflusst wurde. Zusätzlich ließen sich zwischen diesen beiden Variablen statistisch signifikante Interaktionen beobachten. Nach Anwendung einer 1-Wege ANOVA zeigte PermaFlo DC signifikant höhere Haftwerte an den Zirkoniumdioxidstiften als an den Glasfaserstiften. Bei Multilink konnten keine signifikanten Unterschiede

zwischen den beiden Stiften beobachtet werden. Alle anderen Befestigungsmaterialien zeigte eine signifikant bessere Haftung an den FRC Postec-Postec-Wurzelstiften (Abb. 5.3)

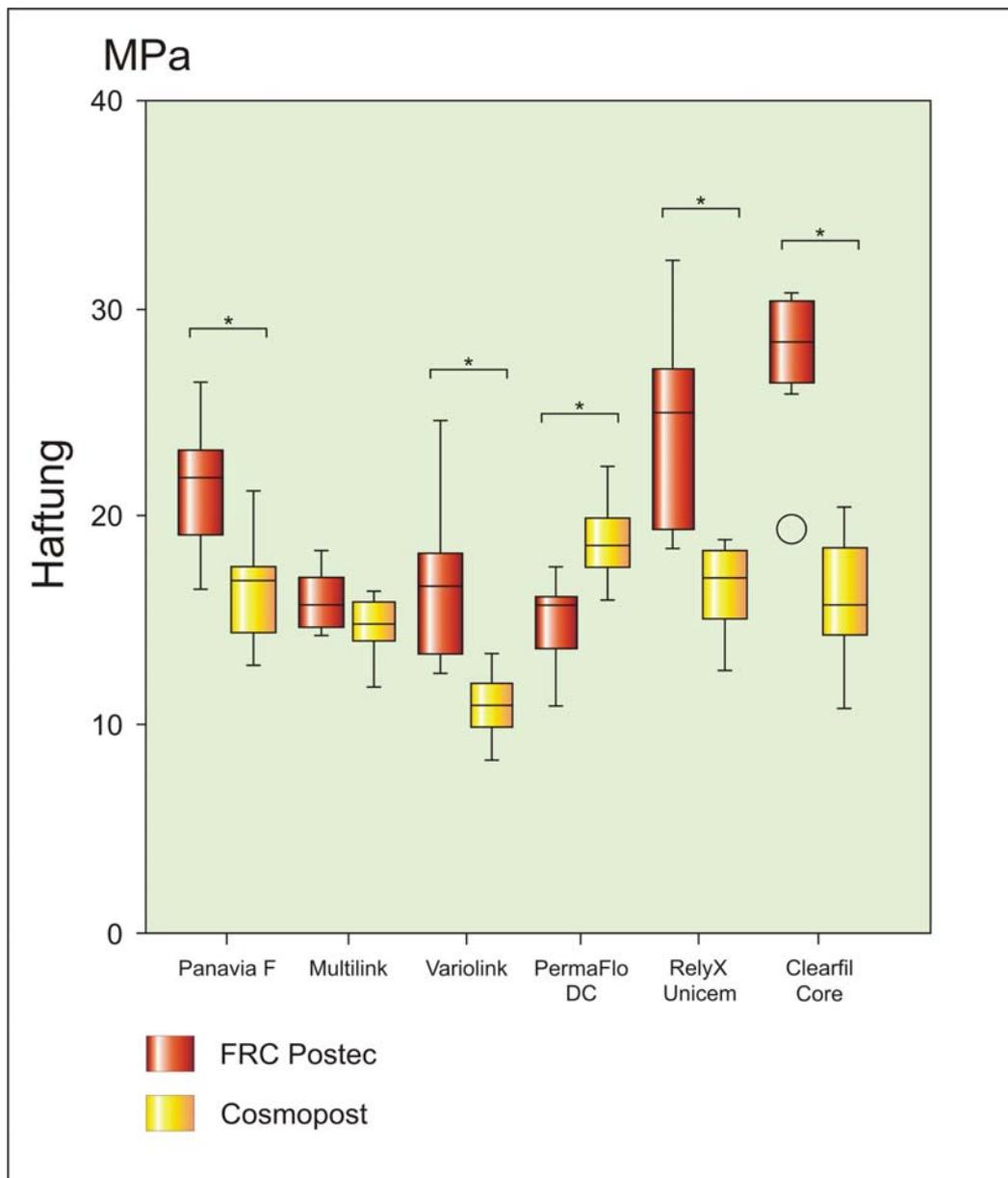


Abb. 5.3: Darstellung der Haftwerte an Glasfaser- (FRC Postec) und an Zirkoniumdioxidstiften (Cosmopost). Deutlich zu erkennen sind die höheren Haftwerte bei den Glasfaserstiften. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Stifftypen wurden mit einem Sternchen gekennzeichnet ($p < 0,001$; 1- Wege ANOVA).

5.4 Versagensmodusanalyse

Die Analyse der Versagensmodi zeigte über alle 960 Proben die beiden oben bereits beschriebenen Varianten: Typ 1 - rein adhäsives Versagen zwischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit, Typ 2 – gemischte kohäsiv/adhäsive Fraktur, bei der die Bruchlinien sowohl zwischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit als auch kohäsiv durch den Befestigungskunststoff verliefen. Die Ergebnisse mit prozentualer Verteilung und Anzahl der Proben, die nach dem jeweiligen Modus versagt haben, sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Auffällig war, dass der Versagenstyp 1 insgesamt am häufigsten auftrat.

Tab. 5.2: Prozentuale Verteilung der beiden Frakturtypen für die untersuchten Gruppen

| Stiftart | Vorbe- handlung | Bruch- verhalten | Befestigungskomposit | | | | | |
|---------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------|-----------|----------------|-----------------|------------------|
| | | | Panavia F | Multilink | Variolink | PermaFlo DC | RelyX Unicem | Clearfil Core |
| FRC Postec | Alkohol | Adhäsiv | 97,5% | 50% | 90% | 85% | 100% | 95% |
| | | Kohäsiv | 2,5% | 50% | 10% | 15% | 0% | 5% |
| FRC Postec | Silan | Adhäsiv | 87,5% | 20% | 75% | 82,5% | 100% | 82,5% |
| | | Kohäsiv | 12,5% | 80% | 25% | 17,5% | 0% | 17,5% |
| FRC Postec | Cojet | Adhäsiv | 82,5% | 10% | 75% | 55% | 100% | 82,5% |
| | | Kohäsiv | 17,5% | 90% | 25% | 45% | 0% | 17,5% |
| Cosmo Post | Cojet | Adhäsiv | 95% | 100% | 95% | 100% | 100% | 92,5% |
| | | Kohäsiv | 5% | 0% | 5% | 0% | 0% | 7,5% |

Panavia F

Im Vergleich zur Kontrollgruppe, welche zu 97,5 % adhäsiv (Typ 1) und zu 2,5 % kohäsiv/adhäsiv (Typ 2) versagte, ließ sich bei den vorbehandelten Glasfaserstiften eine Zunahme der gemischten Brüche beobachten. In der Silan-Gruppe trat zu 12,5 % der gemischte Frakturtyp (Typ 2) auf und in der CoJet-Gruppe zu 17,5 % (Typ 2). In der CosmoPost-Gruppe kam es ähnlich wie in der Kontrollgruppe in 95 % der Fälle zu Adhäsivbrüchen (Typ 1).

Multilink

In dieser Gruppe wies die Kontrollgruppe ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Typ 1 und Typ 2 auf (50 % adhäsiv zu 50 % gemischt). In der Silan-Gruppe war eine Zunahme des Versagenstyp 2 zu beobachten (20 % adhäsiv, 80 % gemischt), die sich in der Cojet-Gruppe weiter fortsetzte (10 % adhäsiv, 90 % gemischt). In der CosmoPost-Gruppe traten keine Mischfrakturen auf (100 % adhäsiv).

Variolink II

In der Kontrollgruppe trat zu 90 % der adhäsive (Typ 1) und zu 10 % der gemischte (Typ 2) Frakturtyp auf. Die Silan- und die CoJet-Gruppe zeigten beide, mit 75 % Versagenstyp 1 und mit 25 % Versagenstyp 2, die gleiche Verteilung. Bei den Keramikstiften waren 95 % der Frakturen rein adhäsiv (Typ 1) und 5 % gemischt (Typ 2).

PermaFlo DC

Die Kontrollgruppe (85 % Typ 1; 15 % Typ 2) und die Silan-Gruppe (82,5 % Typ1; 17,5 % Typ 2) wiesen ähnliche Bruchverteilungen auf. In der CoJet-Gruppe war ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Typ 1 und Typ 2 zu beobachten (55 % adhäsiv; 45 % gemischt). Die Keramikstift-Gruppe versagte zu 100 % adhäsiv (Typ 1).

RelyX Unicem

Alle Proben versagten rein adhäsiv (100 % Typ 1; 0 % Typ 2).

Clearfil Core

In der Kontrollgruppe trat überwiegend ein adhäsives Versagen auf (95 % Typ 1; 5 % Typ 2). In der Silan- und in der CoJet-Gruppe war mit 82,5 % Typ 1 und 17,5 % Typ 2 eine leichte Zunahme der Adhäsivfrakturen zu beobachten. Die CosmoPost-Gruppe zeigte mit 92,5 % Typ 1 und 7,5 % Typ 2 ein überwiegend adhäsives Versagen.

5.5 REM-Aufnahmen der Wurzelsitftoberflächen

Die rasterelektronischen Aufnahmen zeigen für beide Stiftsysteme deutlich die veränderte Oberflächenstruktur nach Vorbehandlung mit dem CoJet-System (Abb. 5.4 und Abb. 5.5).

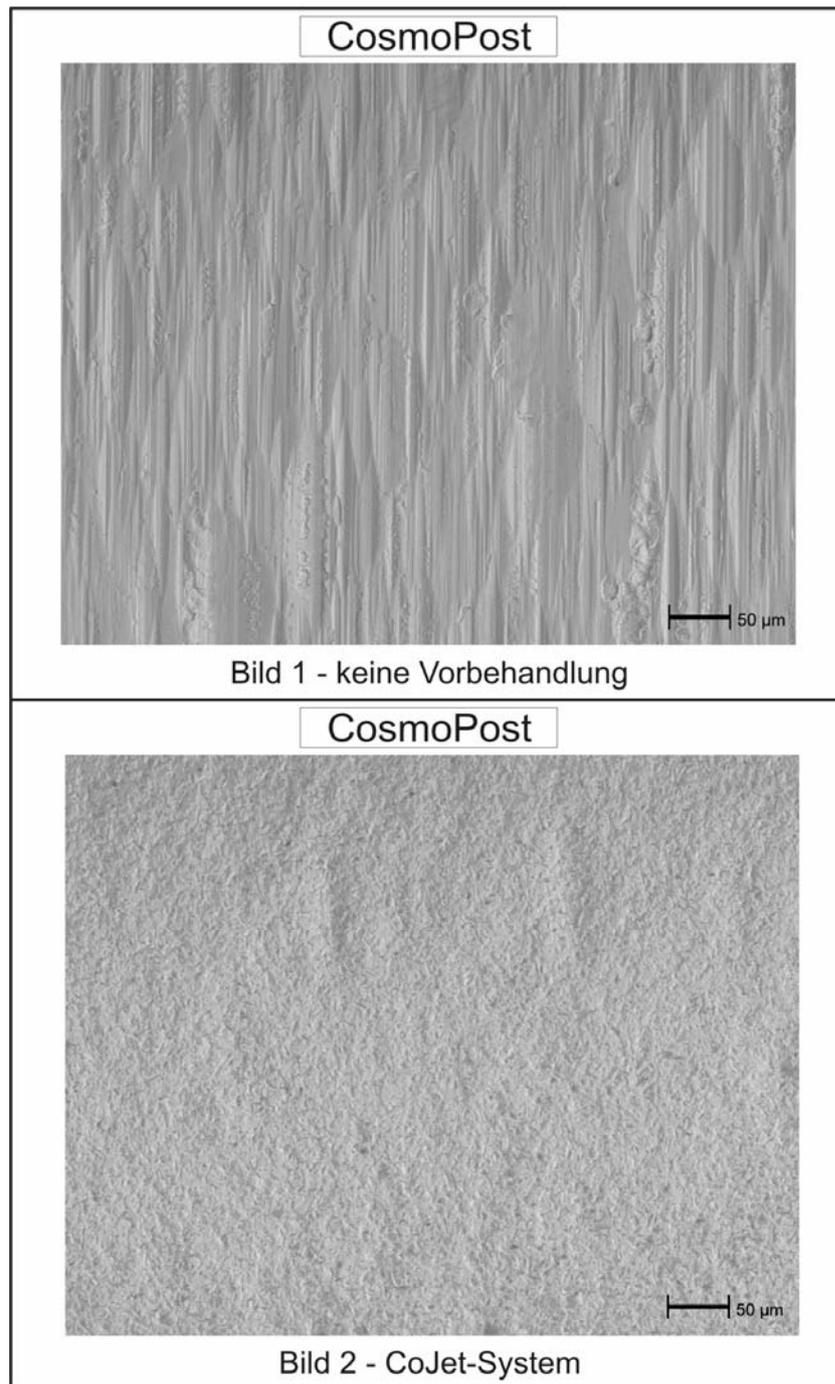


Abb. 5.4: REM Aufnahme der Oberfläche des CosmoPost–Wurzelstiftes (Vergrößerung x 200) vor und nach Vorbehandlung mit dem CoJet-System. Deutlich erkennbar ist die mikroretentive Oberfläche nach Abstrahlen der Stiftoberfläche mit Siliziumdioxid modifizierten Aluminiumoxidpartikeln (Bild 2).

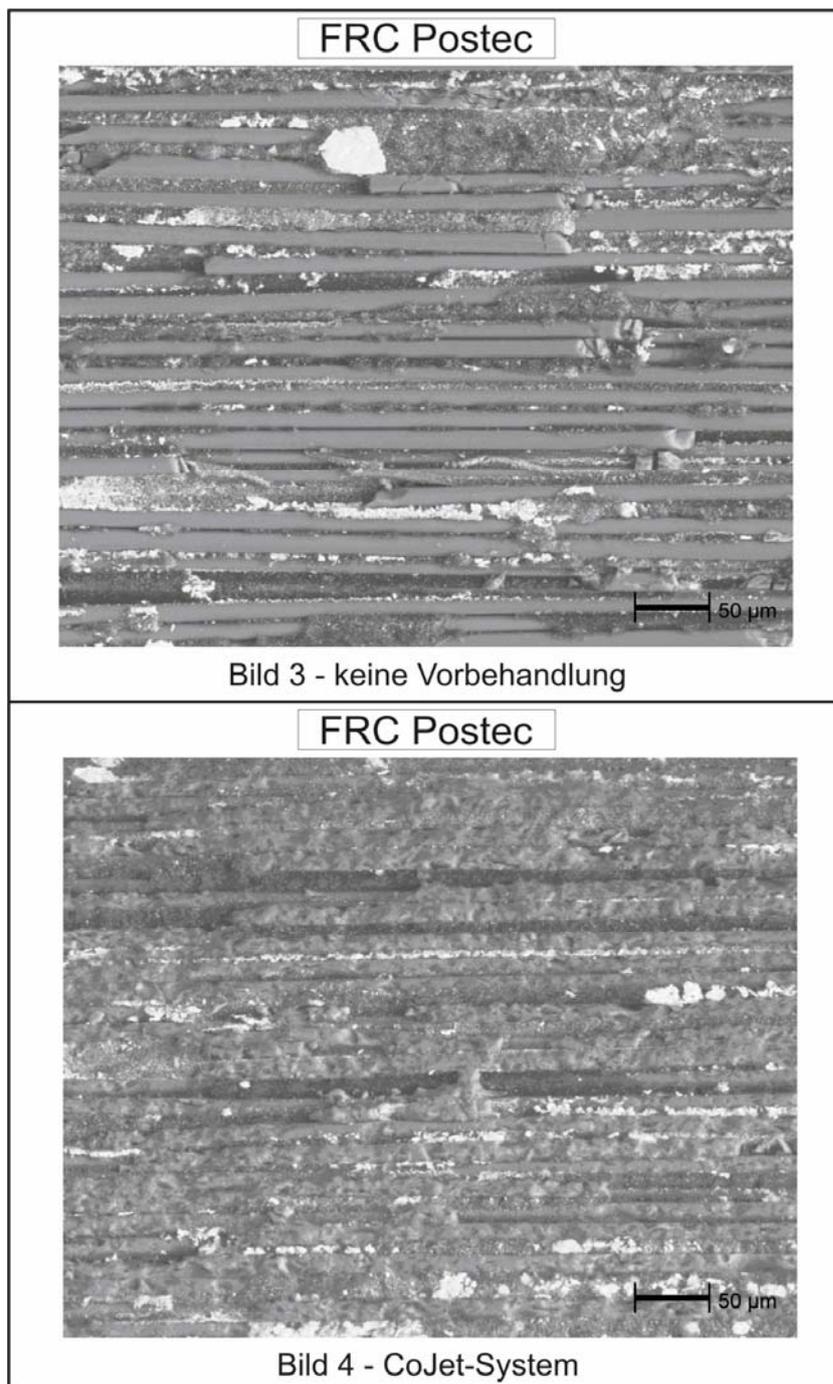


Abb. 5.5: REM Aufnahme der Oberfläche des FRC Postec–Wurzelstiftes (Vergrößerung x 250) vor und nach Vorbehandlung mit dem CoJet-System. Nach der Bestrahlung ist eine Beschädigung der Glasfasern zu erkennen (Bild 4).

6 Diskussion

6.1 Diskussion von Material und Methode

In der vorliegenden Studie sollte die Haftung von sechs verschiedenen Befestigungskompositen an Glasfaserstiften mit der an Zirkoniumdioxidstiften verglichen werden. Darüber hinaus bestand die Intention, eine klinisch relevante Möglichkeit aufzuzeigen, die zu einer Verbesserung der Haftwerte an Glasfaserstiften führt. Dies sollte durch verschiedene Vorbehandlungsmaßnahmen in Form einer tribochemischen Beschichtung (CoJet-System) und der Oberflächenbehandlung mit einem Silan erreicht werden.

Die Ermittlung der Haftwerte erfolgte durch einen Ausstoßversuch, welcher neben dem axialen Zugversuch und Mikrozugfestigkeitsversuch ein häufig angewendetes Testverfahren zur Haftfestigkeitsprüfung von Wurzelkanalstiften darstellt (Goracci et al. 2004).

6.1.1 Zahnfarbene Wurzelkanalstifte

Für die vorliegenden Versuche wurden mit dem FRC Postec und dem CosmoPost Stiftsysteme ausgewählt, die sich sowohl in Laboruntersuchungen als auch in klinischen Studien bewährt haben (Edelhoff et al. 2000; Ferrari et al. 2000; Perdigao et al. 2001).

6.1.2 Vorbehandlungsmaßnahmen der Wurzelstifte

6.1.2.1 Silanisierung

Die Wahl der Vorbehandlung der Wurzelkanalstifte mit einem Silan wurde aufgrund ihrer Eigenschaft, einen chemischen Verbund zwischen einer anorganischen Oberfläche und einer organischen Matrix herzustellen, vorgenommen (Matinlinna et al. 2004).

Die in dieser Studie verwendeten Glasfaserstifte bestehen zu einem großen Teil aus Glasfasern, welche eine chemische Bindung zu 3-Methacryloyloxypropyltrimethoxysilan (MPS) eingehen können (Solnit 1991). In der REM-Aufnahme sieht man deutlich die exponierten Glasfasern an der Stiftoberfläche des FRC Postec (Abb. 5.5; Bild 3). Dieses bildet die theoretische Grundlage für einen möglicherweise positiven Einfluss auf den Haftverbund.

6.1.2.2 Espe CoJet-System

Die Vorbehandlung mit dem CoJet-System, welches für die Chairside-Reparatur defekter Komposit-, Keramik- oder Metallrestorationen entwickelt wurde, stellt abhängig vom vorbehandelten Material eine wissenschaftlich anerkannte Technik dar (Brosh et al. 1997).

Die CosmoPost-Stifte wurden mit dem CoJet-System konditioniert (Abb. 5.4), da sich die tribochemische Beschichtung von Zirkoniumdioxidkeramik in vorhergehenden Studien als effektivste Vorbehandlungsmethode herausstellte (Atsu et al. 2006; Bottino et al. 2005; Valandro et al. 2005)

Die Vorbehandlung der Glasfaserstifte mit dem CoJet-System könnte durch eine Vergrößerung der Oberfläche und Ausbildung einer Siliziumdioxidschicht ebenfalls zu einer verbesserten Haftung führen. Daher wurde dieses Verfahren ausgewählt.

6.1.3 Auswahl der Befestigungsmaterialien

Bei den sechs Befestigungskompositen wurden zwei verschiedene Polymerisationstypen ausgewählt (dual- und chemisch härtend), welche mit dem vom Hersteller empfohlenen Adhäsivsystem verwendet wurden. Drei der Befestigungskomposite hatten eine konventionelle Methacrylbasis (Multilink, Variolink, PermaFlo), die anderen drei enthielten zusätzlich funktionelle Monomere in Form von 10-MDP oder mehrfach funktionellen phosphorsäuren Methacrylaten (Panavia F, Clearfil Core, RelyX Unicem). Zwei der Befestigungskomposite stammen vom gleichen Hersteller wie die Wurzelstifte

(Multilink, Variolink) und werden zum adhäsiven Befestigen dieser Stifte empfohlen.

6.2 Testverfahren

Bis heute gibt es keine Vereinbarung über ein standardisiertes Versuchsdesign zur Testung des Haftverbundes von Wurzelkanalstiften. Zudem lässt keine bisher entwickelte Prüfmethode eine direkte Vorhersage über den klinischen Erfolg eines Materials zu. *In vitro* durchgeführte Belastungsmessungen zeigen lediglich eine Tendenz bei der präklinischen Beurteilung neuer Materialien auf. Zur Übertragung auf die *In-vivo*-Verhältnisse sind nur Analogieschlüsse möglich, wobei Werte für ein Material mit langjähriger klinischer Bewährung als Bezugspunkte dienen. *In-vitro*-Studien ersetzen randomisierte klinische Langzeituntersuchungen nicht (Morgano et al. 1999). Auf Grundlage der *In-vitro*-Ergebnisse ist zu entscheiden, ob eine klinische Prüfung zu rechtfertigen ist und somit ein klinischer Nutzen für den Patienten wahrscheinlich ist (DeLong et al. 1983).

6.2.1 Ausstoßversuch

In Untersuchungen zur Haftung von Wurzelkanalstiften kommen momentan sowohl Ausstoßversuche (Boschian Pest et al. 2002; Gallo et al. 2002) als auch Auszugversuche (Drummond 2000; Purton et al. 1996) und Mikrozugfestigkeitsversuche (Bouillaguet et al. 2003; Goracci et al. 2004) zum Einsatz. Bei allen drei Verfahren handelt es sich um zerstörende Messmethoden. Das in dieser Studie verwendete Testdesign war ein Ausstoßversuch. Hierbei kommt es zu einer Scherbelastung entlang der Grenzfläche zwischen Stift und Befestigungskomposit (Van Meerbeek et al. 2003), welche den klinischen auftretenden Kräften ähnlich ist (Sudsangiam et al. 1999).

Der Ausstoßversuch gilt als bewährtes Verfahren zur Untersuchung des Knochen-Implantatverbundes (Soltész et al. 1990), dessen Prinzip sich auch bei der Bestimmung der Komposit-Dentinhaftung anwenden lässt (Haller et al. 1991). Die Spannungsverteilung in der Komposit-Dentin-Grenzfläche ist dabei

homogener als bei herkömmlichen Zug- und Scherversuchen (Van Noort et al. 1989); Biegemomente und Kerbspannungen werden weitgehend vermieden. Besonders vorteilhaft ist die konische Modifikation des Versuchsdesigns, da in diesem Fall die Gefahr der Verfälschung der Ergebnisse durch Reibungs- und Verkeilungseffekte zusätzlich eingeschränkt wird (Frankenberger et al. 1997). Die im Vergleich zu anderen Testverfahren um den Faktor 3-8 höheren Messwerte werden zum Teil auf die Eliminierung von Biegemomenten und Kerbspannungen zurückgeführt (Haller 1993). Ein weiterer Vorteil des Ausstoßverfahrens ist, dass aus einem Stift mehrere Proben gewonnen werden können. Durch Nutzung der Vorteile der beiden anderen Verfahren, wird der Ausstoßversuch als genaue und zuverlässige Technik zur Messung der Verbundfestigkeit von Faserstiften zu Wurzelkanalentin beschrieben (Goracci et al. 2004).

Als Nachteile sind beim Ausstoßversuch die schwierige Ausrichtung von Probe, Stempel und Ausstoßring und die im Vergleich zu Abscher- und Auszugversuchen aufwendigere Probenherstellung zu nennen (Drummond et al. 1996). Darüber hinaus hängt der Spannungsverlauf beim Ausstoßversuch stark von der Positionierung des Stahlstempels ab (Drummond et al. 1996). Es ist sehr unwahrscheinlich, dass der Stempel bei jeder Probe in der exakt gleichen Position zum Befestigungskomposit platziert werden kann, wodurch extraaxiale Druckspannungen entstehen, die zu Messungenauigkeiten führen können.

6.3 Versuchsbedingungen

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Haftfestigkeit verschiedener Befestigungskomposite an zahnfarbenen Wurzelkanalstiften im Ausstoßversuch ermittelt. Die durchgeführten Versuche an standardisierten künstlichen Wurzelkanälen aus Kunststoff gewährleisteten die selektive Betrachtung des Stift-Komposit-Verbundes. Durch die Ausbildung einer Sauerstoffinhibitionsschicht auf der Oberfläche des Stiftschachtes konnte zwischen Befestigungskomposit und künstlichem Stiftschacht eine Verbundfestigkeit erwartet werden, welche sowohl die des Wurzelentin-

Komposit-Verbundes, als auch die des Stift-Komposit-Verbundes übersteigt. Darüber hinaus konnten durch diesen Versuchsaufbau Polymerisationsspannungen simuliert werden, wie sie unter klinischen Bedingungen auftreten (Frankenberger et al. 1999). Trotz Durchführung der Versuche durch einen Behandler unter standardisierten Bedingungen können gewisse Ungenauigkeiten nicht ausgeschlossen werden.

Diese entstehen zum einen durch die manuelle Herstellung der Proben als auch durch die Anwendung der adhäsiven Befestigungssysteme, welche in einem sehr engen Zeitfenster verarbeitet werden müssen und meist mehrere aufeinander folgende Arbeitsschritte beinhalten (Haller et al. 2003; Schwartz & Robbins 2004; Stockton 1999).

Die Realisierung rein axial gerichteter Kräfte auf den Probenkörper ist eine wichtige Voraussetzung zur Erzielung reproduzierbarer Ergebnisse. Während im axialen Ausstoßversuch die durch den Stempel einwirkende Kraft gleichmäßig auf die Verbundfläche einwirkt, kommt es durch nicht axiale Kräfte zu einem ungleichmäßigen Belastungsmuster in der Verbundzone (Habenicht 1990). Durch das für diese Studie entwickelte Einbett- und Sägeverfahren konnte eine rein axiale Belastung der Proben gewährleistet werden. Zusätzlich wurden die Ausstoßversuche an 2 mm dicken Stiftstücken durchgeführt, da in Ausstoßversuchen mit ganzen Stiften oder sehr dicken Teilstücken hohe ungleichmäßige Spannungen an der Verbundfläche auftraten (Gallo et al. 2002; Ngoh et al. 2001; Patierno et al. 1996; Sudsangiam & van Noort 1999). Die Stärke der Proben wurde nicht noch dünner gewählt, um die Stiftintegrität während des Belastungsvorgangs zu wahren.

Um Spannungsspitzen am Rand der Auflageöffnung zu vermeiden, wurde das Loch der Auflageplatte so gewählt, dass es nicht exakt mit der Zementfuge abschloss, sondern etwas überdimensioniert war (Dhert et al. 1992). Zusätzlich wurde der Rand der Auflageöffnung abgerundet.

Bei der Untersuchung der Haftung von Wurzelkanalstiften mit Hilfe des Ausstoßversuchs ist die auf die Verbundfläche einwirkende Kraft abhängig vom untersuchten Stiftdesign. Dies muss beim Vergleich der Haftung von Wurzelkanalstiften mit unterschiedlichem Konuswinkel berücksichtigt werden. Der direkte Vergleich der Haftkräfte verschiedener Befestigungssysteme ist

daher nur beim Vergleich von Wurzelstiften mit identischen Konuswinkeln möglich. Diese Tatsache muss beim direkten Vergleich der in dieser Studie ermittelten Werte für FRC Postec (koronal: 0°; apikal: 5,3°) mit CosmoPost (koronal: 0°; apikal: 6°) sowie bei Vergleichen mit Ausstoßversuchen anderer Autoren berücksichtigt werden.

Die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit erfolgte aufgrund von Ergebnissen aus Studien, die den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit bei Zug- (Oshida et al. 1996) und Scherversuchen untersuchten (Hara et al. 2001). In beiden Studien wirkte sich eine Vorschub- bzw. Abzugsgeschwindigkeit von mehr als 1 mm/min, infolge kritischer Überbelastung der Adhäsivsysteme negativ auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus. In Anlehnung an vergleichbare Studien wurde daher eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 mm pro Minute gewählt.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

6.4.1 Einfluss der Vorbehandlungsmaßnahmen

Die in dieser Studie untersuchten Vorbehandlungsmaßnahmen hatten, abhängig von der Art des Befestigungskomposit, nur geringen Einfluss auf die Haftung an den Glasfaserstiften. Dieses Ergebnis stimmt mit anderen Studien überein (Sahafi et al. 2004).

Das Ziel der Silanisierung der Glasfaserstifte war, eine chemische Bindung zu den Glasfasern und den exponierten Füllerpartikeln an der Stiftoberfläche auszubilden. Darüber hinaus sollte die Benetzbarkeit der Stifte verbessert werden. Für Glaskeramiken konnte auf diese Weise der Verbund zu Kunststoffen um 25 % verbessert werden (Eames et al. 1977). Bisher existieren nur wenige Studien, die den Einfluss der Silanisierung von Glasfaserstiften auf den Haftverbund zu Befestigungskompositen untersucht haben. In einer Studie, die den Haftverbund mit Hilfe von Mikrozugfestigkeitsversuchen untersuchte, konnte eine Verbesserung der Haftwerte an Glas- und Quarzfaserstiften nach Silanapplikation nachgewiesen werden (Aksornmuang et al. 2004). Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, in der nach Silanisierung der Glasfaserstifte keine gesteigerten Haftwerte gemessen werden konnten.

Eine andere Mikrozugfestigkeitsstudie konnte ebenfalls eine signifikante Steigerung der Haftkraft nach Silanisierung der Stiftoberfläche nachweisen (Goracci et al. 2005). In der Studie wurde Monobond S als Silanlösung zur Vermittlung eines verbesserten Verbundes zweier Stumpfaufbaumaterialien (Tetric Flow (Ivoclar Vivadent); UnifilFlow (GC, Tokyo, Japan)) zu DT Lightpost- und FRC Postec-Wurzelkanalstiften getestet. Als mögliche Erklärung ihrer Ergebnisse führen die Autoren die durch die Silanisierung herabgesetzte Oberflächenaktivität und die damit verbundene bessere Benetzbarkeit der Oberfläche an. Beim Vergleich mit anderen Arbeiten muss berücksichtigt werden, dass Goracci et al. (Goracci et al. 2005) die Stifte nicht in Wurzelkanäle setzten, sondern das jeweilige Aufbaumaterial drucklos auf den Stift auftrugen. Darüber hinaus wurde das Silan bei der Vorbehandlung der Stiftoberfläche nicht mit einem Adhäsivsystem kombiniert. Die bessere Fließfähigkeit der Adhäsive und die daraus resultierende bessere Benetzbarkeit, sowie der beim Setzen von Wurzelkanalstiften entstehende Druck, könnten eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse sein.

Im Gegensatz dazu stellten Sahafi et al. (Sahafi et al. 2003) fest, dass Silane den Haftverbund zwischen ParaPost Befestigungskomposit (PP, Coltène/Whaledent) und ParaPost Fiber White Wurzelstiften (PP, Coltène/Whaledent) nicht verbessern konnten. Die Autoren führen die Ineffizienz der Silane in diesem Fall auf einen nur sehr schwachen oder ausbleibenden Verbund der funktionellen Gruppen des Silans (Silanolgruppen) zur Kunststoffbasis der Stifte zurück, da diese an der Oberfläche kaum Silizium enthält.

Eine weitere Studie, die die Wirkung von Silanen auf den Haftverbund zu Glasfaserstiften anhand von Ausstoßversuchen untersuchte, konnte ebenfalls keinen Effekt der Silanisierung feststellen (Perdigao et al. 2006). In der Studie wurde Monobond S als Silanlösung mit drei verschiedenen Stiftsystemen kombiniert [ParaPost Fiber White; FRC Postec; D.T. Light Post (DT, Bisco)].

In den vorliegenden Versuchen konnten, obwohl in REM-Aufnahmen deutlich freiliegende Glasfasern auf der Stiftoberfläche zu sehen waren, keine erhöhten Haftwerte nach Silanisierung gemessen werden. Möglicherweise konnte die mikromechanische Verbindung, die zwischen der Stiftoberfläche und der

Mischung aus Adhäsiv und Befestigungskomposit ausgebildet wurde, nicht durch zusätzliche chemische Adhäsion verbessert werden. Darüber hinaus kann spekuliert werden, dass nach der Reinigung der Stifte mit Alkohol und Vorbehandlung mit einem Adhäsiv keine zusätzliche Herabsetzung der Oberflächenspannung durch Silanisierung erreicht werden konnte.

Ein weiterer Faktor, der einen Einfluss auf die Messung der Haftkräfte haben könnte, ist der Stempeldruck der beim Setzen der Wurzelkanalstifte erzeugt wird. Besonders beim Vergleich der Haftung von Befestigungskompositen an Wurzelkanalstiften mit der von Aufbaumaterialien könnte dies eine Rolle spielen. Durch den erhöhten Druck bei der Befestigung der Wurzelkanalstifte wird das Befestigungskomposit stärker in die Mikrorauhigkeiten der Stiftoberfläche gepresst, so dass eine verbesserte Benetzung der Oberfläche erfolgt.

Für die Vorbehandlung der Glasfaserstifte mit dem CoJet-System konnte insgesamt keine Steigerung der Haftkräfte beobachtet werden. Lediglich bei der separaten Betrachtung der einzelnen Befestigungskomposite konnten nach tribochemischer Beschichtung erhöhte Haftwerte für RelyX Unicem und PermaFlo DC gemessen werden. Auf der anderen Seite lassen sich bei der Beobachtung der Stiftoberfläche im Rasterelektronenmikroskop nach Abstrahlen mit dem CoJet-System zerstörte Glasfasern erkennen. Dies könnte möglicherweise eine Schwächung des Stiftes zur Folge haben, weshalb sich die Vorbehandlung mit dem CoJet-System trotz teilweise erhöhter Haftwerte nachteilig auf die Stiftstabilität auswirken könnte.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit konnten zwei andere Studien (Sahafi et al. 2003; Schönbrodt et al. 2003) erhöhte Haftwerte nach Vorbehandlung der Stiftoberfläche sowohl nach Abstrahlen mit dem CoJet-System als auch mit einem Sandstrahlgerät messen. Die Diskrepanz dieser Ergebnisse zu denen der vorliegenden Untersuchung lässt sich möglicherweise durch die unterschiedlichen Testmethoden und Stiftsysteme erklären. In den beiden anderen Studien wurden die Stifte am Dentin befestigt. In der Studie von Schönbrodt et al. (Schönbrodt et al. 2003) wurden DentinPost-Wurzelkanalstifte (Brasseler, Lemgo) verwendet. Die Stiftoberfläche der Kontrollgruppe wurde für 20 Sekunden mit Orthophosphorsäure

konditioniert. Die CoJet-Gruppe wurde mit Hilfe des Dento-Prep-Gerät mit CoJet Sand bei 2,5 bar und 2 cm Abstand für 10 s abgestrahlt. Die Stifte wurden nach der Insertion mit Panavia F und Compolute (3M ESPE, Seefeld) in frisch extrahierte Frontzähne mittels eines Auszugversuches aus der Zahnwurzel gezogen.

In der Studie von Sahafi et al. wurden ParaPost Fiber White Wurzelstifte verwendet. Die Zähne sowie die Stifte wurden in Laborkunststoff eingebettet und so beschliffen, dass plane Flächen resultierten, welche nach der entsprechenden Vorbehandlung mit Hilfe von vier verschiedenen Befestigungskompositen aneinander befestigt und im Abscherversuch belastet wurden.

Wie aus den Versuchsdurchführungen ersichtlich wird, lassen sich die Ergebnisse nicht mit denen der vorliegenden Studie vergleichen. Neben einer Zerstörung der oberflächlichen Fasern der Stifte stellt sich die Frage, inwieweit sich die SiO₂-Schicht auf der Glasfaserstiftoberfläche von der auf einer Keramik- oder Metalloberfläche unterscheidet. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Glasfaserstifte durch die exponierten Glasfasern über eine stark vergrößerte Oberfläche verfügen, die in Kombination mit der in den vorliegenden Versuchen durchgeführten Vorbehandlung zu sehr hohen Haftkräften führen kann.

Bis heute liegt erst eine Studie vor, die die Haftkraft unterschiedlicher Glasfaserstifte zu verschiedenen Befestigungskompositen mit Hilfe einer Testmethode verglichen hat (Bitter et al. 2007). Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit, die Zusammensetzung der Kompositmatrix, sowie der Faser- und Füllergehalt der verschiedenen Faserstifte auf die Haftkraft verschiedener Befestigungskomposite nach unterschiedlicher Vorbehandlung bleibt daher spekulativ. In einer REM-Analyse verschiedener auf dem Markt erhältlicher Faserstifte konnte eine große Variabilität in Bezug auf den Durchmesser der Fasern, Dichte der Fasern und Unterschiede in der Anordnung von Fasern und Füllpartikeln festgestellt werden (Malferrari et al. 2002). Dieses Ergebnis unterstreicht zusätzlich die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Faserstifte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die untersuchten Vorbehandlungsmaßnahmen nur einen sehr geringen Einfluss auf die Haftung abhängig vom verwendeten Befestigungskomposit hatten. Aus diesem Grund scheint die Notwendigkeit einer Vorbehandlung von Glasfaserstiften fraglich. Der daraus resultierende Nutzen für den praktisch tätigen Zahnarzt könnte in einer Zeit- und Materialersparnis liegen. Inwieweit die vorliegenden Ergebnisse auch für den Langzeithaftverbund gelten, muss in weiteren Studien anhand von thermo-mechanischen sowie dynamischen Belastungsversuchen der Proben geprüft werden. Darüber hinaus sollte ein möglicher Einfluss der Vorbehandlungsmethoden auf die Dichtigkeit der Grenzfläche zwischen Glasfaserstift und Befestigungskomposit untersucht werden.

6.4.2 Einfluss des Befestigungsmaterials

In den vorliegenden Versuchen wurden sowohl konventionelle Bis-GMA-basierte Befestigungszemente (Variolink, Multilink und PermaFlo DC), als auch Befestigungskomposite, die so genannte funktionelle Monomere wie 10-MDP (Panavia F und Clearfil Core) und mehrfach funktionelle phosphorsaure Methacrylate (RelyX Unicem) enthalten, verwendet. Die Befestigungskomposite, die die beschriebenen funktionellen Monomere enthalten, zeigten signifikant höhere Haftfestigkeitswerte im Vergleich zu den konventionellen Befestigungskompositen. Die Überlegenheit der MDP enthaltenden Kunststoffsysteme könnte auf eine chemische Bindung zwischen dem Befestigungskomposit und der Stiftoberfläche zurückzuführen sein, wie sie schon für Zirkoniumdioxidkeramik (Kern & Wegner 1998) und glasinfiltrierte Aluminiumoxikeramik (Kern et al. 1995) gezeigt wurde. Die Phosphatester-Gruppe der funktionellen Monomere soll eine chemische Verbindung zu den Metalloxiden der Keramiken eingehen können (Wada 1986), was bei der Betrachtung der vorliegenden Arbeit und den zitierten Studien den Schluss nahe legt, dass MDP neben der Bindung an Aluminium- und Zirkoniumdioxid möglicherweise auch eine Bindung zum Siliziumdioxid auf der Oberfläche der Glasfasern ausbilden kann.

Die signifikant höchsten Haftkräfte zwischen den Glasfaserstiften und den sechs Befestigungskompositen zeigte Clearfil Core/New Bond. Dies könnte an

der Kombination aus der vergleichsweise hohen Biegefestigkeit (115 MPa) und dem funktionellen Phosphatmonomer im Adhäsivsystem liegen. Eine andere Erklärung dieser hohen Werte könnte in dem hohen Druck liegen, der beim Setzen der Stifte mit Clearfil Core aufgewendet werden muss. Clearfil Core hat eine durchschnittliche Füllkörpergröße von 5-40 µm und einen Füllungsgrad von 56 Vol.-%. Die dadurch bedingte hohe Viskosität des Befestigungskomposit erfordert einen erhöhten Kraftaufwand beim Einsetzen der Wurzelstifte.

Die Vergleichbarkeit mit anderen Studienergebnissen zu der Haftung von Befestigungskompositen an Glasfaserstiften ist aufgrund unterschiedlicher verwendeter Stiftarten und -formen, sowie unterschiedlicher Befestigungskomposite und Testmethoden nur mit Einschränkungen möglich. Eine Studie, die die Haftung verschiedener Befestigungskomposite an Faserstiften mit Hilfe von Ausstoßversuchen ermittelte, erhielt sehr hohe Haftwerte zwischen Karbonfaserstiften und den Befestigungskompositen, die ein funktionelles Monomer (10-MDP) enthielten (Boschian Pest et al. 2002). Die Verfasser der Studie erklären ihre Ergebnisse durch eine chemische Affinität zwischen den Karbonfaserstiften und den oben genannten Befestigungskompositen.

In einer weiteren Studie, in der ebenfalls die Haftfestigkeit verschiedener Befestigungskomposite zu Karbonfaserstiften getestet wurde, zeigte Panavia 21 signifikant höhere Haftwerte als alle anderen getesteten Komposite (O'Keefe et al. 2000). Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit und unterstützt somit die Hypothese, dass Befestigungskomposite, die funktionelle Monomere wie 10-MDP enthalten, höhere Haftwerte an Faserstiften zeigen als andere Befestigungskomposite.

Die Ergebnisse dieser Studie belegen deutlich den Einfluss des Befestigungskomposits auf die Haftung an Glasfaserstiften. Die Tatsache, dass Retentionsverluste von Wurzelkanalstiften heutzutage immer noch eine häufige Misserfolgsursache darstellen (Malferrari et al. 2003; Monticelli et al. 2003; Naumann et al. 2005), unterstreicht zusätzlich die Bedeutung der Auswahl des Befestigungskomposits. Ein weiterer Vorteil für den praktisch tätigen Zahnarzt ergibt sich durch das gute Abschneiden von Clearfil Core. Dieses Befestigungskomposit kann gleichzeitig auch als Aufbaumaterial benutzt

werden, was zum einen den Behandlungsablauf vereinfacht und zum anderen Vorteile hinsichtlich der Stabilität des gesamten Stift-Stumpfaufbaus bringen könnte. Da in dieser Arbeit selektiv der Verbund der Befestigungskomposite zur Wurzelstiftoberfläche untersucht wurde, müssen weitere Studien durchgeführt werden, die den Haftverbund der Befestigungskomposite zum Dentin überprüfen. Darüber hinaus sollten die Materialien in klinischen Studien auf ihre Langzeitstabilität untersucht werden.

6.4.3 Einfluss der Stiftmaterialien

Der in dieser Studie durchgeführte Vergleich der Haftwerte verschiedener Befestigungskomposite an Zirkoniumdioxid- und Glasfaserstiften, die mit dem CoJet-System vorbehandelt wurden, zeigte signifikant höhere Haftwerte für die Glasfaserstifte. Die voneinander abweichenden Haftfestigkeitswerte zwischen den untersuchten Stiftarten lassen sich auf die unterschiedliche Zusammensetzung und Oberflächenstruktur der Zirkoniumdioxid- und Glasfaserstifte zurückführen, welche unterschiedliche Anforderungen an eine Befestigung stellen. Die vorliegenden Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit denen aus anderen Studien, die ebenfalls höhere Haftfestigkeitswerte an Glasfaserstiften als an Zirkoniumdioxidstiften erhielten (Hedlund et al. 2003; O'Keefe et al. 2000). Eine vor kurzem veröffentlichte Studie verglich mit Hilfe von Ausstoßversuchen die Haftfestigkeit von Zirkoniumdioxidstiften und Glasfaserstiften die mit verschiedenen Befestigungskompositen in extrahierten Zähnen befestigt wurden (Perdigao et al. 2004). Die Zirkoniumdioxidstifte zeigten signifikant niedrigere Haftwerte verglichen mit den Glasfaserstiften. Dietschi et al. fanden *in vitro* für zirkoniumdioxidkeramische Wurzelstifte im Vergleich zu Titan- und Glasfaserstiften ebenfalls die schlechtesten Verbundeigenschaften zwischen Stift, Befestigungskomposit und Dentin (Dietschi et al. 1997). Die Autoren machten die hohe Steifigkeit und Rigidität des Zirkoniumdioxids, welche die auf den Stift wirkenden Kräfte direkt zur Grenzfläche zwischen Stift und Zahn weiterleitet, für dieses Ergebnis verantwortlich.

Hedlund et al. untersuchten die Haftfestigkeit von Befestigungskompositen an verschiedenen Stiftstumpfaufbausystemen (Hedlund et al. 2003). Nur die

Zirkoniumdioxidstifte zeigten als einzige Stifte niedrigere Haftwerte als gegossene Stiftaufbauten aus einer Goldlegierung. Bei der visuellen Begutachtung der ausgestoßenen Keramikstifte waren auf der Oberfläche keine Rückstände des Befestigungsmaterials zu beobachten. Dies lässt auf ein adhäsives Versagen an der Grenzfläche zwischen Stift und Befestigungskomposit schließen. Ein weiterer Gesichtspunkt, der bei der Gegenüberstellung verschiedener Stiftsysteme berücksichtigt werden muss, ist deren unterschiedliche Konizität. In den vorliegenden Versuchen wurden mit dem CosmoPost ein zylindrischer Stift mit einem konischen Stift, dem FRC Postec, mit einem Konuswinkel von $5,3^\circ$ verglichen. Passiv eingesetzte parallelwandige Wurzelkanalstifte weisen verglichen mit konischen Stiften eine günstigere Stressverteilung in photoelastischen Analysen auf (Henry 1977; Rolf et al. 1992), zeigen eine geringere Frakturanfälligkeit (Sorensen & Engelman 1990) und haben aufgrund ihrer parallelen Führungsflächen höhere Retentionswerte gegenüber konischen Wurzelstiften (Stockton 1999). Im Gegensatz dazu zeigten sich in dieser Studie keine Vorteile für das parallele Stiftdesign. Die Stiftgeometrie schien bei der adhäsiven Befestigung im künstlichen Wurzelkanal gegenüber dem Stiftmaterial und der Beschaffenheit der Stiftoberfläche einen untergeordneten Einfluss auf die Retention des Wurzelkanalstiftes zu haben (Nissan et al. 2001).

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen für die Glasfaserstifte gegenüber den Zirkoniumdioxidstiften eindeutig höhere initiale Haftpfestigkeitswerte. Aus diesem Grund scheint der Einsatz von adhäsiv befestigten Glasfaserstiften vorteilhaft zur Vermeidung von Retentionsverlusten zu sein. Durch die Erkenntnisse dieser Studie und die bereits bekannten Nachteile von Zirkoniumdioxidstiften, wie die schwere Entfernbarkeit (Qualtrough & Mannocci 2003) und das erhöhte Risiko von Wurzelfrakturen durch ungleichmäßige Kraftverteilung auf die Restzahnhartsubstanz (Akkayan et al. 1998; Asmussen et al. 1999; Mannocci et al. 1999), sollte der praktisch tätige Zahnarzt den Glasfaserstiften bei der Restauration tief zerstörter Zähne in ästhetisch relevanten Bereichen den Vorzug geben. Glasfaserstifte weisen zwar im Vergleich zu Zirkoniumdioxidstiften geringere Festigkeitswerte auf, die das Risiko von Stifftrakturen erhöhen (Asmussen et al. 1999). Sie bewirken aber

eine gleichmäßigere Kraftverteilung entlang der Wurzel, was im Falle eines Misserfolges zu klinisch günstigeren, d. h. wiederversorgbaren Frakturen oder Dezementierungen führt (Asmussen et al. 1999). Trotz dieser Ergebnisse sollten weitere In-vitro-Studien durchgeführt werden, die den Effekt der thermo-mechanischen Belastung auf den Haftverbund untersuchen. Darüber hinaus sollten prospektive Langzeitstudien veranlasst werden, die über klinische Bewährung und Misserfolg von Glasfaserstiften Auskunft geben.

6.4.4 Versagensmodusanalyse

Beim Vergleich der Keramikstifte mit den Glasfaserstiften lässt sich für die Glasfaserstifte signifikant häufiger der kohäsive Versagenstyp (Typ 2) beobachten. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den in Ausstoßversuchen ermittelten Bruchspannungen. Der höhere Anteil des gemischten Versagenstyps (Typ 2) weist auf einen kraftschlüssigeren Verbund zwischen Glasfaserstiften und Komposit im Vergleich zu den Keramikstiften hin.

Bei der alleinigen Betrachtung der Glasfaserstifte lässt sich in Abhängigkeit von der Vorbehandlung eine Zunahme des gemischten Versagenstyps (Typ 2) beobachten, wobei die Alkohol-Gruppe die niedrigsten Werte und die CoJet-Gruppe die höchsten Werte zeigte. Betrachtet man nur die Versagensmodusanalyse, könnte dieses Ergebnis auf eine verbesserte Haftung nach einer Vorbehandlung der Stifte hindeuten. In den Ausstoßversuchen konnten im Gegensatz dazu keine erhöhten Bruchspannungen nach der Vorbehandlung der Stifte gemessen werden. Vergleicht man die Versagensmodi der einzelnen Befestigungskomposite untereinander, so lassen sich ebenfalls keine Rückschlüsse auf die ermittelten Bruchspannungen ziehen. Die Problematik bei der Beurteilung der Versagensmodusanalyse ist auf einen Mangel an verlässlichen Informationen über die komplexen Belastungsvorgänge innerhalb der Prüfkörper zurückzuführen. Bei den angewendeten In-vitro-Versuchen zur Testung von Adhäsivsystemen und Kompositen, treten Phänomene auf, die rechnerisch noch nicht erfasst sind. Es konnte gezeigt werden, dass kleinste Veränderungen im Versuchsaufbau und in der Probenherstellung das Versagensverhalten und die Haftfestigkeitswerte beeinflussen können (Versluis et al. 1997). Ferner konnte in Scherversuchen

gezeigt werden, dass unterschiedliche Bondingsysteme unterschiedliche Frakturmodi erzeugen können (Pashley et al. 1995) und dass der Punkt, an dem Risse entstehen, nicht immer der schwächste Punkt ist (Watanabe et al. 1994). Aus diesen Gründen ist es ratsam, die Ergebnisse aus der Bruchanalyse hinsichtlich ihrer Aussage bezüglich der besseren Haftung eines Materials gegenüber einem anderen zurückhaltend zu interpretieren.

7 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Arbeit konnten zwei der drei Hypothesen bestätigt werden. Die Haftung wurde sowohl von der Stiftart, als auch von der Art des Befestigungskomposites beeinflusst. Hinsichtlich der Oberflächenbehandlung zeigte sich kein signifikanter Einfluss.

Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen und deren Auswertung kann angenommen werden, dass die Vorbehandlung von Glasfaserstiften mit Silanlösungen oder mit dem CoJet-System keinen entscheidenden Einfluss auf die initiale Haftung zwischen der Stiftoberfläche und dem Befestigungskomposit hat. Die klinische Relevanz dieses Ergebnisses könnte in einer Vereinfachung des Arbeitsablaufes und in einer Zeit- und Materialersparnis beim Befestigen von Glasfaserstiften liegen. Aufgrund der kontroversen Ergebnisse, die in der Literatur zu diesem Thema existieren (Aksornmuang et al. 2004; Goracci et al. 2005; Perdigao et al. 2006; Sahafi et al. 2003), muss diese Aussage jedoch mit Vorsicht betrachtet und durch weitere Untersuchungen untermauert werden. Darüber hinaus wäre die Einführung einer einheitlichen Prüfmethode sinnvoll, um die in den verschiedenen Arbeitsgruppen ermittelten Werte besser miteinander vergleichen zu können. Das in der vorliegenden Studie eingesetzte Testdesign könnte hierzu in Zukunft verwendet werden. Der Ausstoßversuch wird als genaue und zuverlässige Technik zur Messung der Verbundfestigkeit von Faserstiften zu Wurzelkanaldentin beschrieben (Goracci et al. 2004), bei dem die auf die Grenzfläche wirkenden Kräfte den klinisch auftretenden Kräften sehr ähnlich sind (Sudsangiam et al. 1999). Ein weiterer Vorteil ist, dass aus einem Stift mehrere Proben gewonnen werden können.

Hinsichtlich der Befestigungskomposite ließen sich eindeutige Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen erkennen. Die höchsten Haftwerte wurden für Befestigungskomposite erzielt, die funktionelle Phosphatmonomere enthielten. Obwohl der Retentionsverlust den am häufigsten auftretenden Misserfolg bei mit Wurzelstiften restaurierten Zähnen darstellt (Axelsson et al. 1991; Bergman et al. 1989; Testori et al. 1993), bleibt die klinische Relevanz dieser Ergebnisse fraglich, da sich der Erfolg einer Restauration aus vielen verschiedenen Komponenten zusammensetzt. Ungeklärt bleibt darüber hinaus, welche

Haftwerte für ein dauerhaftes Funktionieren eines Wurzelstiftes überhaupt notwendig sind.

Der Vergleich zwischen Zirkoniumdioxidstiften und Glasfaserstiften ergab in Übereinstimmung mit anderen Studien, dass hinsichtlich der Haftung an der Stiftoberfläche den Glasfaserstiften der Vorzug zu geben ist. Somit ist den bereits erwähnten Nachteilen der Keramikstifte (erschwerter Entfernbarkeit (Qualtrough & Mannocci 2003); erhöhtes Wurzelfrakturrisiko durch ungleichmäßige Kraftverteilung (Akkayan & Caniklioglu 1998; Asmussen et al. 1999; Mannocci et al. 1999)) durch die verminderte Haftung ein weiterer hinzuzufügen.

8 Zusammenfassung

Das Ziel der Studie bestand darin, verschiedene Vorbehandlungsmethoden an Glasfaserstiften zu untersuchen, die den Haftverbund zwischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit verbessern könnten. Darüber hinaus sollte überprüft werden, ob der Haftverbund von der Art des Befestigungskomposit abhängig ist und inwieweit die Haftwerte mit denen an Zirkoniumdioxidstiften vergleichbar sind. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 240 Wurzelkanalstifte verwendet, die in vier Gruppen (n=60) aufgeteilt wurden. Die drei Vorbehandlungsmethoden für die Glasfaserstifte bestanden in der Reinigung mit Alkohol, dem Silanisieren (Monobond S) und der tribochemischen Beschichtung (CoJet). Die Gruppe der Zirkoniumdioxidstifte wurde mit Hilfe des CoJet-Systems tribochemisch beschichtet. Anschließend wurden die Stifte mit sechs verschiedenen Befestigungskompositen (Panavia F, Multilink, Variolink, PermaFlo, RelyX Unicem, Clearfil Core) in künstlichen Wurzelkanälen befestigt. Mit der Zwick-Universalprüfmaschine wurden die initialen Haftwerte zwischen Stift und Befestigungskomposit bestimmt.

Die Vorbehandlung der Glasfaserstifte hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Haftung. Signifikante Interaktionen (2-Wege ANOVA) wiesen jedoch daraufhin, dass die Vorbehandlungen bei einzelnen Befestigungsmaterialien einen Effekt zeigten. Die Haftkraft wurde signifikant vom Stiftmaterial ($p < 0,001$; 2-Wege ANOVA) und von der Art des Befestigungsmaterials beeinflusst ($p < 0,001$; 2-Wege ANOVA). Abgesehen von den Befestigungskompositen PermaFlo und Multilink waren die Haftwerte an den Glasfaserstiften signifikant höher als an den Keramikstiften. Befestigungskomposite, die funktionelle Phosphatmonomere enthielten, erzielten an Glasfaserstiften signifikant höhere Haftwerte als an Bis-GMA-basierten Befestigungskompositen.

Die getesteten Vorbehandlungsmethoden führten nicht zu einem erhöhten Haftverbund an Glasfaserstiften. Diese stellen auf der Grundlage der gezeigten Ergebnisse bezüglich ihrer Haftung zu Befestigungskompositen eine Alternative zu Zirkoniumdioxidstiften dar. Die Auswahl des Befestigungskomposits spielt aufgrund der stark differierenden Haftwerte eine entscheidende Rolle bei der Befestigung von zahnfarbenen Wurzelkanalstiften.

9 Summary

The aim of this study was to evaluate the effect of various pre-treatment procedures that might improve bond strengths between glass-fiber-reinforced composite (FRC) posts and resin cements. In addition, it was hypothesized that bond strength depends on the type of resin cement and post. A comparison of bond strength between FRC posts and zirconium dioxide posts was performed. For these purposes 240 posts were divided into four groups (n = 60). FRC posts were divided into three groups (n = 60) and received three different surface treatments. Group 1: no treatment (control); Group 2: silane treatment (Monobond S); Group 3: silica coating and silanization with an intraoral airborne-particle-abrasion device (CoJet). The sixty zirconium-oxide posts were silica coated (CoJet). Subsequently, the posts were luted with one of six different luting agents (Panavia F, Multilink, Variolink, PermaFlo DC, RelyX Unicem, Clearfil Core) into artificial post spaces. Push-out tests were performed at a cross-head speed of 0.5 mm/minute using a universal testing machine (Zwick).

Pre-treatment procedures had no influence on bond strengths to the posts.

However, significant interactions (2-way ANOVA) indicated that the pre-treatment procedures had an effect on some of the luting materials. The observed bond strength on the posts was significantly affected by the type of the post material ($p < 0,001$; 2-way ANOVA) and the type of luting agent ($p < 0,001$; 2-way ANOVA) used. The bond strength of all luting agents was significantly higher on FRC posts than on the zirconium-oxide posts, except for PermaFlo DC and Multilink which demonstrated higher bond strength values on zirconium-oxide posts. Luting agents which contain functional monomers showed significantly higher bond strength to FRC posts than conventional Bis-GMA based resin cements.

Due to the present results no improved bond strength was determined using the different pre-treatment procedures on FRC posts. Concerning their bond strength FRC posts represent an alternative to zirconium dioxide posts. The choice of the luting agent is most important for cementing tooth-coloured posts, because of the different results in bond strength.

10 Literaturverzeichnis

Akagawa Y, Ichikawa Y, Nikai H, Tsuru H (1993)
Interface histology of unloaded and early loaded partially stabilized zirconia endosseous implant in initial bone healing
J Prosthet Dent **69**, 599-604.

Akkayan B, Caniklioglu B (1998)
Resistance to fracture of crowned teeth restored with different post systems
Eur J Prosthodont Restor Dent **6**, 13-8.

Akkayan B, Gulmez T (2002)
Resistance to fracture of endodontically treated teeth restored with different post systems
J Prosthet Dent **87**, 431-7.

Aksornmuang J, Foxton RM, Nakajima M, Tagami J (2004)
Microtensile bond strength of a dual-cure resin core material to glass and quartz fibre posts
J Dent **32**, 443-50.

Arvidson K, Wroblewski R (1978)
Migration of metallic ions from screwposts into dentin and surrounding tissues
Scand J Dent Res **86**, 200-5.

Asmussen E, Peutzfeldt A, Heitmann T (1999)
Stiffness, elastic limit, and strength of newer types of endodontic posts
J Dent **27**, 275-8.

Asmussen E, Peutzfeldt A, Sahafi A (2005)
Finite element analysis of stresses in endodontically treated, dowel-restored teeth
J Prosthet Dent **94**, 321-9.

Assif D, Oren E, Marshak BL, Aviv I (1989)
Photoelastic analysis of stress transfer by endodontically treated teeth to the supporting structure using different restorative techniques
J Prosthet Dent **61**, 535-43.

Atsu SS, Kilicarslan MA, Kucukesmen HC, Aka PS (2006)
Effect of zirconium-oxide ceramic surface treatments on the bond strength to adhesive resin
J Prosthet Dent **95**, 430-6.

Axelsson P, Lindhe J, Nystrom B (1991)
On the prevention of caries and periodontal disease. Results of a 15-year longitudinal study in adults
J Clin Periodontol **18**, 182-9.

Bachicha WS, DiFiore PM, Miller DA, Lautenschlager EP, Pashley DH (1998)
Microleakage of endodontically treated teeth restored with posts
J Endod **24**, 703-8.

Bateman G, Ricketts DN, Saunders WP (2003)
Fibre-based post systems: a review
Br Dent J **195**, 43-8; discussion 37.

Bell AM, Tanner J, Lassila LV, Kangasniemi I, Vallittu P (2004)
Bonding of composite resin luting cement to fiber-reinforced composite root canal posts
J Adhes Dent **6**, 319-25.

Bergman B, Lundquist P, Sjogren U, Sundquist G (1989)
Restorative and endodontic results after treatment with cast posts and cores
J Prosthet Dent **61**, 10-5.

Bitter K, Noetzel J, Neumann K, Kielbassa AM (2007)
Effect of silanization on bond strengths of fiber posts to various resin cements
Quintessence Int **38**, 121-8.

Boschian Pest L, Cavalli G, Bertani P, Gagliani M (2002)
Adhesive post-endodontic restoration with fiber posts: push-out tests and SEM observations
Dent Mater **18**, 596-602.

Bottino MA, Valandro LF, Scotti R, Buso L (2005)
Effect of surface treatments on the resin bond to zirconium-based ceramic
Int J Prosthodont **18**, 60-5.

Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH (2003)
Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin
Dent Mater **19**, 199-205.

Brosh T, Pilo R, Bichacho N, Blutstein R (1997)
Effect of combinations of surface treatments and bonding agents on the bond strength of repaired composites
J Prosthet Dent **77**, 122-6.

Caputo AA, Standlee JP, Collard EW (1973)
The mechanics of load transfer by retentive pins
J Prosthet Dent **29**, 442-9.

Chen J, Matsumara, H., Atsuta M. (1998)
Effect of etchant, etching period, and silane priming on bond strength to porcelain of composite resin.
Oper Dent **23**, 250-7.

Christel P, Meunier A, Heller M, Torre JP, Peille CN (1989)
Mechanical properties and short-term in-vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia
J Biomed Mater Res **23**, 45-61.

Colley IT, Hampson EL, Lehmann ML (1968)
Retention of post crowns: An assessment of the relative efficiency of posts of different shapes and sizes.
Br Dent J **124**, 63-9.

Cormier CJ, Burns DR, Moon P (2001)
In vitro comparison of the fracture resistance and failure mode of fiber, ceramic, and conventional post systems at various stages of restoration
J Prosthodont **10**, 26-36.

Creugers NH, Mentink AG, Kayser AF (1993)
An analysis of durability data on post and core restorations
J Dent **21**, 281-4.

de Rijk WG (2000)
Removal of fiber posts from endodontically treated teeth
Am J Dent **13**, 19B-21B.

Dean JP, Jeansonne BG, Sarkar N (1998)
In vitro evaluation of a carbon fiber post
J Endod **24**, 807-10.

DeLong R, Douglas WH (1983)
Development of an artificial oral environment for the testing of dental restoratives: bi-axial force and movement control
J Dent Res **62**, 32-6.

Derand P, Derand T (2000)
Bond strength of luting cements to zirconium oxide ceramics
Int J Prosthodont **13**, 131-5.

Dhert WJ, Verheyen CC, Braak LH et al. (1992)
A finite element analysis of the push-out test: influence of test conditions
J Biomed Mater Res **26**, 119-30.

Dietschi D, Romelli M, Goretti A (1997)
Adaptation of adhesive posts and cores to dentin after fatigue testing
Int J Prosthodont **10**, 498-507.

Drummond JL (2000)
In vitro evaluation of endodontic posts
Am J Dent **13**, 5B-8B.

Drummond JL, Sakaguchi RL, Racean DC, Wozny J, Steinberg AD (1996)
Testing mode and surface treatment effects on dentin bonding J Biomed Mater Res **32**, 533-41.

Drummond JL, Toepke TR, King TJ (1999)
Thermal and cyclic loading of endodontic posts
Eur J Oral Sci **107**, 220-4.

Duncan JP, Pameijer CH (1998)
Retention of parallel-sided titanium posts cemented with six luting agents: an in vitro study
J Prosthet Dent **80**, 423-8.

Duret B, Reynaud M, Duret F (1990)
A new concept of corono-radicular reconstruction, the Composipost (2)
Chir Dent Fr **60**, 69-77.

Duret B, Reynaud M, Duret F (1990)
New concept of coronoradicular reconstruction: the Composipost (1)
Chirur Dent France **60**, 131-41 contd.

Eames WB, Rogers LB, Feller PR, Price WR (1977)
Bonding agents for repairing porcelain and gold: an evaluation
Oper Dent **2**, 118-24.

Edelhoff D, Heidemann D, Kern M, Weigl P (2003)
Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK, der DGZPW und der DGZ Aufbau endodontisch behandelter Zähne
Zahnärztl. Mitt. **93**, 42-4.

Edelhoff D, Spieckermann H (2000)
Klinische Erfahrungen mit konfektionierten Wurzelstiften und individuellen Stumpfaufbauten aus Keramik
Dtsch Zahnärztl Z **55**, 746-9.

Ferrari M, Cagidiaco MC, Grandini S, De Sanctis M, Goracci C (2007)
Post placement affects survival of endodontically treated premolars
J Dent Res **86**, 729-34.

Ferrari M, Mannocci F (2000)
A 'one-bottle' adhesive system for bonding a fibre post into a root canal: an SEM evaluation of the post-resin interface
Int Endod J **33**, 397-400.

Ferrari M, Scotti M (2002)
Fiber posts Characteristics and clinical applications
Milano: Masson, 15-23.

- Ferrari M, Vichi A, Garcia-Godoy F (2000)
Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores
Am J Dent **13**, 15B-8B.
- Ferrari M, Vichi A, Mannocci F, Mason PN (2000)
Retrospective study of the clinical performance of fiber posts
Am J Dent **13**, 9B-13B.
- Frankenberger R, Kramer N, Petschelt A (1999)
Fatigue behaviour of different dentin adhesives
Clin Oral Investig **3**, 11-7.
- Frankenberger R, Kramer N, Sindel J (2000)
Repair strength of etched vs silica-coated metal-ceramic and all-ceramic restorations
Oper Dent **25**, 209-15.
- Frankenberger R, Sindel J, Krämer N, Pelka M, Petschelt A (1997)
A new testing design to determine bond strength to dentin.
J Dent Res **76**, 416.
- Fredriksson M, Astback J, Pamenius M, Arvidson K (1998)
A retrospective study of 236 patients with teeth restored by carbon fiber-reinforced epoxy resin posts
J Prosthet Dent **80**, 151-7.
- Freedman GA (2001)
Esthetic post-and-core treatment
Dent Clin North Am **45**, 103-16.
- Galhano GA, Valandro LF, de Melo RM, Scotti R, Bottino MA (2005)
Evaluation of the flexural strength of carbon fiber-, quartz fiber-, and glass fiber-based posts
J Endod **31**, 209-11.
- Gallo JR, 3rd, Miller T, Xu X, Burgess JO (2002)
In vitro evaluation of the retention of composite fiber and stainless steel posts
J Prosthodont **11**, 25-9.
- Gesi A, Magnolfi S, Goracci C, Ferrari M (2003)
Comparison of two techniques for removing fiber posts
J Endod **29**, 580-2.
- Goracci C, Raffaelli O, Monticelli F, Balleri B, Bertelli E, Ferrari M (2005)
The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization
Dent Mater **21**, 437-44.

- Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A et al. (2004)
The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements
Eur J Oral Sci **112**, 353-61.
- Habenicht G (1990)
Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen.
Springer Verlag Berlin.
- Haller B (1993)
Beständigkeit des Komposit-Dentinverbundes bei künstlicher Alterung
Dtsch Zahnärztl Z **48**, 100-4.
- Haller B, Blunck U (2003)
Übersicht und Wertung der aktuellen Bondingsysteme.
Zahnärztl. Mitt. **93**, 48-58.
- Haller B, Thull R, Klaiber B, Teuber M (1991)
An extrusion test for determination of bond strength to dentin
J Dent Res **70 (Spec Iss)**, 525.
- Hara AT, Pimenta LA, Rodrigues AL, Jr. (2001)
Influence of cross-head speed on resin-dentin shear bond strength
Dent Mater **17**, 165-9.
- Hedlund S-O, Johansson NG, Sjögren G (2003)
Retention of prefabricated and individually cast root canal posts in vitro
Br Dent J **195**, 155-8.
- Henry PJ (1977)
Photoelastic analysis of post core restorations
Aust Dent J **22**, 157-9.
- Heydecke G, Butz F, Hussein A, Strub JR (2002)
Fracture strength after dynamic loading of endodontically treated teeth restored with different post-and-core systems
J Prosthet Dent **87**, 438-45.
- Heydecke G, Butz F, Strub JR (2001)
Fracture strength and survival rate of endodontically treated maxillary incisors with approximal cavities after restoration with different post and core systems: an in-vitro study
J Dent **29**, 427-33.
- Ichikawa Y, Akagawa Y, Nikai H, Tsuru H (1992)
Tissue compatibility and stability of a new zirconia ceramic in vivo
J Prosthet Dent **68**, 322-6.

- Isidor F, Odman P, Brondum K (1996)
Intermittent loading of teeth restored using prefabricated carbon fiber posts
Int J Prosthodont **9**, 131-6.
- Ivoclar-Vivadent-AG (2001) FRC Postec - Wissenschaftliche Dokumentation.
- Ivoclar-Vivadent-AG (2003) CosmoPost Verarbeitungsanleitung.
- Janda R (1988)
Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe
Quintessence **39**, 1067/73, 243/253, 393/398.
- Janda R (1990)
Kunststoffverbundsysteme. Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung.
VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Janda R, Roulet JF, Wulf M, Tiller HJ (2003)
A new adhesive technology for all-ceramics
Dent Mater **19**, 567-73.
- Johnson JK, Sakamura JS (1978)
Dowel form and tensile force
J Prosthet Dent **40**, 645-9.
- Kaelin D, Schärer P (1991)
Aufbausysteme in der Kronen- und Brückenprothetik
Schweiz Monatsschr Zahnmed, 457-63.
- Takehashi Y, Luthy H, Naef R, Wohlwend A, Schärer P (1998)
A new all-ceramic post and core system: clinical, technical, and in vitro results
Int J Periodontics Restorative Dent **18**, 586-93.
- Kedici SP, Aksut AA, Kilicarslan MA, Bayramoglu G, Gokdemir K (1998)
Corrosion behaviour of dental metals and alloys in different media
J Oral Rehabil **25**, 800-8.
- Kern M, Simon MHP, Strub J (1998)
Erste klinische Erfahrungen mit Wurzelstiften aus Zirkonoxidkeramik
Dtsch Zahnärztl Z **53**, 266-8.
- Kern M, Thompson VP (1995)
Bonding to glass infiltrated alumina ceramic: adhesive methods and their durability
J Prosthet Dent **73**, 240-9.
- Kern M, Wegner SM (1998)
Bonding to zirconia ceramic: adhesion methods and their durability
Dent Mater **14**, 64-71.

- King PA, Setchell DJ (1990)
An in vitro evaluation of a prototype CFRC prefabricated post developed for the restoration of pulpless teeth
J Oral Rehabil **17**, 599-609.
- Kosmac T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L (1999)
The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic
Dent Mater **15**, 426-33.
- Kosmac T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L (2000)
Strength and reliability of surface treated Y-TZP dental ceramics
J Biomed Mater Res **53**, 304-13.
- Kurer HG, Combe EC, Grant AA (1977)
Factors influencing the retention of dowels
J Prosthet Dent **38**, 515-25.
- Kvist T, Rydin E, Reit C (1989)
The relative frequency of periapical lesions in teeth with root canal-retained posts
J Endod **15**, 578-80.
- Lauer HC, Ottl P, O. H (1996)
Die prothetische Versorgung des avitalen Zahnes
Zahnarzt Magazin **11**, 15-9.
- Lawn BR, Deng Y, Lloyd IK, Janal MN, Rekow ED, Thompson VP (2002)
Materials design of ceramic-based layer structures for crowns
J Dent Res **81**, 433-8.
- Leary JM, Aquilino SA, Svare CW (1987)
An evaluation of post length within the elastic limits of dentin
J Prosthet Dent **57**, 277-81.
- Leary JM, Holmes DC, Johnson WT (1995)
Post and core retention with different cements
Gen Dent **43**, 416-9.
- Malferrari S, Monaco C (2002)
Composition, microstructure and morphology of the posts.
In M Ferrari ed. Fiber posts Characteristics and clinical applications. Milano: Masson.
- Malferrari S, Monaco C, Scotti R (2003)
Clinical evaluation of teeth restored with quartz fiber-reinforced epoxy resin posts
Int J Prosthodont **16**, 39-44.

- Mannocci F, Ferrari M, Watson TF (1999)
Intermittent loading of teeth restored using quartz fiber, carbon-quartz fiber, and zirconium dioxide ceramic root canal posts
J Adhes Dent **1**, 153-8.
- Mannocci F, Sherriff M, Watson TF (2001)
Three-point bending test of fiber posts
J Endod **27**, 758-61.
- Martinez-Insua A, da Silva L, Rilo B, Santana U (1998)
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 **80**, 527-32.
- Matinlinna JP, Lassila LV, Özcan M, Yli-Urpo A, Vallittu PK (2004)
An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry
Int J Prosthodont **17**, 155-64.
- Matsumura H, Kawahara, M., Tanaka, T., Atsuta, M. (1989)
A new Porcelain repair system with a silane coupler, ferric chloride, and adhesive opaque resin.
J Dent Res **68**, 813-8.
- Mendoza DB, Eakle WS, Kahl EA, Ho R (1997)
Root reinforcement with a resin-bonded preformed post
J Prosthet Dent **78**, 10-4.
- Mentink AG, Meeuwissen R, Kayser AF, Mulder J (1993)
Survival rate and failure characteristics of the all metal post and core restoration
J Oral Rehabil **20**, 455-61.
- Meyenberg KH, Luthy H, Schärer P (1995)
Zirkonium post. A new all-ceramic concept for nonvital abutment teeth
J Esthet Dent **7**, 73-80.
- Michalakakis KX, Hirayama H, Sfolkos J, Sfolkos K (2004)
Light transmission of posts and cores used for the anterior esthetic region
Int J Periodontics Restorative Dent **24**, 462-9.
- Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M (2003)
Clinical behavior of translucent-fiber posts: a 2-year prospective study
Int J Prosthodont **16**, 593-6.
- Monticelli F, Osorio R, Toledano M, Goracci C, Tay FR, Ferrari M (2006)
Improving the quality of the quartz fiber postcore bond using sodium ethoxide etching and combined silane/adhesive coupling
J Endod **32**, 447-51.

Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Cury AH, Goracci C, Ferrari M (2006)
Post-surface conditioning improves interfacial adhesion in post/core restorations
Dent Mater **22**, 602-9.

Morgano SM, Brackett SE (1999)
Foundation restorations in fixed prosthodontics: current knowledge and future needs
J Prosthet Dent **82**, 643-57.

Naumann M, Blankenstein F, Dietrich T (2005)
Survival of glass fibre reinforced composite post restorations after 2 years-an observational clinical study
J Dent **33**, 305-12.

Naumann M, Lange K-P (2003)
Ansichten und Techniken zur Rekonstruktion endodontisch behandelter Zähne - eine Umfrage unter Zahnärzten im Bundesgebiet.
Dtsch Zahnärztl Z **58**, 280-5.

Nergiz I, Schmage P, Platzer U (1993)
Abzugskraftmessungen bei Wurzelstiften mit verschiedenen Oberflächen
Dtsch Zahnärztl Z **48**, 661-4.

Ngoh EC, Pashley DH, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF (2001)
Effects of eugenol on resin bond strengths to root canal dentin
J Endod **27**, 411-4.

Niedermeier W, Proano P, Özcan M, Mayer B, Nergiz I, Pfeiffer P (1998)
Enorale Reparaturen mit tribochemischen Verbund
Zahnärztl. Mitt. **88**, 954-7.

Nissan J, Dmitry Y, Assif D (2001)
The use of reinforced composite resin cement as compensation for reduced post length
J Prosthet Dent **86**, 304-8.

Nothdurft FP, Pospiech PR (2006)
Clinical evaluation of pulpless teeth restored with conventionally cemented zirconia posts: a pilot study
J Prosthet Dent **95**, 311-4.

O'Keefe KL, Miller BH, Powers JM (2000)
In vitro tensile bond strength of adhesive cements to new post materials
Int J Prosthodont **13**, 47-51.

Oshida Y, Miyazaki M (1996)
Dentin bonding system. Part II: Effect of crosshead speed
Biomed Mater Eng **6**, 87-100.

- Ottl P, Hahn L, Lauer H, Fay M (2002)
Fracture characteristics of carbon fibre, ceramic and non-palladium endodontic post systems at monotonously increasing loads
J Oral Rehabil **29**, 175-83.
- Özcan M, Alkumru HN, Gemalmaz D (2001)
The effect of surface treatment on the shear bond strength of luting cement to a glass-infiltrated alumina ceramic
Int J Prosthodont **14**, 335-9.
- Özcan M, Pfeiffer P, Nergiz I (1998)
A brief history and current status of metal-and ceramic surface-conditioning concepts for resin bonding in dentistry
Quintessence Int **29**, 713-24.
- Özcan M, Vallittu PK (2003)
Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cements to ceramic
Dent Mater **19**, 725-31.
- Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM (1995)
Adhesion testing of dentin bonding agents: a review
Dent Mater **11**, 117-25.
- Patierno JM, Rueggeberg FA, Anderson RW, Weller RN, Pashley DH (1996)
Push-out strength and SEM evaluation of resin composite bonded to internal cervical dentin
Endod Dent Traumatol **12**, 227-36.
- Paul SJ, Werder P (2004)
Clinical success of zirconium oxide posts with resin composite or glass-ceramic cores in endodontically treated teeth: a 4-year retrospective study
Int J Prosthodont **17**, 524-8.
- Perdigao J, Geraldeli S, Lee I, Douglas WH (2001)
Esthetic posts - A study of root retention using a push-out test.
Internal research report, Ivoclar Vivadent, Schaan Liechtenstein.
- Perdigao J, Geraldeli S, Lee IK (2004)
Push-out bond strengths of tooth-colored posts bonded with different adhesive systems
Am J Dent **17**, 422-6.
- Perdigao J, Gomes G, Lee IK (2006)
The effect of silane on the bond strengths of fiber posts
Dent Mater **22**, 752-8.
- Piconi C, Maccauro G (1999)
Zirkonia as a ceramic biomaterial
Biomaterials **20**, 1-25.

- Plueddemann E (1991)
Silane coupling agents New York: Plenum Press.
- Pontius O, Hutter JW (2002)
Survival rate and fracture strength of incisors restored with different post and core systems and endodontically treated incisors without coronoradicular reinforcement
J Endod **28**, 710-5.
- Purton DG, Love RM (1996)
Rigidity and retention of carbon fibre versus stainless steel root canal posts
Int Endod J **29**, 262-5.
- Purton DG, Payne JA (1996)
Comparison of carbon fiber and stainless steel root canal posts
Quintessence Int **27**, 93-7.
- Qualtrough AJ, Mannocci F (2003)
Tooth-colored post systems: a review
Oper Dent **28**, 86-91.
- Robbins JW (2002)
Restoration of the endodontically treated tooth
Dent Clin North Am **46**, 367-84.
- Roberts DH (1970)
The failure of retainers in bridge prostheses. An analysis of 2,000 retainers
Br Dent J **128**, 117-24.
- Rolf KC, Parker MW, Pelleu GB (1992)
Stress analysis of five prefabricated endodontic dowel designs: a photoelastic study
Oper Dent **17**, 86-92.
- Rosen H (1961)
Operative procedures on mutilated endodontically treated teeth
J Prosthet Dent **11**, 973-86.
- Rosentritt M, Furer C, Behr M, Lang R, Handel G (2000)
Comparison of in vitro fracture strength of metallic and tooth-coloured posts and cores
J Oral Rehabil **27**, 595-601.
- Ruemping DR, Lund MR, Schnell RJ (1979)
Retention of dowels subjected to tensile and torsional forces
J Prosthet Dent **41**, 159-62.
- Sahafi A, Peutzfeld A, Asmussen E, Gotfredsen K (2004)
Effect of surface treatment of prefabricated posts on bonding of resin cement
Oper Dent **29**, 60-8.

Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K (2003)
Bond strength of resin cement to dentin and to surface-treated posts of titanium alloy, glass fiber, and zirconia
J Adhes Dent **5**, 153-62.

Schönbrodt M, Schmäge P, Nergiz I, Platzer U (2003)
Bond strengths of tooth colored root posts depending on surface conditioning and cement
Dtsch Zahnärztl Z **58**, 55-8.

Schwartz RS, Robbins JW (2004)
Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review
J Endod **30**, 289-301.

Sidoli GE, King PA, Setchell DJ (1997)
An in vitro evaluation of a carbon fiber-based post and core system
J Prosthet Dent **78**, 5-9.

Simon MHP, Paffrath J (1995)
Neue Perspektiven zur vollkeramischen Stabilisierung und zum Aufbau devitaler Zähne
Quintessence **46**, 1085-101.

Solnit GS (1991)
The effect of methyl methacrylate reinforcement with silane-treated and untreated glass fibers
J Prosthet Dent **66**, 310-4.

Soltész U, Baudendistel E (1990)
Konzepte zur Ermittlung der Festigkeit des Verbundes Knochen-Implantat
Wiss Ber W 1/90, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg.

Sorensen JA, Engelman MJ (1990)
Effect of post adaptation on fracture resistance of endodontically treated teeth
J Prosthet Dent **64**, 419-24.

Sorensen JA, Martinoff JT (1984)
Intracoronar reinforcement and coronal coverage: a study of endodontically treated teeth
J Prosthet Dent **51**, 780-4.

Standlee JP, Caputo AA (1992)
Endodontic dowel retention with resinous cements
J Prosthet Dent **68**, 913-7.

Standlee JP, Caputo AA (1992)
The retentive and stress distributing properties of split threaded endodontic dowels
J Prosthet Dent **68**, 436-42.

- Standlee JP, Caputo AA, Hanson EC (1978)
Retention of endodontic dowels: effects of cement, dowel length, diameter, and design
J Prosthet Dent **39**, 400-5.
- Stern N, Hirshfeld Z (1973)
Principles of preparing endodontically treated teeth for dowel and core restorations
J Prosthet Dent **30**, 162-5.
- Stiefenhofer A, Stark H, Hackhofer T (1994)
Biomechanische Untersuchungen von Stiftaufbauten mit Hilfe der Finiten-Elemente-Analyse
Dtsch Zahnärztl Z **49**, 711-5.
- Stockton LW (1999)
Factors affecting retention of post systems: a literature review
J Prosthet Dent **81**, 380-5.
- Strub J, Türp JC, Blatz MB, Heydecke G (1999)
Vorbehandlung. Aufbau vitaler und avitaler Pfeilerzähne.
In B Koeck ed. Praxis der Zahnheilkunde. Kronen- und Brückenprothetik.; pp. 63-9. München: Urban und Fischer.
- Sudsangiam S, van Noort R (1999)
Do dentin bond strength tests serve a useful purpose?
J Adhes Dent **1**, 57-67.
- Testori T, Badino M, Castagnola M (1993)
Vertical root fractures in endodontically treated teeth: a clinical survey of 36 cases
J Endod **19**, 87-91.
- Thorsteinsson TS, Yaman P, Craig RG (1992)
Stress analyses of four prefabricated posts
J Prosthet Dent **67**, 30-3.
- Tiller HJ, Musil R, Garschke A, Göbel R, Sachse R (1984)
Eine neu Technologie zur Herstellung des Verbundes Kunststoff-Metall in der Zahnheilkunde.
Zahnärztl. Welt **93**, 768.
- Tjan AH, Grant BE, Dunn JR (1991)
Microleakage of composite resin cores treated with various dentin bonding systems
J Prosthet Dent **66**, 24-9.
- Torbjorner A, Karlsson S, Odman PA (1995)
Survival rate and failure characteristics for two post designs
J Prosthet Dent **73**, 439-44.

- Valandro LF, Della Bona A, Antonio Bottino M, Neisser MP (2005)
The effect of ceramic surface treatment on bonding to densely sintered alumina ceramic
J Prosthet Dent **93**, 253-9.
- Van Meerbeek B, De Munck J, Yoshida Y et al. (2003)
Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges
Oper Dent **28**, 215-35.
- Van Noort R, Noroozi S, Howard IC, Cardew G (1989)
A critique of bond strength measurements
J Dent **17**, 61-7.
- Vano M, Goracci C, Monticelli F et al. (2006)
The adhesion between fibre posts and composite resin cores: the evaluation of microtensile bond strength following various surface chemical treatments to posts
Int Endod J **39**, 31-9.
- Versluis A, Tantbirojn D, Douglas WH (1997)
Why do shear bond tests pull out dentin?
J Dent Res **76**, 1298-307.
- Vichi A, Ferrari M, Davidson CL (2000)
Influence of ceramic and cement thickness on the masking of various types of opaque posts
J Prosthet Dent **83**, 412-7.
- Vichi A, Grandini S, Ferrari M (2001)
Clinical procedure for luting glass-fiber posts
J Adhes Dent **3**, 353-9.
- Völlm L (1989)
Rocatec-Ein neues Verbundsystem für die Kunststoffverblendtechnik.
dental-labor **37**, 527-35.
- Wada T (1986)
Development of a new adhesive material and its properties.
In: Gettleman L, Vrijhoef MMA, Uchiyama Y, editors. Proceedings of the International Symposium on Adhesive Prosthodontics, 1986 June 24. Amsterdam, Netherlands. Chicago: Academy of Dental Materials,, 9-18.
- Watanabe I, Nakabayashi N (1994)
Measurement methods for adhesion to dentine: the current status in Japan
J Dent **22**, 67-72.
- Wegner SM, Kern M (2000)
Long-term resin bond strength to zirconia ceramic
J Adhes Dent **2**, 139-47.

Weine FS, Wax AH, Wenckus CS (1991)
Retrospective study of tapered, smooth post systems in place for 10 years or more
J Endod **17**, 293-7.

Wirz J, Christ R (1982)
Korrosionserscheinungen an Schrauben und Stiften bei Zahnaufbauten- eine In-vitro-Studie
Schweiz Monatsschr Zahnmed **92**, 408.

Wong B, Utter JD, Miller BH, Ford JP, Guo IY (1995)
Retention of prefabricated posts using three different cementing procedures
J Dent Res **74**, 181.

Zalkind M, Hochman N (1998)
Esthetic considerations in restoring endodontically treated teeth with posts and cores
J Prosthet Dent **79**, 702-5.

Zillich RM, Corcoran JF (1984)
Average maximum post lengths in endodontically treated teeth
J Prosthet Dent **52**, 489-91.

11 Anhang

11.1 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| E-Modul | Elastizitätsmodul |
| % | Prozent |
| ZrO ₂ | Zirkoniumdioxid |
| Gew.-% | Gewichtsprozent |
| Y ₂ O ₃ | Yttriumoxid |
| µm | Mikrometer |
| UV-Licht | ultraviolettes Licht |
| mm | Millimeter |
| TEGDMA | Triethylen-Glycol-Dimethacrylat |
| HEMA | Hydroxy-Ethyl-Methacrylat |
| UDMA | Urethandimethacrylat |
| N | Newton |
| mm ² | Quadratmillimeter |
| Ba | Barium |
| Al | Aluminium |
| g | Gramm |
| cm ³ | Kubikzentimeter |
| HV | Vickershärte |
| MPa | Mega-Pascal |
| M | Weibull-Modul |
| GPa | Giga-Pascal |
| √ | Wurzel aus |
| WAK | Wärmeausdehnungskoeffizient |
| K | Kelvin |
| mg | Milligramm |
| Bq | Becquerel |
| HfO ₂ | Hafniumoxid |
| Al ₂ O ₃ | Aluminiumoxid |
| µg | Mikrogramm |

11.2 Technische Daten der Wurzelkanalstifte

Tab. 11.1: Eigenschaften des CosmoPost-Wurzelstiftes (Ivoclar-Vivadent-AG 2003)

| Eigenschaft | Einheit | Wert |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|
| Dichte | g/cm ³ | > 6,065 |
| Porosität | % | 0 |
| Mittlere Korngröße | µm | < 0,4 |
| Vickers-Härte | HV | 1200 |
| Druckfestigkeit | MPa | 2000 |
| 4-Punkt-Biegefestigkeit | MPa | 1100 |
| Weibull-Modul | M | 10-17 |
| Elastizitätsmodul | GPa | 210 |
| Risszähigkeit | MPa·√m | 8 |
| WAK(373-773K) | µm/(m·K) | 10±1,0 |
| Korrosionsbeständigkeit | mg/(m ² ·24h) | < 0,1 |
| Oberflächenrauigkeit | µm | > 0,4-0,8 |
| Uran-Aktivität | Bq/g | < 0,005 |
| Thorium-Aktivität | Bq/g | < 0,003 |

Tab. 11.2: Zusammensetzung des CosmoPost-Wurzelstiftes (Ivoclar-Vivadent-AG 2003)

| | | |
|---|--------|---------|
| ZrO₂ + HfO₂ + Y₂O₃ | Gew.-% | > 90 |
| Y₂O₃ | Gew.-% | 4,5-5,4 |
| HfO₂ | Gew.-% | < 5 |
| Al₂O₃ | Gew.-% | < 0,5 |

Tab. 11.3: Eigenschaften des FRC Postec-Wurzelstiftes (Ivoclar-Vivadent-AG 2001)

| Eigenschaft | Einheit | Wert |
|--------------------------|--------------------|-------------|
| Biegefestigkeit | N/mm ² | 1390 ± 17 |
| Biegemodul | N/mm ² | 45000 ± 500 |
| Wasseraufnahme | µg/mm ² | 18 ± 0,8 |
| Wasserlöslichkeit | µg/mm ² | 0,8 ± 0,25 |

Tab. 11.4: Zusammensetzung des FRC Postec-Wurzelstiftes (Ivoclar-Vivadent-AG 2001)

| | | |
|---|--------|------|
| Triethylenglycoldimethacrylat | Gew.-% | 7,6 |
| Urethandimethacrylat | Gew.-% | 18,3 |
| Hochdisperses Siliziumdioxid | Gew.-% | 0,9 |
| Ytterbiumfluorid | Gew.-% | 11,4 |
| Katalysatoren und Stabilisatoren | Gew.-% | <0,3 |
| Glasfasern | Gew.-% | 61,5 |

11.3 Materialliste

Mat. 1 Akrylglasplatte; Technische Abteilung, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland

Mat. 2 Astralis 10; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 3 Band-Trennschleifsystem, Fa. Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland

Mat. 4 Clearfil Core; Fa. Kuraray Europe/Dental-Depots, Ackerstrasse 1, Duisburg

Mat. 5 CoJet-System ; Fa. 3M Espe, Seefeld, Deutschland

Mat. 6 Corel Draw 12.0; Fa. Corel Corporation, Unterschleißheim, Deutschland

Mat. 7 CosmoPost; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 8 CosmoPost-Kanalbohrer Ø 1.7 mm (schwarz); Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 9 Dento-Prep; Fa. Rønvig, Kopenhagen, Dänemark)

Mat. 10 Durchlichtmikroskop 60318; Fa. Zeiss, Oberkochen, Deutschland

Mat. 11 Ed Primer; Fa. Kuraray, Okayama, Japan

Mat. 12 Espe Sil; Fa. 3M Espe, Seefeld, Deutschland

Mat. 13 Excite DSC; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 14 Frästisch; Technische Abteilung, Charité–Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland

Mat. 15 FRC Postec ; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 16 FRC Postec-Kanalbohrer Ø 2,0 mm (rot); Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 17 20% Isopropanol, Apotheke, Charité-Universitätsmedizin, Berlin, Deutschland

Mat. 18 Lentulo L; Fa. VDW-Antaeos, München Deutschland

Mat. 19 Mikrometerschraube; Fa. Mitutoyo Messgeräte GmbH, Neuss, Deutschland

Mat. 20 Monobond S; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 21 Multilink ; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 22 Multilink Primer A&B; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

- Mat. 23 Natriumchlorid 0,9 % Lösung; Fa. DeltaSelect GmbH, Pfullingen, Deutschland
- Mat. 24 New Bond; Fa. Kuraray, Okayama, Japan
- Mat. 25 Panavia™ F; Fa. Kuraray, Okayama, Japan
- Mat. 26 Parallelfräsgesät F1; Fa. Degussa, Hanau, Deutschland
- Mat. 27 PermaFlo DC; Fa. Ultradent Products Inc., South Jordan, Utah, USA
- Mat. 28 PermaFlo DC Primer A&B; Fa. Ultradent Products Inc., South Jordan, Utah, USA
- Mat. 29 Rasterelektronenmikroskop Can Scan Maxim 2040; Fa. Electron Optics LTD, Cambridge. Großbritannien
- Mat. 30 RelyX™ Unicem; Fa. 3M Espe, Seefeld, Deutschland
- Mat. 31 Schleifpapier Körnung 500, 1200, 2500, 4000; Fa. Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland
- Mat. 32 Schleif- und Poliermaschine Phoenix Alpha; Fa. Wirtz-Buehler, Düsseldorf, Deutschland
- Mat. 33 Sekundenkleber Artikel-Nr. 1733, Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland
- Mat. 34 Siliziumkarbid-Naßschleifpapier; Fa. Wirtz-Buehler, Düsseldorf, Deutschland
- Mat. 35 SPSS 12.0 für Windows; Fa. SPSS GmbH, München, Deutschland
- Mat. 36 Stereomikroskop, Axioplan; Zeiss, Oberkochen, Deutschland
- Mat. 37 Technovit 4071; Fa. Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland
- Mat. 38 Teflonform; Technische Abteilung, Charité–Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland
- Mat. 39 Tetric Ceram; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein
- Mat. 40 Thymol 1 %; Fa. Merck, Darmstadt, Deutschland
- Mat. 41 Total Etch, Ätzgel; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein
- Mat. 42 Trennscheibe Transvident P-66120; Fa. Hopf, Ringleb & Co. GmbH & Cie., Berlin, Deutschland
- Mat.43 Universalprüfmaschine Z 010; Fa. Zwick GmbH & Co. Kg, Ulm, Deutschland
- Mat. 44 Variolink II Befestigungskomposit; Fa. Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein

Mat. 45 Vaseline 701; Fa RS Components GmbH, Bad Hersfeld, Deutschland

12 Danksagung

Herrn Professor Dr. A. M. Kielbassa danke ich für die Annahme des Dissertationsthemas, die wissenschaftliche Betreuung und die Erstellung des Erstgutachtens.

Frau OÄ Dr. K. Bitter (Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie) danke ich für die freundliche und hilfreiche Betreuung während der Erstellung der vorliegenden Arbeit.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. P. Martus (Institut für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie) für die Beratung bei der statistischen Auswertung. Des Weiteren danke ich Frau G. Bölling (Abteilung für experimentelle Zahnheilkunde) für die Unterstützung bei der Bedienung der Zwickmaschine.

Besonders verbunden bin ich außerdem meinem Freund und Kollegen Jaimy Peter Kanjuparambil, der mich während der gesamten Zeit unterstützt hat.

Abschließend möchte ich meinen Eltern, meinen Geschwistern und all meinen Freunden für ihre fortwährende Motivation und Unterstützung danken.

„Mein Lebenslauf wird aus Datenschutzgründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.“

14 Erklärung an Eides Statt

„Ich, Karsten Werner Priehn, erkläre, dass ich die vorgelegte
Dissertationsschrift mit dem Thema: **Einfluss der Oberflächenbehandlung
auf die Haftung unterschiedlicher Befestigungskomposite an
zahnfarbenen Wurzelkanalstiften**

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.“

22.04.2008

Karsten Werner Priehn