Aus der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie des
Departments für Zahnheilkunde des
Universitätsklinikums Ulm
Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. med. dent. Bernd Haller

In-vitro-Untersuchung der Haftfestigkeit von adhäsiv befestigten faserverstärkten Kompositstiften im Wurzelkanal

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

vorgelegt von
Dima Haj-Omer
aus Latakia, Syrien

2007

Amtierender Dekan: Prof. Dr. Klaus-Michael Debatin
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Bernd Haller
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Ralph G. Luthardt
Tag der Promotion: 24. 04. 2008

Inhaltsverzeichnis

Abküzungsverzeichnis III
1. Einleitung 1
1.1. Einführung 1
1.2. Theoretische Grundlagen 2
1.2.1. Arten der Stiftverankerungen 2
1.2.2. Anforderungen an ein Stiftaufbausystem 2
1.2.3. Stiftlänge 3
1.2.4. Stiftform und Oberfläche 3
1.2.5. Stiftmaterial 5
1.2.6. Befestigung von Stiftaufbauten aus faserverstärktem Komposit im Wurzelkanal 7
1.3. Grundlagen und Wirkungsweise von Adhäsivsystemen 9
1.3.1. Konditionierung 9
1.3.2. Primer 10
1.3.3. Adhäsiv 10
1.4. Aufbaurestaurationen aus Komposit 11
1.5. Problemstellung 13
2. Material und Methode 14
2.1. Allgemeines 14
2.2. Herstellung der Proben 14
2.2.1. Vorbereitung der Testzähne 14
2.2.2. Sägen der Zähne und Vorbereitung der Wurzelkanäle 14
2.3. Befestigung der Wurzelstifte 15
2.3.1. Silanbehandlung der Wurzelstifte 16
2.3.2. Dyract Cem plus 17
2.3.3. Variolink II 18
2.3.4. Panavia F 2.0 19
2.3.5. RelyX Unicem 20
2.3.6. Entfernung der Zementüberschüsse 21
2.4. Herstellung des Aufbaus 21
2.5. Herstellung der Prüfkörper für den Ausstoßversuch 21

2.5.1. Einbetten der Proben 21
2.5.2. Sägen und Polieren der Probenscheiben 22
2.6. Messung der Verbundfestigkeit 23
2.6.1. Verankerung der Stifte in den Wurzelkanälen 23
2.6.2. Verankerung der Stifte im Aufbaukomposit 24
2.7. Untersuchung der Verbundflächen 24
2.8. Statistische Auswertung 25
3. Ergebnisse 26
3.1. Haftfestigkeitsmessungen 26
3.1.1. Allgemeines 26
3.1.2. Verankerung der faserverstärkten Kunststoffstifte in den Wurzelkanälen 26
3.1.3. Verankerung der faserverstärkten Kunststoffstifte im Aufbaukomposit (Multicore HB) 30
3.2. Analysen der Trennflächen im Rasterelektronenmikroskop (REM) 33
3.2.1. Trennflächen nach Ausstoßen der Stifte aus den Wurzelkanälen 33
3.2.2. Trennflächen nach Ausstoßen der Stifte aus dem Aufbaukomposit 50
4. Diskussion 58
4.1. Diskussion der Methode 58
4.1.1. Verwendete Zähne 58
4.1.2. Ausstoßversuch 58
4.1.3. Auswahl der Stifte 59
4.1.4. Auswahl der Befestigungssysteme 60
4.1.5. Silanisierung der Stifte 60
4.2. Besprechung der Ergebnisse 61
4.2.1. Einfluss der Silanbehandlung 61
4.2.2. Einfluss der Stifte 63
4.2.3. Einfluss der Befestigungssysteme 65
4.3. Schlussfolgerungen 67
5. Zusammenfassung 69
6. Literaturverzeichnis 71
7. Anhang 81
8. Danksagung 84

Abküzungsverzeichnis

A: Asitone
Bis-GMA: Bisphenol-A-bis-(2-Hydroxy-3- methacryloxypropyl) ether
BAG: Bariumglas
BAFSG: Ba-AL-Fluorsilkatglas
CAMM: Carbonsäuremodifizierte Markromonomere
CAHF: Cetylaminhydrofluorid
DMAH: Dimethacrylat-Harze
DMA: Dimethacrylat
DT: Double Taper
DTLP: Double Taper Light Post
DTWP: Double Taper White Post
DYC: Dyract Cem Plus
FIASD: Funktionalisiertes amorphes Silicumdioxid
FRCP: Glass Fibre reinforced Composite Postec
GL: Gläser
HDSDO: Hochdisperses Silicumdioxid
HEMA: 2- Hydroxymethylmethacrylat
I-S: Initiatoren-Stabilisatoren
L-I: Lichtinitiatoren
MA: Methacrylate
MDP: 10- Methacryloyloxydecyl-Di-Hydrogenphosphat
MPMA: Mehrfachfunktionelle Phosphorsäuremethacrylat
PAA: Phosphorsäureacrylat
PAF: Panavia F 2.0
PENTA: Dipentaerytritolpentacrylat-Phosphorsäure-Monomer
PI: Polymerisationsinitiator
PIG: Pigmente
PMPM: Phosphatmodifizierte polymerisierbare Monomere
REM: Rasterelektronenmikroskop
REX: RelyX Unicem
R-V: Reaktiv- Verdünner
SAS: Strontium-Aluminium-Silkat-Glas

S: Stabilisatoren

SMO: Sphäroides Mischoxid

TMA: Trimethacrylat

TEGDMA: Triethylenglycoldimethacrylat

TID: Titandioxid

UDMA: Urethandimethacrylat

V II: Variolink II

YTF: Ytterbiumtrifluorid

5-NMSA: N-Methacryloyl-5-Aminosalicylsäure

1. Einleitung

1.1. Einführung

Im Rahmen zunehmender konservierender Therapiemaßnahmen steigt auch die Anzahl der endodontischen Behandlungen. Die Schwächung des Dentins durch die Eröffnung und Entfernung des Pulpakavumdaches, der Substanzverlust durch die Kanalaufbereitung und die Gefahr einer okklusalen Überlastung als Resultat der verringerten Innervation devitaler Zähne können Frakturen in der weiteren Gebrauchsperiode verursachen (RANDOW u. GLANTZ 1986). Besonders bei wurzelbehandelten Frontzähnen, die vor allem auf Scherkraft belastet werden, stellen Frakturen eine wesentliche Ursache für einen Verlust dar (ATTIN et al.1994).
Um einen avitalen Zahn mit völligem koronalem Substanzverlust durch Überkronung erhalten zu können, muss dieser nach abgeschlossener endodontischer Behandlung zweckmäßig versorgt werden. Demzufolge erfordern stark zerstörte endodontisch behandelte Zähne speziell im Fall einer Überkronung eine Restauration, die durch einen Stiftaufbau im Wurzelkanal mehr Retention bietet. In diesem Zusammenhang werden eine Vielzahl von Möglichkeiten und Konzepten vorgeschlagen (STOCKTON 1999, BATEMAN et al. 2003, SCHWARZ u. ROBBINS 2004). Durch Fortschritte im Bereich der Adhäsivtechnik und der Entwicklung von Faserverbundstoffen eröffneten sich neue Rekonstruktionsmöglichkeiten für wurzelkanalbehandelte Zähne (WRBAS et al. 2006).
Eine wichtige Voraussetzung für den Erhalt des mit einem Wurzelstift versorgten Zahnes ist eine dauerhafte und stabile Befestigung des Stiftes im Wurzelkanal. Dafür stehen sowohl konventionelle Zemente als auch adhäsive Befestigungssysteme zur Verfügung.
Zur Erhöhung der Retention der nachfolgenden prothetischen Versorgungen dienen Aufbaumaterialien, die auf den Stiftkopf als Ersatz der Zahnhartsubstanz aufgebaut werden.

1.2. Theoretische Grundlagen

1.2.1. Arten der Stiftverankerungen

Zur Stabilisierung bzw. zum Aufbau gesunder Restzahnhartsubstanz werden drei Möglichkeiten der Restauration unterschieden:

1.2.1.1 Individuelle Stiftaufbauten

In Bezug auf den Fertigungsprozess wird unterschieden zwischen individuell gegossenen und kopiegefrästen Stiftaufbauten. Beide können nach der direkten oder der indirekten Methode hergestellt werden. Beim erstgenannten Verfahren wird der Kernaufbau im Mund des Patienten modelliert und anschließend im zahntechnischen Labor gegossen bzw. kopiegefräst. Bei der indirekten Variante wird die präparierte Kavität abgeformt und im Labor ein Sägestumpfmodell erstellt. Die Herstellung der Aufbauten erfolgt bei dem indirekten Verfahren anschließend durch den Zahntechniker. Beim individuellen gegossenen Stiftaufbau bestehen der Stift und der Aufbau aus demselben Material.

1.2.1.2 Halbkonfektionierte Stiftaufbauten

Es liegt lediglich der Wurzelstift maschinell gefertigt vor. Die Stifte werden heute von der Dentalindustrie als Metall-, Keramik- und Karbonfaser- bzw. Glasfaserstifte angeboten. Der Aufbau wird individuell gefertigt. Dies kann in einer Sitzung im Mund des Patienten mit einem plastischen Aufbaumaterial oder durch Angießen von Metall bzw. durch Anpressen von Keramik im Labor geschehen. Plastische Aufbaumaterialien können z.B. Komposit oder Glasionomerzement sein.

1.2.1.3 Vollkonfektionierte Stiftaufbauten

Wurzelstift und Aufbau liegen maschinell gefertigt vor. Demzufolge wird auch der Aufbau nicht individuell angefertigt, sondern besteht aus einem ebenfalls genormten Werkstück.

1.2.2. Anforderungen an ein Stiftaufbausystem

Damit ein Stiftsystem den Belastungen in der Mundhöhle standhalten kann, werden besondere Anforderungen an das Verankerungselement gestellt.
WIRZ et al. (1980, 1983, 1987) fordern:

1) Das Aufbaumaterial muss am Stiftkopf retentiv verankert werden können.

2) Die Stiftform und das aufbereitete Kanallumen sollten formkongruent sein, damit ein exakt wandständiger Sitz des Stiftes im Kanal gewährleistet werden kann.

3) Im Falle von Metallstiften muss die Legierung eine hohe elektrochemische Resistenz aufweisen (Korrosionsresistenz).

4) Die Stiftsysteme sollten gute mechanische Eigenschaften besitzen.

Diese allgemeinen Anforderungen gelten auch für metallfreie Stiftaufbausysteme.

1.2.3. Stiftlänge

Die Stiftlänge ist entscheidend für die Retention des Wurzelstiftes (LEHMANN u. HELLWIG 1993). Aus Stabilitätsgründen muss die Stiftlänge mindestens der Länge der Zahnkrone entsprechen (Kraftarm = Lastarm) (SCHMEISSNER 1972,1979,1983, KESSLER 1982, KANTOR u. PINES 1977). Wünschenswert wäre jedoch eine Verankerungstiefe von 1/2 bis 2/3 der Wurzellänge, da sich mit zunehmender Länge die Widerstandskraft erhöht (LOVEDAHL u. NICHOLLS 1977). Der optimale Abstand zwischen Stiftspitze und Apex beträgt vier Millimeter. Er kann jedoch bei längeren Wurzeln auch größer sein. Dieser Mindestabstand soll verhindern, dass bei der Stiftinsertion Wurzelkanalfüllungsmaterial über den Apex hinausgetrieben wird. Bezüglich der Stiftlänge im Wurzelkanal gibt es seitens der Hersteller unterschiedliche Empfehlungen. Der Hersteller der glasfaserverstärkten Kompositstifte FRC Postec (Ivoclar Vivadent) empfiehlt, dass die Stiftlänge mindestens der koronalen Länge der späteren Versorgung entsprechen muss. Der Hersteller der quarzfaserverstärkten Kunststoffstifte DT White Post und DT Light Post (VDW) fordert, dass die Länge des Stiftes im Kanal dem Zweifachen der koronalen Länge des Stumpfaufbaus entsprechen soll.

1.2.4. Stiftform und Oberfläche

Die Stiftform sollte anhand der klinischen Gegebenheit so gewählt werden, dass mit einem Minimum an Substanzabtrag ein Maximum an Retention erreicht werden kann. Man unterscheidet zwischen konischen, zylindrischen, und zylindrisch-konischen Stiften. Sie gehören zur Gruppe der passiven Stiftsysteme, d.h. ohne Kontakt zur Oberfläche des Wurzeldentins. Weiterhin gibt es die aktiven Stiftsysteme

oder auch Gewindestifte. Die schraubenähnlichen Metallstifte, z.B. solche mit selbstdrehendem Gewinde, werden direkt im Wurzelkanal verschraubt. Aktive Stifte mit Gewinde und mit zylindrischer Geometrie erreichen die höchsten Retentionswerte (STANDLEE et al. 1978, KURER et al.1977, RUEMPING et al.1979). Die gesamte aktuelle Fachliteratur bezeichnet diese Stifte jedoch als nicht zufrieden stellend. Das größte klinische Problem besteht bei diesen Wurzelstiften im hohen Risiko von Wurzellängsfrakturen. Die Frakturen können in der Verschraubungsphase des Stiftes an der Wurzel verursacht werden oder als Folge funktioneller Kaubelastungen entstehen (ROULET u. DEGRANGE 2000). Auch (STANDLEE et al. 1992) bestätigen, dass Stifte mit Gewinde im Vergleich zu andern Stiftsystemen höhere Spannungskonzentrationen innerhalb der Wurzel verursachen. Aktive Stifte sollten daher nach Möglichkeit nicht mehr verwendet werden.

Zylinder besitzen unter dem Gesichtpunkt der Retention im Wurzelkanal klare Vorteile (CAPUTO u STANDLEE 1987). Passive zylindrische Stifte sollten aufgrund der besseren Retention den konischen Stiften vorgezogen werden, wenn die Stiftlänge geringer als die Kronenlänge ist (SORENSEN u. MARTINOFF 1984). Problematisch ist jedoch das apikale Stiftende, wo ein erhöhtes Perforationsrisiko der in diesem Bereich dünnen Dentinwände besteht (ASSIF u. GORFIL 1994). Berücksichtigt man die Anatomie einer Wurzel, wird trotz der besseren Retention von zylindrischen Stiften eine konische Form immer die gefahrlosere Aufbereitung ermöglichen (SIMON 1997). Auch ASSIF et al. (1989) und PAO u. RENHARDT (1987) geben an, dass die Verjüngung der konischen Stifte den anatomischen Gegebenheiten eher gerecht wird. Konische Stifte erzeugen demnach apikal weniger Stress und die sensible Zahnsubstanz in diesem Bereich wird erhalten. Passive konische Wurzelstifte folgen besser der Wurzelform und gewährleisten somit eine gleichmäßigere Kraftübertragung (DIETSCHI et al. 1997, EDELHOFF et al. 2000). Die Haftfestigkeit passiver konischer Stifte ist geringer als die aktiver oder zylindrischer Stifte. Die Retention im Wurzelkanal kann allerdings durch die Wahl des Befestigungsmaterials sowie der Oberflächenbehandlung des Stifts bzw. der Wurzelkanalwand gesteigert werden (NERGIZ et al. 1993, 1997, 2001, ROSENSTIEL et al. 1998). Eine Kombinationsform, auch Hybridform genannt, stellt die zylindrisch-konische Stiftform dar. Die bessere Retention eines Zylinders (koronal) soll mit der anatomisch vorteilhafteren Konusform (apikal) vereint werden. General zeigen Stiftsysteme mit strukturierten Oberflächen im In-vitro-Versuch

signifikant höhere Haftwerte als solche mit glatten Oberflächen (ROSIN et al. 2001). Früher Untersuchungen von NERGIZ et al. (1993, 1997) bestätigen, dass niedrigere Oberflächenrauigkeiten mit geringen mechanischen Haftfestigkeiten einhergehen. Die angeraute, sandgestrahlte Stiftoberfläche erhöht durch die Verstärkung der Mikroverzahnung mit dem Befestigungszement die Retention im Wurzelkanal (WIRZ et al. 1987). Bei Verwendung von faserverstärkten Kunststoffstiften wird die Silanisierung der Stiftoberflächen empfohlen. Bei diesen aktuellen Faserstiften sowie den keramischen Stiftaufbausystemen finden sich nur zylindrische, konische oder zylindrokonische Stiftformen. Schraubenformen sind nicht notwendig, da die Verankerung des Stifts über den adhäsiven Haftverbund erreicht werden kann.

1.2.5. Stiftmaterial

1.2.5.1 Allgemeines

Eine Einteilung von Wurzelkanalstiften und Aufbausystemen kann nach dem Material erfolgen (LAUER et al. 1996). Die Wahl des Stiftsystems kann das spätere Erscheinungsbild nach prothetischer Versorgung beeinflussen. Hierbei spielt insbesondere das Material eine große Rolle, wobei zwischen Stiftsystemen aus Metall (Edelmetall, Stahl, Titan), Keramik und faserverstärktem Komposit unterschieden werden kann.

1.2.5.2 Metallische Stifte

Durch den Einsatz metallischer Stiftsysteme kann es über Korrosion an Stift und/oder Aufbau zur Einlagerung von Zersetzungsprodukten in dentale und parodontale Gewebe kommen, die Verfärbungen oder Entzündungen nach sich ziehen können (WIRZ 1983, WIRZ u. CHRIST 1982). Der dunkle Charakter metallischer Strukturen beeinträchtigt das Aussehen der umgebenden Hart- und Weichgewebe, sobald Licht in der Eigenfarbe der Aufbaumaterialien in die umgebenden Gewebe reflektiert wird (RIEDLING u. KAPPERT 1988).

Weiterhin waren Misserfolge wie häufige Wurzelfrakturen, Dezementierungen bzw. Lockerungen der Stifte (STANDLEE et al. 1978, TRABERT et al. 1978) der Grund für die Entwicklung neuer biokompatibler Stiftverankerungen, welche die funktionellen und ästhetischen Anforderungen besser erfüllen können (MARTELLI 2002).

1.2.5.3 Metallfreie Stifte

1.2.5.3.1 Allgemeines

Zur ästhetischen Rekonstruktion mit vollkeramischen Kronen stehen zahnfarbene Wurzelstifte zur Verfügung. Diese bestehen aus Zirkonoxidkeramik bzw. quarz- oder glasfaserverstärktem Komposit und sorgen für eine "natürliche" Lichttransmission bzw. Lichtreflexion. Um diesen Effekt zu erhalten, wird der Einsatz adhäsiver Befestigungsmaterialien in Kombination mit den neuen Stiftsystemen empfohlen (FERRARI et al. 2000a). Der Stift wird in dieser Technik passiv mit chemisch härtenden oder dualhärtenden Kompositzementen im präparierten Wurzelkanal befestigt. Die nichtmetallischen Stifte sind aus biomechanischer Sicht als "zahnverträglicher", und auch als ästhetisch günstiger gegenüber den Metallstiften zu bewerten (SIGNORE et al. 2001).

1.2.5.3.2 Keramikstifte

Konfektionierte Keramikstifte bestehen aus Zirkonoxidkeramik, die eine hohe Biegefestigkeit besitzt (NERGINZ u. SCHMAGE 2004).
Bei vollkeramischen Stiften aus Zirkonoxid besteht auf Grund des sehr harten, unelastischen Werkstoffs die erhöhte Gefahr eines Auftretens von Spannungsspitzen mit der Folge eines gesteigerten Risikos für Wurzelfrakturen. Die Stifte mit höherem Elastizitätsmodul verursachen mit größerer Wahrscheinlichkeit Wurzelfrakturen (SIGNORE et al. 2001).
Bei Komplikationen sind diese adhäsiv befestigten Stifte auf Grund ihrer hohen Härte ohne großen und zumeist irreparablen Schaden für die Zahnwurzel praktisch nicht mehr zu entfernen.

1.2.5.3.3 Faserverstärkte Kompositstifte

Faserverstärkte Kompositstifte bestehen aus Karbonfasern oder Quarz-Glasfasern, die in einer Epoxidharzmatrix eingebettet sind.
Anfang der Neunzigerjahre begann die Entwicklung von Wurzelkanalstiften aus karbonfaserverstärkten Kompositmaterialien. Da die schwarzen Stifte mit den hohen Erwartungen an die ästhetischen Ergebnisse dieser Versorgungen nicht zu vereinbaren sind (NERGINZ u. SCHMAGE 2004), finden sie heute nur noch wenig Anwendung (BATEMANN et al. 2003, FERRARI u. SCOTTI 2004). Ende der Neunzigerjahre wurden Glasfaserstifte entwickelt und auf den Markt gebracht.

Glasfaserstifte bestehen aus Glasfasern, die in einer Komposit- oder Epoxidharzmatrix eingebettet sind. Eine neuere Variante sind Glasfasern in einer nicht polymerisierten Kompositmatrix. Der Stift ist zunächst flexibel und soll sich mit adhäsiven Befestigungskompositen verbinden können (MANNOCCI et al 2005). Glasfaserverstärkte Wurzelkanalstifte werden aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften unter den derzeit zur Verfügung stehenden Materialien von einigen Autoren favorisiert (MANNOCCI et al. 1999, FERRARI u. SCOTTI 2004). Die Vorteile von glasfaserverstärkten Stiftmaterialien wie deren Zahnfarbe, Transluzenz, mechanische Belastbarkeit, Revidierbarkeit sowie das verringerte Risiko einer Reinfektion durch die Zeit und Kosten sparende Chair-side-Behandlung werden immer wieder diskutiert (BATEMANN et al. 2003, SCHWARTZ u. ROBBINS 2004).
Die Entwicklung der Faserverbundwerkstoffe verfolgte das Ziel, ihr elastisches Verformungsverhalten der Funktionalität und der Struktur des Empfängergewebes anzupassen, um Dehnungsdifferenzen zwischen Faserverbundwerkstoff und Gewebe zu minimieren (WINTERMANTEL 1996). Neben dem dentinähnlichen biomechanischen Verhalten sind Glasfaserstifte aufgrund ihres Aufbaus in der Lage, Licht zu leiten. Die Fasern der Wurzelstifte weisen eine unidirektionale Anordnung auf, die gewählt wurden, um das Polymerisationslicht direkt in den Wurzelkanal zu leiten und dort die Polymerisation des Befestigungskomposits auszulösen bzw. zu unterstützen (NAUMANN 2002). Die geometrische Form der Glasfaserstifte nimmt Einfluss auf den Grad der Aushärtung des Befestigungskomposits und damit indirekt auf die Haftung im Wurzelkanal (PATYK et al. 2005). Bei den neuesten Faserstiften bestehen die inkorporierten Fasern aus Quarz.

1.2.6. Befestigung von Stiftaufbauten aus faserverstärktem Komposit im Wurzelkanal

1.2.6.1 Konventionelle Befestigung

Unter einer konventionellen Befestigung ist die Befestigung ohne Nutzung spezieller Adhäsivsysteme zu verstehen. Zu den Vertreten dieser Materialgruppe zählen Zinkoxidphosphat-, Zinkoxid–Polycarboxylat- und Glasionomerzement (FERNANDES u. DESSAL 2001). Eine Befragung von Zahnärzten in der Schweiz hat ergeben, dass Zinkoxidphosphatzement noch immer das Mittel der Wahl zu sein scheint (TINNER et

al. 2001). Andere Studien zeigen, dass Zinkoxidphosphatzement auf thermische und mechanische Belastungen sehr empfindlich reagiert (ROSIN et al. 2003). Als weiterer konventioneller Zement ist Glasionomerzement zu nennen, der am zweihäufigsten für die Zementierung von metallischen Stiften verwendet wurde (TINNER et al. 2001). Andere Autoren halten jedoch den Gebrauch von Glasionomerzementen zur Wurzelstiftbefestigung aufgrund der gemessenen niedrigen Retentionswerte nicht für empfehlenswert (ROSIN et al. 2003).

1.2.6.2 Adhäsive Befestigung

Die Vorzüge der Adhäsivtechnik kommen auch bei der Befestigung von Stiften bzw. Stiftaufbauten zum Tragen. Durch die Anwendung der adhäsiven Befestigungstechnologie besteht heute die Möglichkeit, unter minimalem Zahnhartsubstanzverlust einen maximalen Effekt hinsichtlich Ästhetik und Funktion zu erreichen. Die adhäsive Zementierung erfolgt mit selbst- oder dualhärtenden Befestigungskompositen in Verbindung mit einem korrespondierenden Dentinadhäsivsystem. Grundsätzlich werden moderne Befestigungskomposite mit einem Dentinadhäsiv kombiniert, das sowohl am Schmelz als auch am Dentin hohe Haftwerte erzielt, die auf mikromorphologischen Verbundphänomenen beruhen. Dentinadhäsive verbessern nicht nur Retention und Randschluss (LUTZ et al. 1993), sie bewirken auch eine Stabilisierung der Restauration (DERAND 1991). So wird beschrieben, dass es durch den adhäsiven Verbund der Restzahnhartsubstanz mit dem inserierten Stift zu einer wirksamen Stabilisierung kommt (KERN et al. 1998, KOUTAYAS u. KERN 1999).

Durch die Anwendung der Adhäsivtechnik werden die Retention des Wurzelstiftes im Kanal gesteigert (STANDLEE et al. 1992, DUNCAN u. PAMEIJER 1998) und eine bessere Abdichtung zwischen Kanalwand und Stiftoberfläche erzielt (BACHICHA et al. 1998). Für zahnfarbene Stifte wird die adhäsive Befestigung empfohlen, wobei die verschiedenen angebotenen Befestigungskomposite unterschiedlich beurteilt wurden (DIETSCHI et al. 1997, EDELHOFF et al. 2000, FEHER et al. 1999, NERGIZ et al. 2001, ROSENSTIEL et al. 1998).

Die adhäsive Zementierung hat mit Einzug der keramischen Wurzelstifte auch bei der Zementierung von Stiften an Bedeutung gewonnen. Hauptvertreter unter den Keramiken für diese Indikation stellt die Zirkonoxidkeramik dar. In-vitro-Untersuchungen zum chemischen Verbund dieser Keramik haben gezeigt, dass ein

dauerhafter chemischer Verbund erzielt werden kann (BLATZ et al. 2003, WAGNER u. KERN 2000).

Um den durch Stiftzementierung verursachten Stress zu minimieren und die Friktion zwischen dem Stift und dem Wurzelkanalwand zu vermeiden, wurde die Anwendung von Adhäsivsystemen in Kombination mit Befestigungsmaterialien und Faserstiften vorgeschlagen (TORBJONER et al. 1996). Adhäsiv befestigte Glasfaserstifte ermöglichen die ästhetische Rekonstruktion avitaler Zähne bei größtmöglichem Erhalt der Zahnhartsubstanz. Erste klinische Untersuchungen führten bei entsprechender Indikationsstellung zu guten Resultaten (FERRARI et al. 2000b, MALFERRARI et al. 2003).

Das Verfahren wurde auch für die Adhäsivbefestigung von Titan und Edelmetall-Legierungen beschrieben (ANTONIADON et al. 2000, FRENZEL u. KERN 2000, KERN u. THOMPSON 1995, TAIRA et al. 2000).

1.3. Grundlagen und Wirkungsweise von Adhäsivsystemen

Die Aufgabe eines Adhäsivsystemes ist es, eine funktionsstabile und dauerhafte Verbindung zwischen der Zahnsubstanz und dem verwendeten Restaurations-material herzustellen. Um diese Verbindung zu erreichen, wurden moderne Adhäsivsysteme entwickelt, die prinzipiell aus Conditioner, Primer und Adhäsiv bestehen (HALLER u. BLUNCK 2003).

Bei der Anwendung moderner Haftvermittlersysteme unterscheidet man verschiedene Applikationsschritte:

1.3.1. Konditionierung

Unter Konditionierung versteht man die Vorbehandlung der Zahnoberflächen mit einer Säure. Eine Möglichkeit der Vorbehandlung ist die so genannte "Total-Ätztechnik". Diese erlaubt, sowohl die Schmelz- als auch Dentinkonditionierung in einem Arbeitsgang durchzuführen. Dabei wird auf der Zahnoberfläche durch das Einwirken eines Phosphorsäuregels (ca. 30%–40%) für etwa 15s auf Dentin und etwa 30s auf Schmelz ein retentives Ätzmuster erzielt. Danach wird das Ätzgel mit Wasserspray abgespült. Die Schmierschicht wird dabei vollständig entfernt (KUGEL u. FERRARI 2000) im Gegensatz zu früheren Generationen von Adhäsivsystemen,

bei denen sie erhalten oder modifiziert wurde (HALLER 1994). Ziel der Schmierschichtentfernung ist das Freilegen der angeschnittenen Tubuli und die Demineralisierung des Oberflächendentins zur Freilegung eines Kollagennetzwerks.
Eine Dentinkonditionierung kann auch ohne Phosphorsäure-Ätzung durch die Anwendung selbstkonditionierender Dentinprimer erzielt werden, die neben hydrophilen Monomeren auch 0,8-4% Maleinsäure enthalten. Selbstkonditonierende Primer werden nach dem Einwirken nicht abgespült, sondern lediglich mit dem Luftbläser getrocknet. Die säurehaltigen Primer lösen die Schmierschicht auf und legen im darunterliegenden Dentin Kollagenfasern frei. Die vollständige oder teilweise aufgelöste Schmierschicht wird in diesem Fall nicht weggewaschen, sondern modifiziert, indem ihre Komponenten bei der Trocknung wieder ausfallen und zusammen mit Monomeren des Primers einen hydrophoben Film bilden, der für die spätere Eindringung des Adhäsives notwendig ist (VAN MEERBECK et al.1992, HALLER et al. 1992).

1.3.2. Primer

Nach der Dentinkonditionierung mit Phosphorsäure wird ein Primer aufgetragen und nach der Einwirkzeit getrocknet. Als Primer werden in Wasser, Ethanol oder Aceton gelöste Monomere (z.B. HEMA, PEMA, PEGDMA) oder Monomergemische bezeichnet, die nach Verdunsten des Lösungsmittels auf dem Dentin zurückbleiben (HALLER 1992). Der hydrophile Primer stellt eine mikromechanische Verbindung zum durch Ätzen mit Phosphorsäuren freigelegten Kollagennetzwerk des Dentins her. Die Primerapplikation dient dazu, die Oberflächenenergie des Dentins zu erhöhen und seine Benetzung mit dem anschließend applizierten Adhäsiv zu verbessern (HALLER u. BLUNCK 2003).

1.3.3. Adhäsiv

Nach der Vorbehandlung mit Primern bei den Drei-Schritt-Systemen oder mit selbstkonditionierenden Primern bei den Zwei-Schritt-Systemen wird ein Adhäsiv aufgetragen, verblassen und lichtgehärtet. Das Adhäsiv ist der eigentliche Haftvermittler, der aus einer Mischung verschiedener Monomere (z.B. HEMA, Bis-GMA, TEGDMA) besteht. Um eine vollständige Eindringung des Adhäsivs in das

demineralisierte Dentin zu erreichen, wird vor der Aushärtung eine ausreichende Einwirkzeit (ca. 10s) benötigt. Die Penetration des Adhäsivs in das freigelegte Kollagennetzwerk führt zur Ausbildung einer Kunststoff-Dentin-Hybridschicht, das Einfließen in die eröffneten Dentintubuli zur Bildung von Kunststoff-Tags (HALLER 1992).

Im Zuge der Weiterentwicklung wurden die so genannten Einkomponenten-haftvermittler entwickelt, die die Funktion von Primer und Adhäsiv in einer Lösung kombinieren. Diese "selbstprimenden" Adhäsive oder Primer-Adhäsive enthalten hydrophile und hydrophobe Bestandteile und ermöglichen eine Verkürzung und Vereinfachung der Verarbeitung (HALLER et al. 1999).

Eine weitere Vereinfachung stellen selbstkonditionierende Primer-Adhäsive dar. Bei diesen so genannten All-in-one-Adhäsiven ist nur ein Verarbeitungsschritt erforderlich. Das Auftragen von Ätzmittel, Primer und Adhäsiv wird bei dieser Gruppe in einer Lösung vereint. Diese erhält hydrophile und hydrophobe Monomere sowie Monomere mit Säureestern (HALLER et al. 2003).

1.4. Aufbaurestaurationen aus Komposit

Endodontisch behandelte Zähne weisen oft einen hohen Grad an koronalem Zahnhartsubstanzverlust auf, so dass zur Retention für konsekutive prothetische Versorgungen ein im Wurzelkanal verankerter Stift mit umgebendem Aufbau notwendig ist. An ein Aufbaumaterial werden folgende Anforderungen gestellt:

- Biokompatibilität
- Mechanische Belastbarkeit
- Chemische Stabilität
- Volumenbeständigkeit
- Gute marginale Adaptation
- Einfache Verarbeitung

Amalgam hat sich als Aufbaumaterial in zahlreichen Untersuchungen bewährt (WIRZ 1982, DE WALD et al. 1987, OLIVIA u. LOWE 1987, MILLSTEIN et al. 1991, KOVARIK et al. 1992, HUYSMANS u. VAN DER VARST 1993, ALBERS 1994). Aufgrund der Korrosionsprodukte und der fraglichen Biokompatibilität wird jedoch

inzwischen vom Bundesgesundheitsamt empfohlen, auf den plastischen Stumpfaufbau aus Amalgam zu verzichten und auf Komposit auszuweichen.

Glasionomerzemente sind aufgrund der geringeren Dentinhaftung und der erhöhten Frakturgefahr als Aufbaumaterial ungeeignet (HALLENSLEBEN 1999) Sie erreichen weder die mechanische Druckfestigkeit von Amalgam noch von Komposit (STRUB et al. 1994, TALEGHANI u. LEINFELDER 1988, MILLSTEIN et al. 1991, SOLTESZ u. LEUPOLZ 1993, KOVARIK et al. 1992, LINDE 1993). Inzwischen haben sich Komposite zum Stumpfaufbau bewährt, da sie, wie Amalgam, eine ausreichende mechanische Festigkeit aufweisen und unter Anwendung von Dentinadhäsiven einen Verbund mit dem Dentin eingehen.

Auf Grund der direkten Technik in Kombination mit einer adhäsiven Kompositaufbaufüllung lassen sich die Stifte zeitsparend in einer einzigen Sitzung unter Verzicht auf Laborschritte verarbeiten und erlauben ein Zahnhartsubstanz-schonendes Vorgehen, da dünne Dentinwände durch das plastische Aufbaukomposit bzw. den Kompositzement adhäsiv stabilisiert werden (MONTICELLI et al. 2004). Bei adhäsiver Befestigung können die Zementüberschusse gleich in den Stumpfaufbau integriert werden (ROSIN et al. 2003).

1.5. Problemstellung

Da der Einsatz von Wurzelkanalstiften aus faserverstärktem Kunststoff ein relativ neues Verfahren darstellt, ist der Einfluss verschiedener Befestigungsmaterialien auf die Haftfestigkeit von Glas- bzw. Quarzfaserstiften im Wurzelkanal bisher nur wenig untersucht.

Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, mit Hilfe des Ausstoßversuchs die Haftfestigkeit von drei verschiedenartigen faserverstärkten Kunststoffstiften in Wurzelkanälen menschlicher Zähne sowie in einem Aufbaukomposit zu ermitteln und zu vergleichen. Die Stifte wurden mit adhäsiven Befestigungsmaterialien auf Kunststoffbasis befestigt. Außerdem sollten mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie die Stiftoberflächen sowie die Wurzelkanalinnenflächen analysiert werden, um so Rückschlüsse auf die Lokalisation des Verbundversagens zu ziehen. Durch die experimentelle Untersuchung sollten im Einzelnen folgende Fragen geklärt werden:

a) Welchen Einfluss haben verschiedene Arten von faserverstärkten Kunststoffstiften auf die Stiftverankerung im Wurzelkanal bzw. im Aufbaukomposit?
b) Welchen Einfluss haben verschiedene kunststoffbasierte Befestigungssysteme auf die Verankerung von Faserstiften im Wurzelkanal bzw. im Aufbaukomposit?
c) Gibt es Wechselwirkungen zwischen der Art der Faserstifte und dem verwendeten Befestigungsmaterial mit Auswirkung auf die Stiftverankerung im Wurzelkanal bzw. im Aufbaukomposit?
d) Welchen Einfluss hat die Vorbehandlung mit einem Haftsilan auf die Stiftverankerung im Wurzelkanal bzw. im Aufbaukomposit?

2. Material und Methode

2.1. Allgemeines

Für die durchgeführte Untersuchung wurden 120 extrahierte menschliche Zähne verwendet. Die Kronen der Zähne wurden abgetrennt, die Wurzelkanäle wurden aufbereitet, gereinigt und je nach Befestigungsmaterialien für die Aufnahme der glasfaserverstärkten Kunststoffstifte vorbehandelt. Es wurden für die durchgeführte Untersuchung vier verschiedene Befestigungssysteme getestet. Pro Befestigungssystem wurden drei verschiedene Arten von faserverstärkten Kunststoffstiften untersucht. Jeweils die Hälfte dieser Stifte wurde mit einem Haftsilan vorbehandelt, die andere Hälfte der Proben wurde ohne Stiftvorbehandlung fertig gestellt. An dem koronalen Abschnitt der Stifte wurde Aufbaukomposit aufgebaut. Dann wurde der Wurzelkanal mit dem verankerten Stift und dem Aufbaukomposit in ein Kunststoffmaterial eingebettet. Aus diesem Kunststoffblock wurden zwei Scheiben, eine vom Zahn und die andere vom Aufbaukomposit, herausgesägt. An insgesamt 240 Proben wurde die Verankerung der zementierten Stifte in den Wurzelkanälen (n=120) bzw. im Aufbaukomposit (n=120) mit Hilfe des Ausstoßversuchs gemessen.

2.2. Herstellung der Proben

2.2.1. Vorbereitung der Testzähne

Zur Herstellung der Proben wurden 120 extrahierte, menschliche, füllungs- und kariesfreie Zähne, die keine Schmelzsprünge aufweisen, verwendet. Die Wurzelkanäle der Zähne hatten einen annähend kreisförmigen und nahezu geraden Verlauf. Die Zähne wurden nach ihrer Extraktion und ihrer Reinigung von den Geweberesten in 1%iger Chloramin-Lösung aufbewahrt, um eine Keimbesiedlung zu verhindern.

2.2.2. Sägen der Zähne und Vorbereitung der Wurzelkanäle

Die Kronen der in Chloramin-Lösung gelagerten Zähne wurden so abgetrennt, dass der Wurzelkanal senkrecht zur Schnittebene verlief. Das Sägen wurde mit einer Kreissäge (WOCO 50 Med, Conrad, Clausthal- Zellerfeld, Deutschland) mit

diamantierter Trennscheibe (WOCO 95/2 Conrad, Clausthal - Zellerfeld, Deutschland) durchgeführt.

Nach dem Abtrennen der Zahnkronen wurde das Pulpakavum eröffnet. Die Reste der Pulpa wurden mittels endodontischem Instrumentarium entfernt. Anschließend wurde das Stiftbett mit dem entsprechenden Kanalerweiterungsinstrumenten je nach Verarbeitungsanleitung der Stifttypen präpariert.

Für die durchgeführte Untersuchung kamen drei Arten von faserverstärkten Kunststoffstiften zum Einsatz. Die Stifte sind in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1. Beschreibung der verwendeten Stiftsysteme

Stift code	Hersteller	Stift (Lot Nr)	Form	Vorbereitungs-instrumente	Durchmesser
DTWP	VDW	DT White Post 0305A	Zylindrisch-konisch (DoubleTaper)	DT Finishing Drill G.3	2,18 mm
DTLP	VDW	DT Light Post 0304C	Zylindrisch-konisch (DoubleTaper)	DT Finishing Drill G.3	2,18 mm
FRCP	Ivoclar Vivadent	FRC Postec GL0009	Zylindrisch-konisch	FRC Postec Bohrungsinstrumente	1,95 mm

DTWP: Double Taper White Post, DTLP: Double Taper Light Post, FRCP: Glass Fibre reinforced Composite Postec

2.3. Befestigung der Wurzelstifte

Zur Befestigung der Stifte im Wurzelkanal wurden vier verschiedene Befestigungssysteme verwendet. Jede Stiftart wurde mit vier verschiedenen Befestigungsmaterialien befestigt. Von den zehn Proben pro Stiftart und Befestigungssystem wurden fünf mit und fünf ohne Vorbehandlung der Stifte mit einem Haftsilan (Monobond S) getestet.

Nach dem Einsetzen der Stifte in die Wurzelkanäle wurden die Überschüsse des Befestigungsmaterials entfernt (siehe 2.3.6).

2.3.1. Silanbehandlung der Wurzelstifte

Die in dieser Studie durchgeführte Silanbehandlung wurde mit einem Haftsilan (Monobond S, Lot Nr. F65849), ein Einkomponenten Haftvermittler, ermittelt. Das Haftsilan wurde nur auf die Hälfte der untersuchten Stifte aufgetragen (S+), die andere Hälfte wurde ohne Silanbehandlung eingesetzt (S-). Die Silanisierung wurde mit einem Einmalpinsel appliziert und dann 60s lang einwirken lassen.

Tabelle 2. Übersicht über die verwendeten Befestigungssysteme

Befestigungssystem Code	**Hersteller**	**Befestigungsmaterial (Lot Nr.) Zusammensetzung**	**Haftvermittler (Lot Nr.) Zusammensetzung**
DYC	Dentsply DeTrey	Dyract Cem Plus (03100002395) SAS, TID, PI, PMPM, CAMM, R-V, SI	Prime&Bond NT (0312001521) DC Activator (030708) PMA, TMA, PENTA, FIASD, SI, L-I, CAHF, A.
V II	Ivoclar-vivadent	Variolink II (Catalyst: F68165, Base: F67602) Bis-GMA, UDMA, TEGDMA, BAG, YF, SMO, BAFSG, S-I, PIG	Excite DSC (F61488, G14423, G06563) HEMA, DMA, PAA, HDSD, I-S
PAF	Kurary	Panavia F 2.0 (41114) HEMA, 5-NMSA, MDP	ED Primer II (41114) MDP, HEMA, Wasser;
REX	3M ESPE	RelyX Unicem (170831) MPMA, GL, HEMA	

DYC: Dyract Cem Plus, V II: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

2.3.2. Dyract Cem plus

Dyract Cem Plus ist das einzige untersuchte Befestigungsmaterial auf Kompomerbasis. Die Konditionierung der Zahnhartsubstanz erfolgte mit Phosphorsäure, anschließend wird eine Mischung von Prime&Bond NT und dem dazugehörigen dualhärtenden Aktivator (DC Activator) durchgeführt.

Tabelle 3. Verarbeitung von Dyract Cem Plus

Stiftvorbehandlung	**-**Entfetten mit (Alkohol 70 %; 60s) **-**Trocknen (Luft 5s) **-**Silanisierung (Monobond S) **-**Einwirken lassen (60s) **-**Auftragen des Adhäsiv-Activator-Gemischs **-**Trocknen mit Druckluft (5s)
Kanalbehandlung	**-**Spülen des Kanals mit 0,9% NaCl-Lösung (3ml) **-**Leersaugen des Kanals mit Spülkanüle **-**Trocknen mit Papierspitzen und Luft (5s) **-**Ätzen (36% Phosphorsäure; 15s) **-**Spülen (10s) **-**Trocknen mit Papierspitzen **-**Anmischen von 1 Tropfen Prime&Bond NT und 1 Tropfen DC Activator (1-2s) **-**Auftragen des Adhäsivs (mit DC Activator) **-**Einwirken lassen (20s) **-**Trocknen mit Papierspitzen und Luft (5s)
Zementierung des Stiftes	**-**Anmischen des Zementes (30s) (1 Löffel Pulver : 1 Tropfen Flüssigkeit) **-**Beschicken des Stiftes **-**Einsetzen des Stiftes **-**Entfernen der Überschüsse mit Einmalpinsel -Verarbeitungszeit 1,5min

2.3.3. Variolink II

Variolink II ist ein Befestigungsmaterial auf Kompositbasis. Dieses Material kann dualhärtend (Verwendung von Base- und Katalysatorpaste) oder lichthärtend (Verwendung von Basepaste) eingesetzt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde die dualhärtende Variante verwendet. Zur Konditionierung der Zahnhartsubstanz wurde diese mit Phosphorsäure geätzt. Dann wurde Excite DSC aufgetragen. Excite DSC ist ein dualhärtender Einkomponenten-Haftvermittler zur adhäsiven Befestigung von metallfreien Restaurationen.

Tabelle 4. Verarbeitung von Variolink II

Stiftvorbehandlung	**-** Entfetten mit (Alkohol 70 %; 60s) **-**Trocknen (Luft 5s) **-**Silanisierung (Monobond S) **-**Einwirken lassen (60s)
Kanalbehandlung	**-**Spülen des Kanals mit 0,9% NaCl-Lösung (3ml) **-**Leersaugen des Kanals mit Spülkanüle **-**Trocknen mit Papierspitzen und Luft (5s) **-**Ätzen (37% Phosphorsäure; 15s) **-**Spülen (10s) **-**Trocknen mit Papierspitzen **-**Auftragen von Excite DSC **-**Einmassieren (10s) **-**Trocknen mit Papierspitzen und Luft (5s) **-**Adhäsiv nicht lichthärten
Zementierung des Stiftes	**-**Anmischen des Zementes (10s) Paste I: Paste II 1:1 **-**Beschicken des Stiftes **-**Einsetzen des Stiftes **-**Entfernen der Überschüsse mit Einmalpinsel **-**Lichthärten (40s) **-**Verarbeitungszeit 3,5min

2.3.4. Panavia F 2.0

Panavia F 2.0 ist ein dualhärtendes (chemisch und mit Licht) Befestigungssystem auf Kompositbasis. Panavia F 2.0 besteht aus einem Primer (ED Primer II, der zur Konditionierung der Dentinwand angewendet wurde) und Panavia F 2.0 Paste (welche Fluorid freisetzt).

Tabelle 5. Verarbeitung von Panavia F 2.0

Stiftvorbehandlung	**-**Entfetten mit (Alkohol 70%; 60s) **-**Trocknen (Luft 5s) **-**Silanisierung (Monobond S) **-**Einwirken lassen (60s)
Kanalbehandlung	**-**Spülen des Kanals mit 0,9% NaCl-Lösung (3ml) **-**Leersaugen mit Spülkanüle **-**Trocknen mit Papierspitzen und Luft (5s) **-**Anmischen ED Primer II (1Tropfen A 2.0 : 1Tropfen B 2.0) **-**Auftragen von ED Primer II **-**Einwirken lassen (30s) **-**Trocknen mit Papierspitzen und Luft (5s)
Zementierung des Stiftes	**-**Anmischen des Zementes (20s) (1 Paste A 2.0 **:**1 Paste B 2.0) **-**Beschicken des Stiftes **-**Einsetzen des Stiftes **-**Entfernen der Überschüsse mit Einmalpinsel **-**Manuelle Fixierung (40s) **-**Lichthärten (20s)

2.3.5. RelyX Unicem

RelyX Unicem Aplicap und RelyX Unicem Maxicap sind dualhärtende selbstadhäsive Befestigungskomposite, die in Kapselform dargereicht werden. Bei Verwendung von RelyX Unicem sind Konditionierung und Adhäsiv-Vorstrich der Zahnhartsubstanz nicht erforderlich. Dies bedeutet, dass keine Vorbehandlungsschritte der Zahnsubstanz (Verwendung eines Primer oder Bonding) erforderlich sind. Dieses Befestigungsmaterial gibt Fluoridionen ab. Die im Zement enthaltenen Füllkörper haben eine Größe von 9,5 µm.
Es wurde für die vorliegende Arbeit RelyX Unicem Aplicap verwendet.

Tabelle 6. Verarbeitung von RelyX Unicem

Stiftvorbehandlung	**-**Entfetten mit (Alkohol 70 %; 60s) **-**Trocknen (Luft 5s) **-**Silanisierung (Monobond S) **-**Einwirken lassen (60s)
Kanalbehandlung	**-**Spülen des Kanals mit 0,9% NaCl-Lösung (3ml) **-**Leersaugen mit Spülkanüle **-**Trocknen mit Papierspitzen und Luft (5s)
Zementierung des Stiftes	-Aktivieren der Kapsel (2s) -Anmischen im Hochfrequenzmischgerät (Capmix 15s) **-**Beschicken des Stiftes **-**Einsetzen des Stiftes **-**Entfernen der Überschüsse mit Einmalpinsel **-**Lichthärten (20s) **-**Verarbeitungszeit 2min

2.3.6. Entfernung der Zementüberschüsse

Nach dem Einsetzen der Stifte im Wurzelkanal wurden die Überschüsse des Befestigungsmaterials so entfernt, dass der aus dem Wurzelkanal ragende Stiftabschnitt beim Abstreifen der Überschüsse gleichmäßig mit dem Befestigungsmaterial benetzt wurde. Hierfür wurden die Überschüsse mit einem Einmalpinsel, in einer dünnen Schicht über den Stiftabschnitt gestrichen.

2.4. Herstellung des Aufbaus

Um eine möglichst vollständige Aushärtung der Verbundsysteme nach dem Einsetzen der Stifte zu erreichen, wurden alle Proben zunächst für 10 Minuten bei 37℃ im Brutschrank gelagert.

Damit bei den DT White Post-, bei den DT Light Post- und bei den FRC Postec-Stiften Ausstoßversuche durchgeführt werden konnten, wurden die Stumpfaufbauten unterhalb der koronalen Haftrillen positioniert. Die Aufbauten erhielten so eine Höhe von 3,7 mm bei einem Durchmesser von 4,5 mm. Aus diesem Bereich wurde dann eine 2 mm dicke Scheibe herausgesägt.

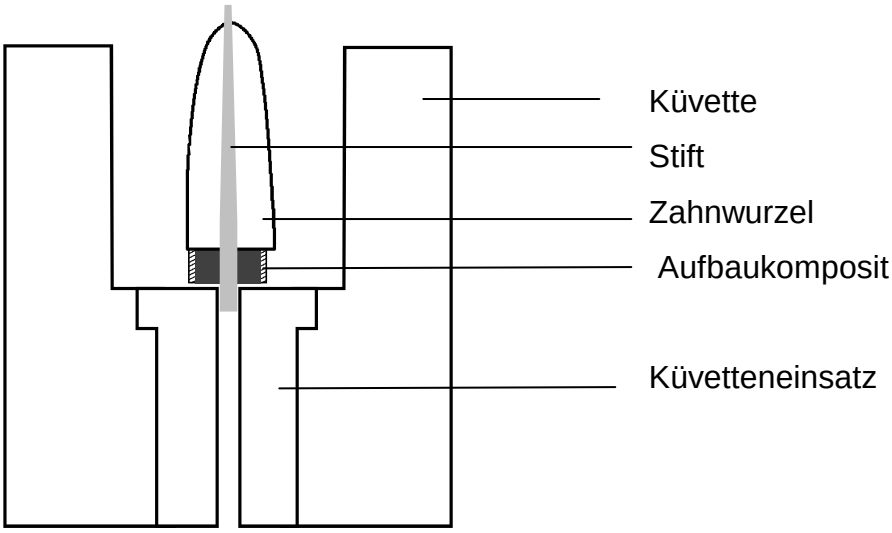
Alle Aufbaufüllungen wurden aus MultiCore HB, einem dualhärtende, fluoridhaltige, und röntgenopaque Komposit, hergestellt. Dieses Aufbaukomposit besteht aus zwei Spritzen: Eine Basispaste und eine Katalisatorpaste. Diese wurden im Verhältnis 1:1 eingemischt, mit einer Hawe Neos Cetrix Spritze in einer Schicht appliziert und dann 40s lang ausgehärtet.

2.5. Herstellung der Prüfkörper für den Ausstoßversuch

2.5.1. Einbetten der Proben

Nach dem Aufbauen des Komposits wurden die Proben in einer eigens dafür entwickelten Küvette (Abb. 1) in Kaltpolymerisat (Technovit 4071, Kulzer, Wehrheim, Deutschland) eingebettet. Durch das Einbetten in die Küvette wurde gewährleistet, dass die Stifte mit den umgebenden Zahnwurzeln senkrecht und zentral positioniert waren. Die Stifte passten jeweils exakt in den Küvetteneinsatz. Dies wurde durch verschiedene Küvetteneinsätze für die verschiedenen Stifte (DT White Post, DT Light Post, FRC Postec) erreicht.

Nach der Aushärtung des Einbettmaterials wurden die Probenblöcke vorsichtig aus der Küvette entfernt. Die Probenblöcke wurden markiert, um die aus den Probenblöcken gesägten Probenscheiben für den Ausstoßversuch, wieder in die gleiche Position bringen zu können. Der Ausstoßversuch erfolgte in der gleichen Küvette. Die Probenblöcke wurden nach ihrer Entfernung aus der Küvette 24 Stunden bei 37℃ in Wasser gelagert.



.
Abb. 1. Küvette mit dem zementierten Wurzelkanalstift und Aufbaukomposit vor dem Auffüllen mit Technovit 4071 (Schema).

2.5.2. Sägen und Polieren der Probenscheiben

Aus jedem Probenblock wurden zwei gleichmäßig dicke Scheiben mit einer Stärke von ca. 2,1 mm abgetrennt. Eine wurde aus dem Aufbaumaterial mit dem zylindrischen Teil des Stiftes, die zweite im Abstand von 2 mm vom Anfang der Zahnwurzel mit dem konischen zementierten Teil des Stiftes herausgesägt.

Das Sägen wurde mit einer Trennschleifmaschine (WOCO 50p, Konrad Apparatebau GmbH, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland) durchgeführt. Die Probenblöcke wurden in eine spezielle Spannvorrichtung eingespannt, die sicherstellte, dass der Sägeschnitt exakt senkrecht zur Stiftachse verlief. So wurden aus jedem Probenblock, mit vier parallelen Sägeschnitten, zwei Scheiben mit einer Stärke von ca. 2,1 mm herausgesägt.

Nach dem Sägen wurden die beiden Oberflächen der ca. 2,1 mm starken Probenscheiben mit Schleifpapier (600 grit) in einer wassergekühlten Schleifmaschine (WOCO SF 20, Conrad, Clausthal – Zellerfeld, Deutschland) poliert. Die Dicke der Scheiben wurde dabei unter wiederholter Kontrolle mit einem Schnelltaster (ODI 00 D Kroeplin GmbH, 36381 Schlüchtern, Deutschland) auf 2,0 mm (±0,05 mm) reduziert. Danach wurden die Probenscheiben zur Durchführung der Verbundfestigkeitsmessungen in die Ausstoßvorrichtung eingebaut.

2.6. Messung der Verbundfestigkeit

2.6.1. Verankerung der Stifte in den Wurzelkanälen

Um die Verbundfestigkeit zwischen den faserverstärkten Kunststoffstiften und den Wurzelkanälen zu überprüfen, wurde der Ausstoßversuch (HALLER et al. 1993) verwendet (Abb. 2). Die Verbundfestigkeitsmessungen erfolgten in einer Universalprüfmaschine (Zwick, Ulm-Einsingen, Deutschland), mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 mm pro Minute. Hierzu wurden die Stiftsegmente in den Dentinscheiben mit den jeweils passenden Stempeln und Küvetteneinsätzen senkrecht zur Scheibenoberflächen solange belastet, bis sich die Stiftsegmente vom Wurzelkanal lösten. Für die Verbundfestigkeitsmessung wurden dieselben Küvetten verwendet, die für das Einbetten benutzt wurden.

Um zu gewährleisten, dass der ausgestoßene Stift beim Absenken die Bohrung des Küvetteneinsatzes passieren kann, wurde der Durchmesser der Bohrung in den Küvetteneinsätzen jeweils 0,15 mm größer gewählt als der Durchmesser des jeweiligen Stifts. Bei der Wahl des Stempels musste darauf geachtet werden, dass dieser nur auf den Stift auftraf und nicht auf die Zahnwurzel. Der Stempeldurchmesser war dementsprechend jeweils 0,15 mm kleiner als der Stiftdurchmesser.

Die maximale Kraft (N) beim lösen der Stift von der Wurzelkanalwand wurde graphisch dokumentiert. Die Haftfestigkeit jeder Probe wurde als Quotient der maximal gemessenen Kraft (N) und der Mantelfläche des jeweils ausgestoßenen Stiftsegmentes in MPa dargestellt.

2.6.2. Verankerung der Stifte im Aufbaukomposit

Die Verbundfestigkeit zwischen den faserverstärkten Kompositstiften und dem Aufbaukomposit wurde ebenfalls im Ausstoßversuch ermittelt. Entsprechend der Verbundfestigkeitsmessungen an den Wurzelproben wurden die drei verschiedenen Stiftsegmente (DT White Post, DT Light Post, FRC Postec) mit dem jeweils passenden Set von Stempel und Küvetteneinsatz senkrecht zur Probenoberflächen solange belastet, bis sich die Stiftsegmente vom Aufbaukomposit lösten.
Die Haftfestigkeit wurde als Quotient der beim lösen der Stifte registrierten Kraft und der Mantelfläche des ausgestoßenen Stiftsegments in MPa gemessen.

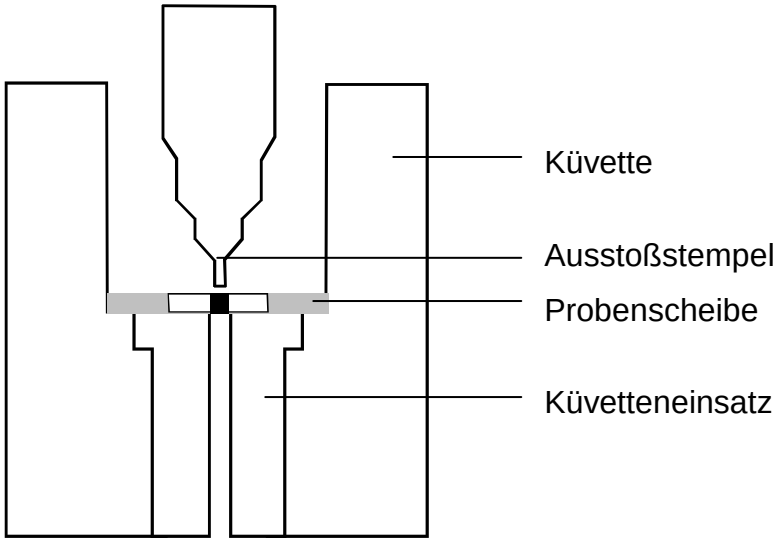


Abb. 2. Schema des Ausstoßversuchs. Probenscheibe auf Küvetteneinsatz vor dem Ausstoßen mit dem passenden Ausstoßstempel.

2.7. Untersuchung der Verbundflächen

Die Untersuchungen der Stiftoberflächen und der Wurzelkanalinnenflächen wurden im Rasterelektronenmikroskop (Leica, Cambridge Ltd, Cambridge, England) durchgeführt. Dazu wurden die Probenscheiben entlang der Sollbruchstelle der Wurzel und des Aufbaumaterials aufgebrochen. Um die Dentinkanälchen deutlich zu sehen, wurde die Wurzelinnenfläche mit Phosphorsäure 34% für 30s geätzt, gespült und getrocknet. Dann wurden die Fragmente der geätzten Wurzel und die

Stiftsegmente auf einem Träger fixiert und die Kanalinnenfläche, sowie die Oberfläche der Stiftsegmente mit Gold besputtert (Emitech K 550, Röntgenanalytik, Messtechnik, Taunusstein/Neuhof, Deutschland). Von den Dentinscheiben wurde die Dentinwand sowie der Stiftsegmente untersucht. Von den Aufbauproben wurden lediglich die Stiftsegmente untersucht.

2.8. Statistische Auswertung

Die statistische Datenanalyse der Ausstoßhaftfestigkeiten erfolgte mit Hilfe des Statistiksoftwarepakets SPSS für Windows Version 14 (SPSS GmbH, München). Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $p<0,05$ festgelegt. Aus den Einzelmessungen in jeder Testserie ($n=5$) wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt. Danach wurden mittels der dreifaktoriellen Varianzanalyse die Einflüsse der drei Faktoren (Stiftart, Befestigungssystem, Silanbehandlung der Stifte) auf die Haftfestigkeit, sowie mögliche Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren überprüft. Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Stiftarten bzw. Befestigungssystemen wurden durch multiple Mittelwertvergleiche mit dem Tukey-Test ermittelt.

3. Ergebnisse

3.1. Haftfestigkeitsmessungen

3.1.1. Allgemeines

Mithilfe des Ausstoßversuchs wurde die Verbundfestigkeit von drei verschiedenen Arten von Wurzelkanalstiften aus faserverstärktem Kunststoff in Wurzelkanälen von extrahierten Zähnen sowie in Aufbaukomposit gemessen. Daneben wurde auch der Einfluss der Stiftart, der verschiedenen Befestigungssysteme, sowie der Silanbehandlung der Stifte untersucht.

3.1.2. Verankerung der faserverstärkten Kunststoffstifte in den Wurzelkanälen

3.1.2.1 Überblick

Die Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen in den Wurzelkanälen.

Tabelle 7. Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen in den Wurzelkanälen. Mittelwerte (Standardabweichungen)

Stift	Befestigungssystem	Silan	Haftfestigkeit (MPa)
DT White Post	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	mit	18,15 (10,85)
		ohne	10,56 (5,78)
	Variolink II/Excite DSC	mit	23,10 (4,18)
		ohne	23,02 (4,43)
	Panavia F 2.0	mit	14,56 (5,10)
		ohne	20,11 (6,96)
	RelyX Unicem	mit	23,29 (4,70)
		ohne	18,80 (4,21)
DT Light Post	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	mit	17,91 (8,40)
		ohne	27,70 (7,39)
	Variolink II/Excite DSC	mit	33,68 (7,09)
		ohne	22,75 (3,65)
	Panavia F 2.0	mit	24,31 (5,07)
		ohne	20,14 (3,53)
	RelyX Unicem	mit	28,99 (7,09)
		ohne	23,37 (2,03)
FRC Postec	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	mit	19,26 (9,26)
		ohne	22,19 (3,85)
	Variolink II/Excite DSC	mit	29,66 (5,87)
		ohne	32,41 (4,37)
	Panavia F 2.0	mit	22,18 (6,20)
		ohne	23,37 (4,26)
	RelyX Unicem	mit	23,06 (7,23)
		ohne	24,68 (6,41)

DT: Double Taper, FRC: Fibre reinforced Compsite

Die dreifaktorielle Varianzanalyse ergab, dass sich sowohl die Art des Stiftes als auch die adhäsiven Befestigungssysteme signifikant auf die Haftfestigkeit auswirkten (jeweils $p<0,0001$). Im Gegensatz dazu hatte die Behandlung der Stift mit Haftsilan keinen Einfluss auf die Messwerte ($p=0,497$).

Es wurden keine signifikanten zweifache Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Stift und Befestigungssystem ($p=0,727$), zwischen den Faktoren Stift und Haftsilan ($p=0,178$) sowie zwischen den Faktoren Befestigungssystem und Haftsilan ($p=0,335$) nachgewiesen. Dagegen ergab sich eine signifikante dreifache Wechselwirkung ($p=0,007$) zwischen allen drei untersuchten Faktoren (Stift, Befestigungssystem, Haftsilan).

Tabelle 8. Ergebnisse der dreifaktoriellen Varianzanalyse zur Überprüfung des Einflusses von Stiftart, Befestigungssystem und Haftsilan auf die Verankerung der Stifte in den Wurzelkanälen (SPSS – Ausgabe)

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	3167,807(a)	23	137,731	3,722	,000
Konstanter Term	62385,816	1	62385,816	1685,753	,000
Stift	892,099	2	446,049	12,053	,000
Befestigungssystem	1160,477	3	386,826	10,453	,000
Haftsilan	17,169	1	17,169	,464	,497
Stift * Befestigungssystem	134,014	6	22,336	,604	,727
Stift * Haftsilan	130,021	2	65,011	1,757	,178
Befestigungssystem * Haftsilan	127,156	3	42,385	1,145	,335
Stift * Befestigungssystem * Haftsilan	706,870	6	117,812	3,183	,007
Fehler	3552,738	96	37,008		
Gesamt	69106,361	120			
Korrigierte Gesamtvariation	6720,545	119			

3.1.2.2 Einfluss der Silanisierung

Die Stiftbehandlung mit Haftsilan hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeit ($p=0,497$).

3.1.2.3 Unterschiede zwischen den Stiftarten

Im Bezug auf den Einfluss der drei verschiedenen Arten von faserverstärkten Kunststoffstiften wurde festgestellt, dass bei Verwendung von DT White Post ein

niedriger Mittelwert (18,95 MPa) erzielt wurde, als bei Verwendung von FRC Postec und DT Light Post. Die beiden letztgenannten Stifte unterschieden sich nicht signifikant (Tabelle 9).

Tabelle 9. Unterschiedliche Verankerung der untersuchten faserverstärkten Kompositstifte in den Wurzelkanälen (Tukey-Test). Stift mit statistisch nicht signifikant unterschiedlichen Mittelwerten sind in derselben Signifikanzgruppe zusammengefasst

Stift	N	Signifikanzgruppe	
		1	2
DT White Post	40	18,95 MPa	
FRC Postec	40		24,60 MPa
DT Light Post	40		24,85 MPa
Signifikanz (p<0,05)		1,000	0,981

DT: Double Taper, FRC: Fibre reinforced Compsite

Abbildung 3 zeigt die unterschiede zwischen den drei Stiften innerhalb der vier Befestigungssystemgruppen.

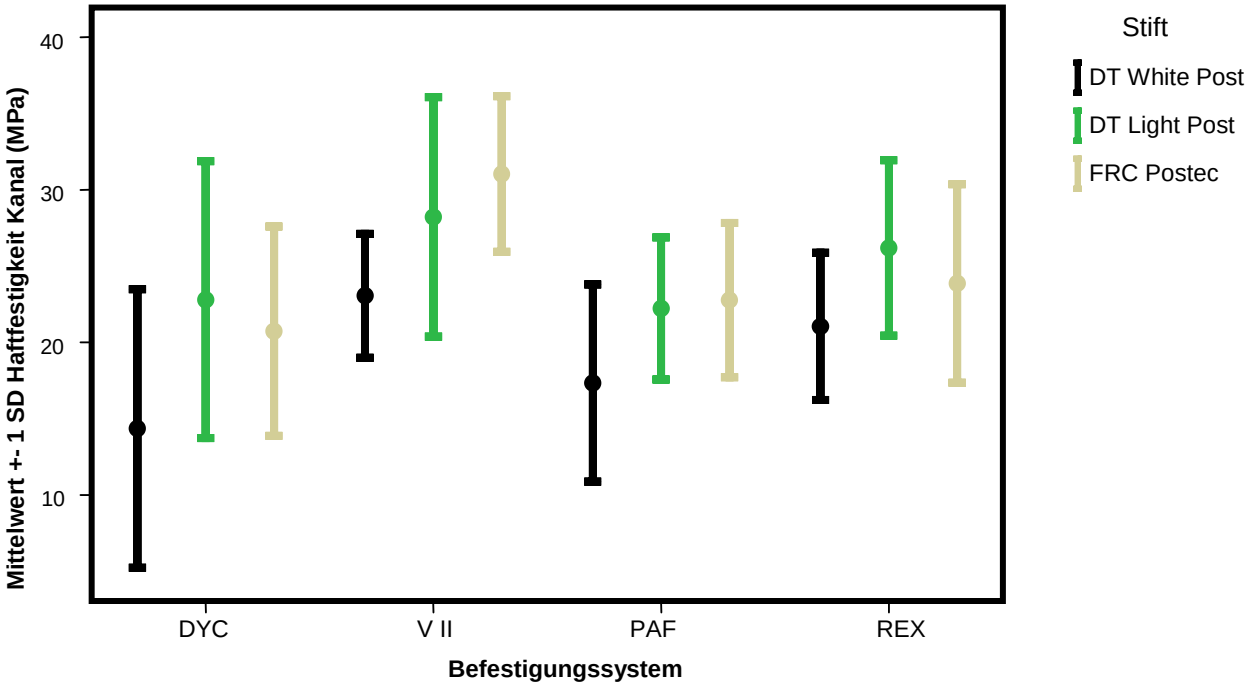


Abb. 3. Grafische Darstellung der Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen in den Wurzelkanälen (Mittelwerte ± Standardabweichungen). Einfluss der drei Stiftarten innerhalb der einzelnen Befestigungssystemgruppen (gepoolte Daten mit und ohne Silanisierung der Stifte). Codierung der Stifte und Befestigungssysteme siehe Seite 15 bzw. Seite 16.
DT: Double Taper, FRC: Fibre reinforced Compsite, DYC: Dyract Cem Plus, VII: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

3.1.2.4 Unterschiede zwischen den Befestigungssystemen

Bei Zementierung der Stifte mit Excite DSC/Variolink II wurde ein signifikanter größerer Mittelwert (27,43 MPa) erzielt als bei Zementierung mit Dyract Cem plus bzw. Panavia F 2.0. Auch der Unterschied zwischen Dyract Cem plus und RelyX Unicem war signifikant. keine signifikanten Unterschiede wurden zwischen Dyract Cem plus und Panavia F 2.0, zwischen Panavia F 2.0 und RelyX Unicem sowie zwischen RelyX Unicem und Variolink II nachgewiesen (Tabelle 10).

Tabelle 10. Unterschiedliche Verankerung der Stifte in den Wurzelkanälen bei Verwendung der vier untersuchten Befestigungssysteme (Tukey-Test). Befestigungssysteme mit statistisch nicht signifikant unterschiedlichen Mittelwerten sind in derselben Signifikanzgruppe zusammengefasst

Befestigungssystem	N	Signifikanzgruppe		
		1	2	3
Prime&Bond NT+Activator/Dycract Cem plus	30	19,29 MPa		
Panavia F 2.0	30	20,78 MPa	20,78 MPa	
RelyX Unicem	30		23,70 MPa	23,70 MPa
Excite DSC/Variolink II	30			27,44 MPa
Signifikanz (p<0,05)		0,780	0,253	0,088

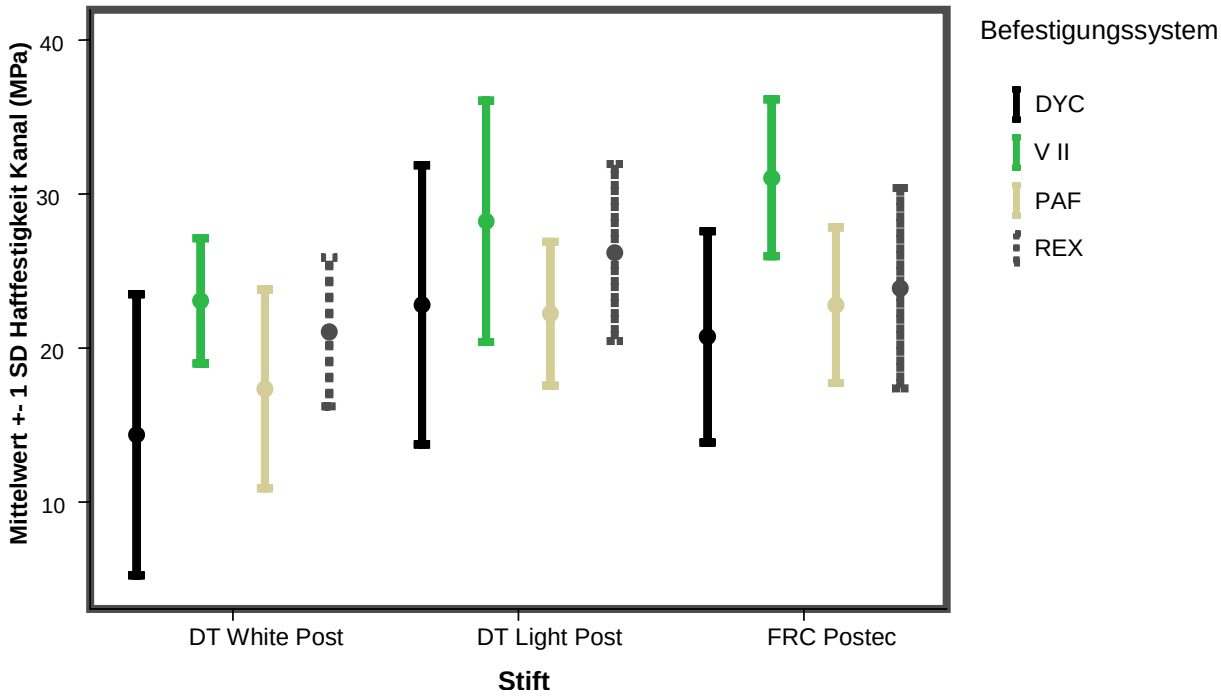


Abb. 4. Grafische Darstellung der Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen in den Wurzelkanälen (Mittelwerte ± Standardabweichungen). Einfluss der vier Befestigungssysteme innerhalb der drei Stiftgruppen (gepoolte Daten mit und ohne Silanisierung der Stifte).
DT: Double Taper, FRC: Fibre reinforced Compsite, DYC: Dyract Cem Plus, VII: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

3.1.3. Verankerung der faserverstärkten Kunststoffstifte im Aufbaukomposit (Multicore HB)

3.1.3.1 Überblick

Die Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen im Aufbaukomposit.

Tabelle 11. Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen im Aufbaukomposit. Mittelwerte (Standardabweichungen)

Stift	Befestigungssystem	Silan	Haftfestigkeit (MPa)
DT White Post	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	mit	26,50 (6,20)
		ohne	26,11 (5,58)
	Variolink II/Excite DSC	mit	24,52 (10,38)
		ohne	17,40 (4,44)
	Panavia F 2.0	mit	19,63 (7,58)
		ohne	19,47 (5,80)
	RelyX Unicem	mit	29,30 (5,16)
		ohne	24,74 (7,16)
DT Light Post	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	mit	25,66 (8,83)
		ohne	22,94 (5,36)
	Variolink II/Excite DSC	mit	17,81 (6,64)
		ohne	17,92 (3,37)
	Panavia F 2.0	mit	28,89 (7,97)
		ohne	20,68 (5,71)
	RelyX Unicem	mit	21,42 (6,69)
		ohne	23,54 (6,22)
FRC Postec	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	mit	27,54 (2,78)
		ohne	27,48 (9,80)
	Variolink II/Excite DSC	mit	26,43 (4,51)
		ohne	24,31 (3,64)
	Panavia F 2.0	mit	25,57 (1,67)
		ohne	23,52 (6,95)
	RelyX Unicem	mit	31,71 (0,74)
		ohne	28,57 (4,65)

DT: Double Taper, FRC: Fibre reinforced Compsite

Die dreifaktorielle Varianzanalyse im Aufbaukomposit ergab, dass sich sowohl die Art des Stiftes als auch die adhäsiven Befestigungssysteme signifikant auf die Haftfestigkeit auswirkten (jeweils p=0,004), während die Behandlung der Stifte mit Haftsilan nur einen schwachen Einfluss auf die Messwerte hatte (p=0,039). Signifikante zweifache oder dreifache Wechselwirkungen zwischen den drei Faktoren (Stift, Befestigungssystem, Haftsilan) wurden nicht nachgewiesen.

Tabelle 12. Ergebnisse der dreifaktoriellen Varianzanalyse zur Überprüfung des Einflusses von Stiftart, Befestigungssystem und Haftsilan auf die Verankerung der Stifte im Aufbaukomposit (SPSS – Ausgabe)

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	1781,144(a)	23	77,441	2,023	,009
Konstanter Term	70487,982	1	70487,982	1841,647	,000
Stift	548,144	3	182,715	4,774	,004
Befestigungssystem	447,489	2	223,744	5,846	,004
Haftsilan	167,277	1	167,277	4,370	,039
Stift * Befestigungssystem	360,938	6	60,156	1,572	,164
Stift * Haftsilan	27,439	3	9,146	,239	,869
Befestigungssystem * Haftsilan	7,876	2	3,938	,103	,902
Stift * Befestigungssystem * Haftsilan	221,981	6	36,997	,967	,452
Fehler	3674,345	96	38,274		
Gesamt	75943,472	120			
Korrigierte Gesamtvariation	5455,489	119			

3.1.3.2 Einfluss der Silanisierung

Die statistische Auswertung ergab einen schwachen signifikanten Einfluss der Behandlung der Stifte mit Haftsilan auf die Haftfestigkeitswerte.

3.1.3.3 Unterschiede zwischen den Stiften

Die Verwendung von FRC Postec führte zu einem höheren Mittelwert (26,89 MPa) als die Verwendung von DT Light Post bzw. DT White Post. Zwischen den beiden letztgenannten Stiften wurde kein signifikanter Unterschied beobachtet (Tabelle 13).

Tabelle 13. Unterschiedliche Verankerung der untersuchten faserverstärkten Kompositstifte im Aufbaukomposit (Tukey-Test). Statistisch nicht signifikant unterschiedliche Mittelwerte sind in derselben Signifikanzgruppe zusammengefasst

Stift	N	Signifikanzgruppe	
		1	2
DT Light Post	40	22,36 MPa	
DT White Post	40	23,46 MPa	
FRC Postec	40		26,89 MPa
Signifikanz (p<0,05)		0,706	1,000

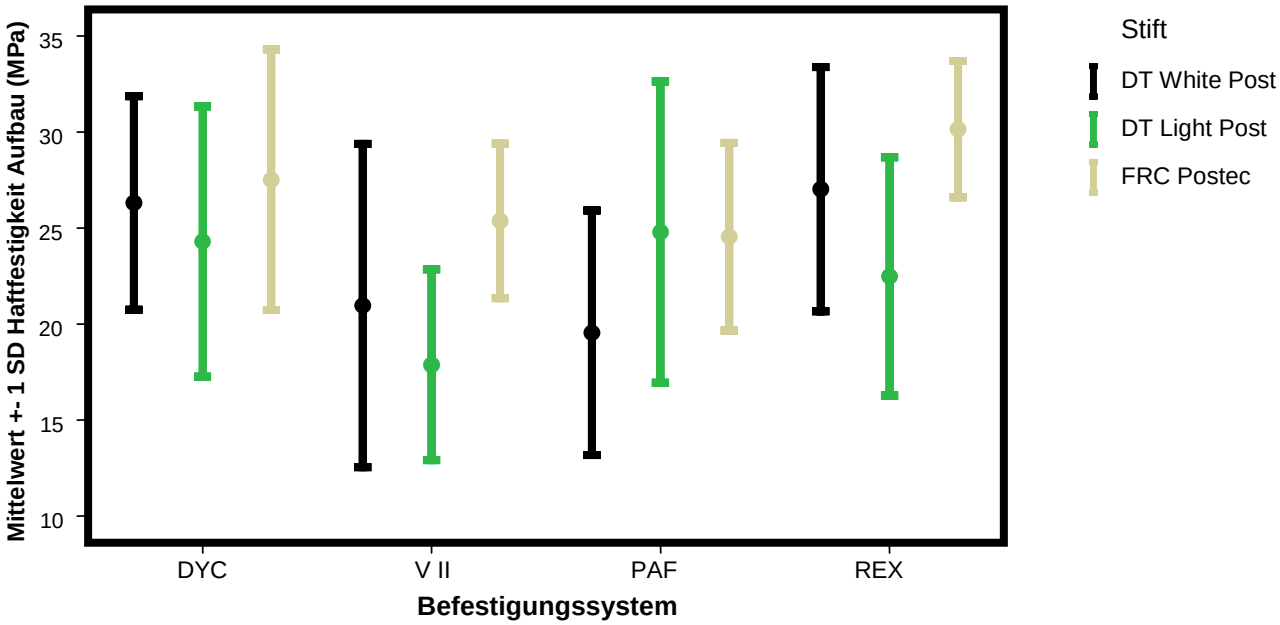


Abb. 5. Grafische Darstellung der Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen im Aufbaukomposit (Mittelwerte ± Standardabweichungen). Einfluss der drei Stiftarten innerhalb der einzelnen Befestigungssystemgruppen (gepoolte Daten mit und ohne Silanisierung der Stifte).
DT: Double Taper, FRC: Fibre reinforced Compsite, DYC: Dyract Cem Plus, VII: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

3.1.3.4 Einfluss der Befestigungssysteme

Die Zementierung mit RelyX Unicem führte zu einem signifikant großen Mittelwert im Vergleich mit den anderen Befestigungssystemen. Der Mittelwert bei Zementierung mit Panavia F 2.0 lag zwischen den Mittelwerten von Variolink II einerseits (21,40 MPa) und den beiden Dyract Cem plus und RelyX Unicem anderseits. Kein signifikanter Unterschied zeigte sich zwischen den letztgenannten Befestigungsmaterialien und Panavia F 2.0, sowie zwischen Panavia F 2.0 und Variolink II (Tabelle 14).

Tabelle 14. Unterschiedliche Verankerung der Stifte im Aufbaukomposit bei Verwendung der vier untersuchten Befestigungssysteme (Tukey-Test). Statistisch nicht signifikant unterschiedliche Mittelwerte sind in derselben Signifikanzgruppe zusammengefasst

Befestigungssystem	N	Signifikanzgruppe	
		1	2
Excite DSC/Variolink II	30	21,40 MPa	
Panavia F 2.0	30	22,96 MPa	22,96 MPa
Prime&Bond NT+Activator/Dycract Cem plus	30		26,04 MPa
RelyX Unicem	30		26,55 MPa
Signifikanz (p<0,05)		0,764	0,118

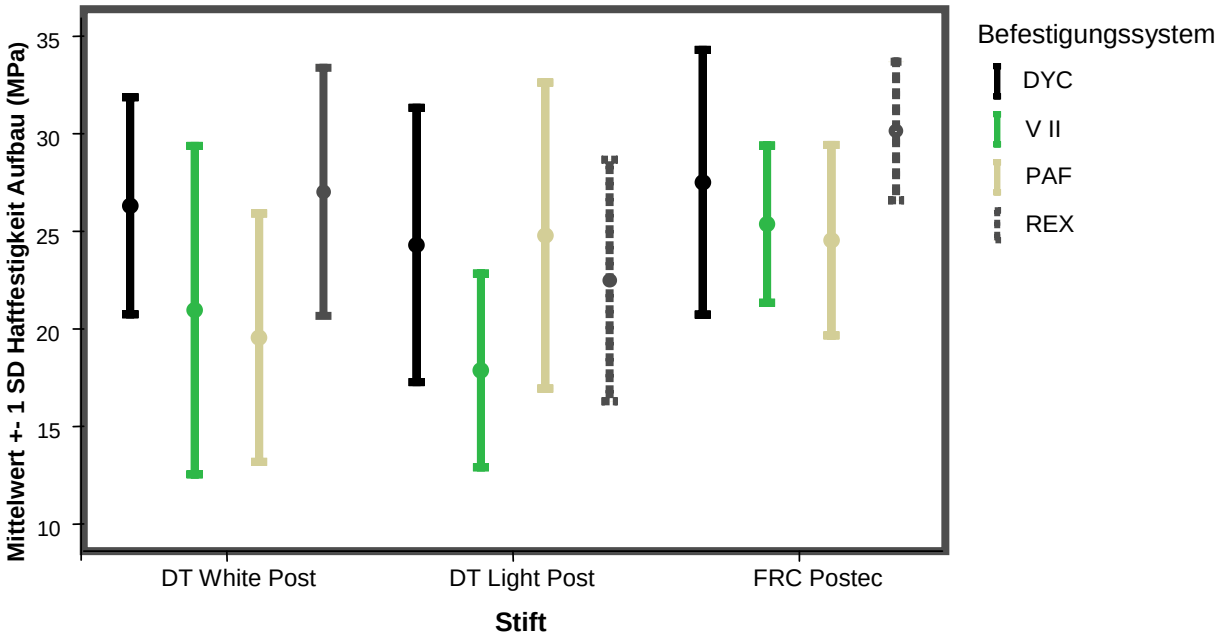


Abb. 6. Grafische Darstellung der Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen im Aufbaukomposit (Mittelwerte ± Standardabweichungen). Einfluss der vier Befestigungssysteme innerhalb der drei Stiftgruppen (gepoolte Daten mit und ohne Silanisierung der Stifte).
DT: Double Taper, FRC: Fibre reinforced Compsite, DYC: Dyract Cem Plus, VII: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicom

3.2. Analysen der Trennflächen im Rasterelektronenmikroskop (REM)

3.2.1. Trennflächen nach Ausstoßen der Stifte aus den Wurzelkanälen

3.2.1.1 Überblick

In REM-Untersuchungen wurden von den Wurzelkanalproben sowohl die Kanalwände als auch die Stiftoberflächen untersucht. Dabei wurde festgestellt, wo die Reste der Befestigungsmaterialien haften geblieben sind. Die Lokalisierung der Reste der Befestigungsmaterialien auf der Stiftoberfläche, der Kanalwand oder auf beiden sollte Aufschluss darüber geben, ob das Versagen bei der gemessenen Kraft zwischen Dentin und Befestigungsmaterial oder zwischen Befestigungsmaterial und Stift aufgetreten ist.

Die Tabellen 15 und 16 sowie die Abbildung 7 zeigen die Ergebnisse der REM – Analysen.

Tabelle 15. Ergebnisse der REM – Analysen zur Lokalisation des Verbundversagens

Stifte	Befestigungs-system	Silan	Ablösung des Stifts vom Befestigungsmaterial, Befestigungsmaterial bleibt auf Kanalwand (n)	Befestigungs-material löst sich samt Stift von Kanalwand (n)	Gemischte Ablösung (n)
DTWP	DYC	+	4	0	1
		-	3	0	2
	V II	+	5	0	0
		-	5	0	0
	PAF	+	0	3	2
		-	4	0	1
	REX	+	2	1	2
		-	1	1	3
DTLP	DYC	+	5	0	0
		-	5	0	0
	V II	+	5	0	0
		-	5	0	0
	PAF	+	0	2	3
		-	1	3	1
	REX	+	3	1	1
		-	2	0	3
FRCP	DYC	+	4	0	1
		-	5	0	0
	V II	+	4	1	0
		-	5	0	0
	PAF	+	1	3	1
		-	2	1	2
	REX	+	1	2	2
		-	0	3	2

DTWP: Double Taper White Post, DTLP: Double Taper Light Post, FRCP: Glass Fibre reinforced Composite Postec, DYC: Dyract Cem Plus, V II: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

Tabelle 16: Einfluss der drei Faktoren (Silanisierung, Stiftart, Befestigungssystem) auf die Lokalisation des Verbundversagens

Faktoren	Ablösung des Stifts vom Befestigungsmaterial, Befestigungsmaterial bleibt auf Kanalwand (n)	Befestigungsmaterial löst sich samt Stift von Kanalwand (n)	Gemischte Ablösung (n)	Gesamtzahl (n)
S+	34	13	13	60
S-	38	8	14	60
Summe	72	21	27	120
DTWP	24	5	11	40
DTLP	26	6	8	40
FRCP	22	10	8	40
Summe	72	21	27	120
DYC	26	0	4	30
V II	29	1	0	30
PAF	8	12	10	30
REX	9	8	13	30
Summe	72	21	27	120

S+: Die Stifte wurden mit einem Haftsilan silanisiert, S-: Die Stifte wurden nicht silanisiert
DTWP: Double Taper White Post, DTLP: Double Taper Light Post, FRCP: Glass Fibre reinforced Composite Postec, DYC: Dyract Cem Plus, V II: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

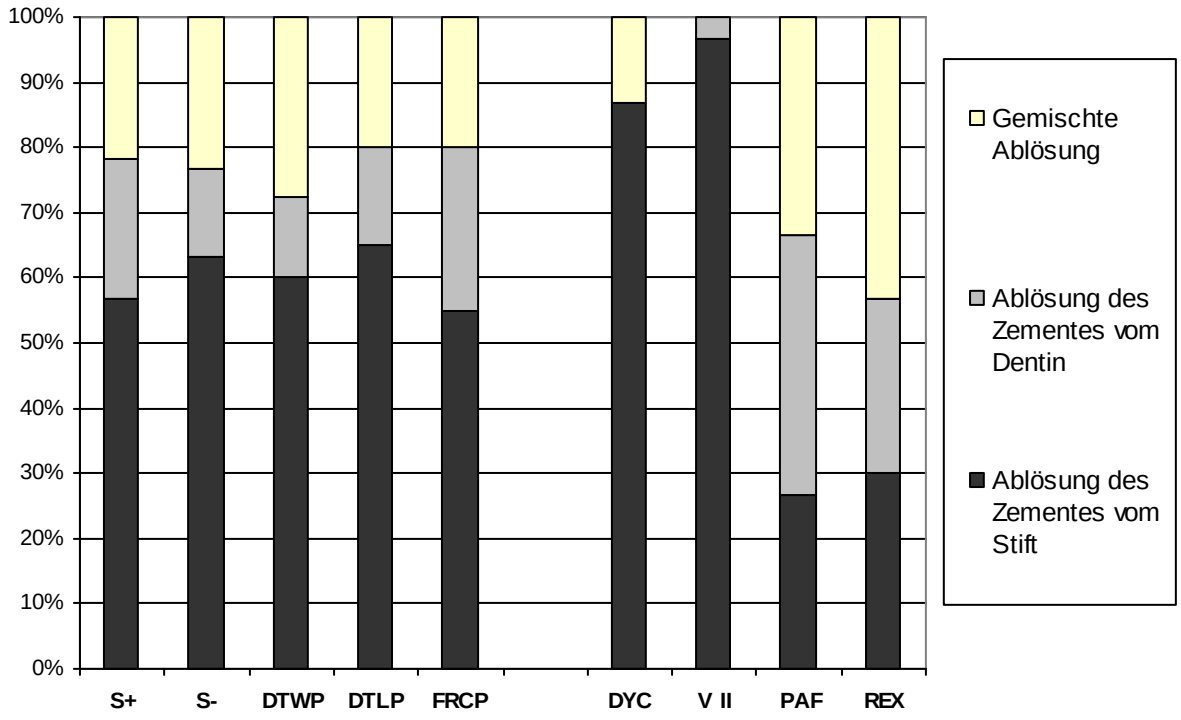


Abb. 7. Prozentualer Anteil von anhaftendem Befestigungsmaterial auf der Stiftoberfläche sowie auf dem Dentin.
S+: Die Stifte wurden mit einem Haftsilan silanisiert

Bei genauerer Betrachtung der Verteilung der Versagensarten wird deutlich, dass die Lokalisation des Versagens, erkennbar an der Anhaftung von Befestigungsmaterial an der Kanalwand bzw. an den Stiften, weder vom Haftsilan noch von der Art der Stifte abhing, sondern nur vom verwendeten Befestigungssystem.
In der Trennanalyse zeigte sich, dass bei Zementierung mit Dyract Cem Plus und Variolink II der Verbund zwischen Befestigungsmaterial und Kanalwand stärker war als der zwischen Befestigungsmaterial und Stift. Im Gegensatz dazu war der Verbund zwischen Befestigungsmaterial und Stift bei Panavia F 2.0 stärker als der zwischen Befestigungsmaterial und Kanalwand. Bei Zementierung mit RelyX Unicem war der Verbund des Befestigungsmaterials zum Stift ähnlich wie der zur Kanalwand.

Wie bereits erwähnt, zeigte die Trennflächenanalyse, dass sich sowohl Variolink II als auch Dyract Cem Plus bevorzugt vom Stift ablösten, d.h. das Befestigungsmaterial blieb überwiegend auf dem Dentin haften. Daraus und aus der Tatsache, dass mit Variolink II (27,44 MPa) höhere Werte gemessen wurden als mit Dyract Cem Plus (19,29 MPa), konnte geschlossen werden, dass die beiden Befestigungsmaterialien eine unterschiedlich gute Verbindungen zum Stift aufweisen.

3.2.1.2 DT White Post

Die Abbildungen 8a und 8b zeigen die Stiftoberfläche von DT White Post im Originalzustand.

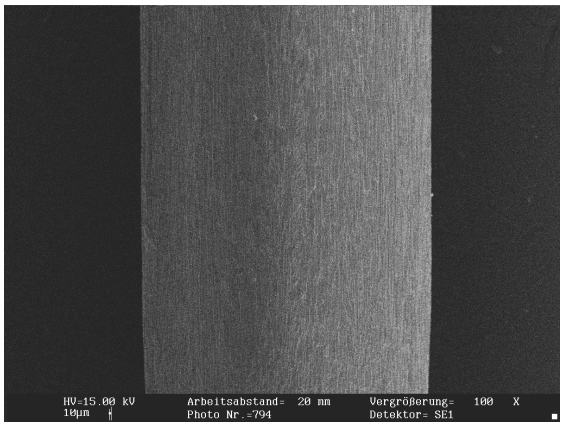


Abb. 8a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme vom Double Taper White Post im Originalzustand (Originalvergrößerung 100fach).

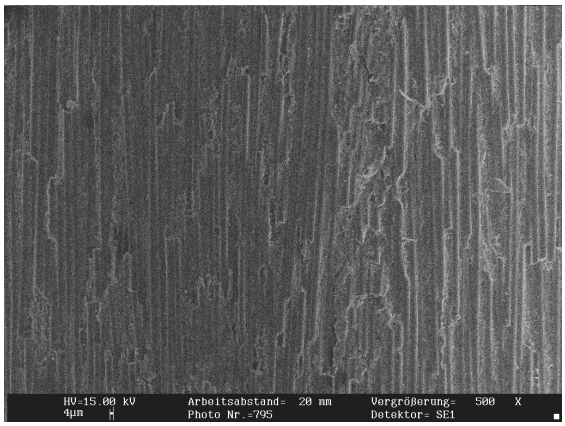


Abb. 8b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme vom Double Taper White Post im Originalzustand (Originalvergrößerung 500fach).

a) Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT (Kanalinnenwand, Stift)

a.1) Mit Silanbehandlung

In der REM-Untersuchung waren in vier der fünf Proben, die mit Dyract Cem Plus zementiert wurden, großflächig mit Zement bedeckte Kanalinnenwände erkennbar. Nur wenige Reste des Befestigungsmaterials fanden sich auf den Stiftoberflächen (Abb. 9a, 9b). Lediglich bei einer Probe zeigten sich sowohl auf der Oberfläche des Stiftes als auch an der Kanalinnenwand Reste des Befestigungsmaterials.

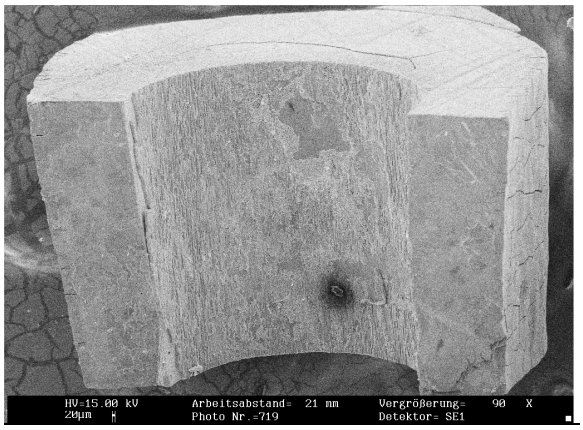


Abb. 9a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Fast die gesamte Oberfläche ist vom Zement bedeckt.

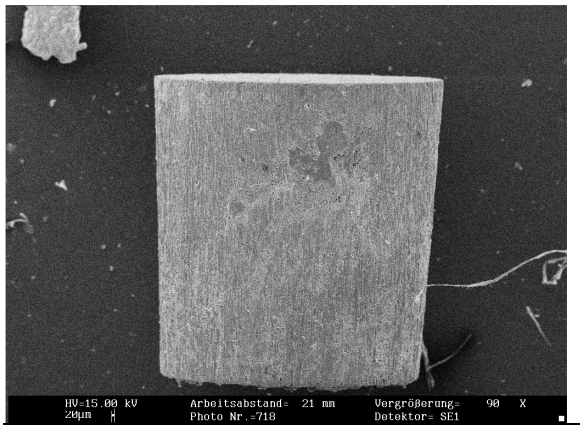


Abb. 9b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von einem mit Dyract Cem Plus zementierten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper White Post nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Nur wenige Reste des Befestigungsmaterials sind noch auf der Stiftoberfläche.

a.2) Ohne Silanbehandlung

Bei den mit Dyract Cem Plus zementierten Proben wurde bei drei von fünf Proben auf den Kanalinnenwänden eine großflächige Bedeckung mit Befestigungsmaterial beobachtet. Nur wenige Reste des Befestigungsmaterials waren auf den Stiftoberflächen sichtbar. Bei zwei Proben waren die Zementreste sowohl auf der Oberfläche des Stiftes als auch an der Kanalinnenwand gleichmäßig verteilt.

b) Variolink II/Excite DSC (Kanalinnenwand, Stift)

b.1) Mit Silanbehandlung

Bei den mit Variolink II zementierten Proben zeigten sich Reste des Befestigungsmaterials bei allen fünf Proben überwiegend auf den Kanalainnen-

wänden, während auf den Stiftoberflächen nur sehr wenige Reste des Befestigungsmaterials gefunden wurden.

b.2) Ohne Silanbehandlung

Die Proben ohne Silanbehandlung hatten die gleiche Oberflächenstruktur wie die mit Silanbehandlung (Abb. 10a, 10b).

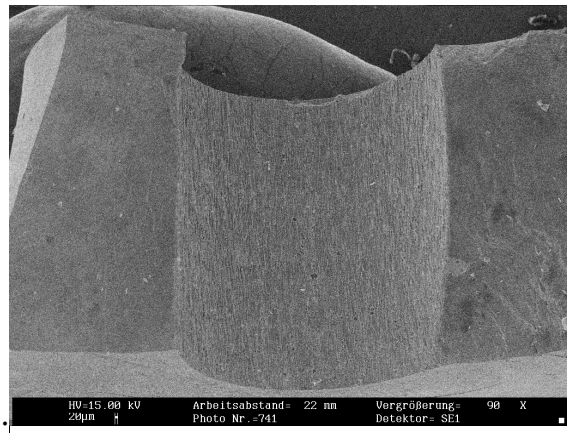


Abb. 10a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Die Kanalinnenwand ist vollständig vom Zement bedeckt, die Impressionen der Stiftoberfläche sind zu erkennen.

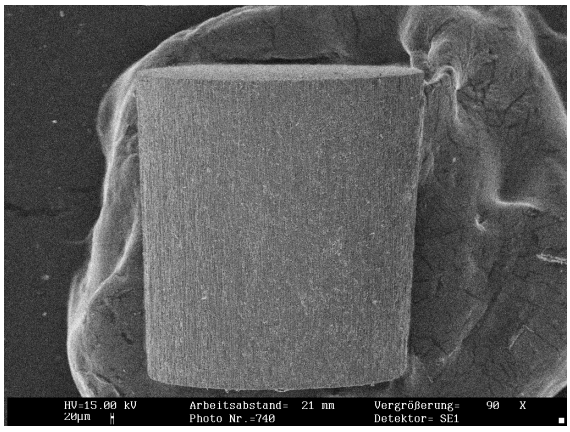


Abb. 10b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Variolink II befestigten und nicht silanisierten Double Taper White Post nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist fast vollständig frei von Befestigungsmaterialresten, und zeigt deutlich die Fasern des Stiftes.

c) Panavia F 2.0 (Kanalinnenwand, Stift)

c.1) Mit Silanbehandlung

Bei Zementierung der Stifte mit Panavia F 2.0 fanden sich die Zementreste bei drei der Proben überwiegend auf den Stiftoberflächen. Entsprechend traten auf den Kanalinnenwänden nur noch geringe Reste des Befestigungsmaterials in Erscheinung. Bei zwei der fünf Proben waren die Befestigungsmaterialreste sowohl auf der Stiftoberfläche als auch an den Kanalinnenwänden gleichmäßig verteilt.

c.2) Ohne Silanbehandlung

In der REM-Untersuchung wurden in vier der fünf Proben, die mit Panavia F 2.0 zementiert wurden, großflächig mit Zement bedeckte Kanalinnenwände gefunden. Nur wenige Reste des Befestigungsmaterials fanden sich auf den Stiftoberflächen (Abb. 11a, 11b). Lediglich bei einer Probe waren sowohl auf der Oberfläche des

Stiftes als auch an der Kanalinnenwand gleichmäßige Reste des Befestigungsmaterials erkennbar.

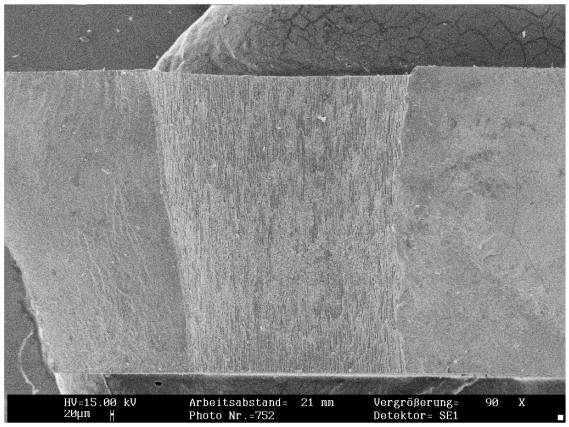


Abb. 11a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Nahezu die gesamte Kanalinnenwand ist vom Zement bedeckt, und zeigt die Impressionen der Stiftoberfläche.

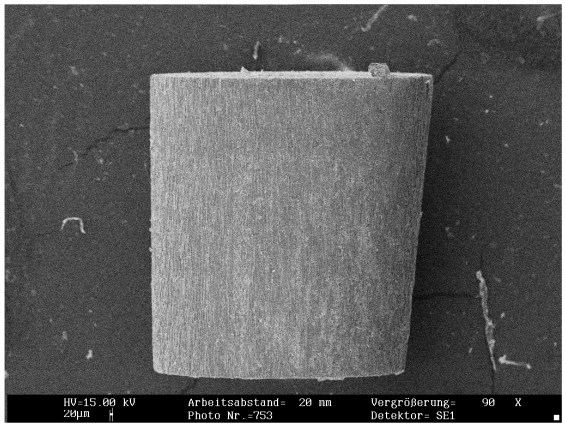


Abb. 11b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Panavia F 2.0 zementierten und nicht silanisierten Double Taper White Post nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist nahezu frei von Befestigungsmaterial-resten. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

d) RelyX Unicem (Kanalinnenwand, Stift)

d.1) Mit Silanbehandlung

Bei den mit RelyX Unicem zementierten DT White Post Stiften zeigten sich Reste des Befestigungsmaterials bei zwei der Proben sowohl auf den Oberflächen des Stiftes als auch an den Kanalinnenwänden. Bei den anderen beiden Proben in dieser Gruppe fanden sich die Zementreste überwiegend auf den Kanalinnenwänden, während auf den Stiftoberflächen nur wenige Reste des Zementes gefunden wurden. Lediglich bei einer Probe wurden großflächig mit Zement bedeckte Stiftoberflächen und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Kanalinnenwänden beobachtet.

d.2) Ohne Silanbehandlung

Bei den mit RelyX Unicem zementierten Stiften waren Reste des Befestigungsmaterials bei drei der Proben sowohl auf der Oberflächen des Stiftes als auch an den Kanalinnenwänden sichtbar. Bei einer der fünf Proben wurden die Zementreste überwiegend auf den Kanalinnenwänden beobachtet, während auf den

Stiftoberflächen nur wenige Reste des Zementes gefunden wurden. Lediglich bei der fünften Probe traten großflächig mit Zement bedeckte Stiftoberflächen und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Kanalinnenwänden in Erscheinung.

3.2.1.3 DT Light Post

Die Abbildungen 12a und 12b zeigen die Stiftoberfläche von DT Light Post im Originalzustand.

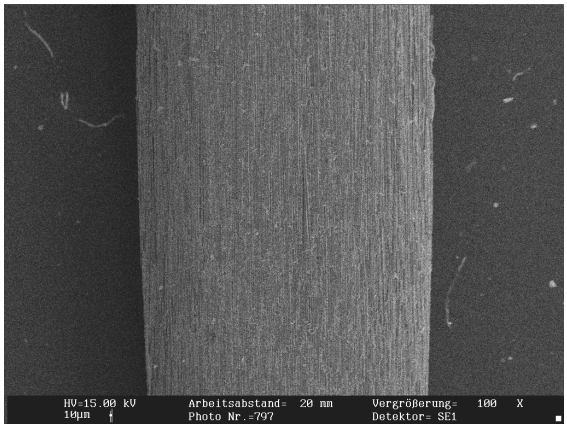


Abb. 12a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme vom Double Taper Light Post im Originalzustand (Originalvergrößerung 100fach).

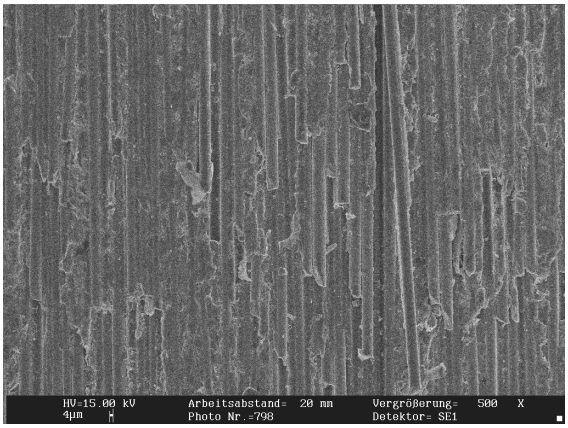


Abb. 12b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme vom Double Taper Light Post im Originalzustand (Originalvergrößerung 500fach).

a) Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT (Kanalinnenwand, Stift)

a.1) Mit Silanbehandlung

Bei den mit Dyract Cem Plus zementierten DT Light Post Stiften waren Reste des Befestigungsmaterials bei allen fünf Proben überwiegend auf den Kanalinnenwänden erkennbar, während auf den Stiftoberflächen nur wenige Reste des Befestigungsmaterials gefunden wurden.

a.2) Ohne Silanbehandlung

Hier zeigten die Proben, die ohne Silanbehandlung fertig gestellt wurden, die gleiche Oberflächenstruktur wie die Proben, die mit Haftsilan behandelt wurden (Abb. 13a, 13b).

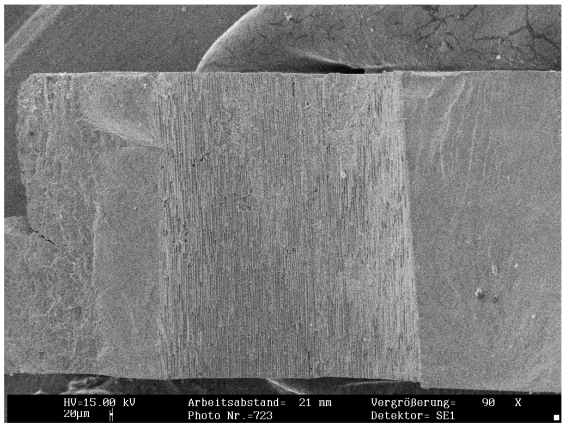


Abb. 13a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Die Kanalinnenwand ist vollständig vom Zement bedeckt, die Impressionen der Stiftoberfläche sind zu erkennen.

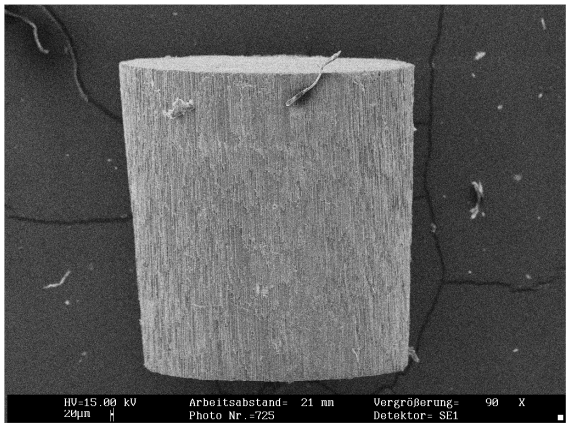


Abb. 13b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Dyract Cem Plus befestigten und nicht silanisierten Double Taper Light Post nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist fast vollständig frei von Befestigungsmaterialresten. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

b) Variolink II/Excite DSC (Kanalinnenwand, Stift)

b.1) Mit Silanbehandlung

Bei allen fünf Proben, die mit Variolink II zementiert wurden, waren großflächig mit Zement bedeckte Kanalinnenwände sichtbar. Nur wenige Reste des Befestigungsmaterials fanden sich auf den Stiftoberflächen (Abb. 14a, 14b).

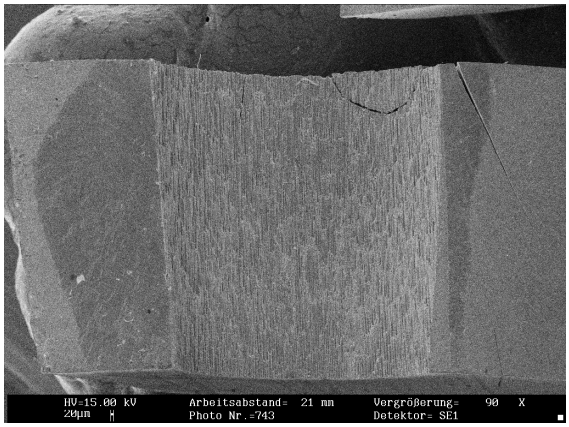


Abb. 14a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Die gesamte Kanalinnenwand ist vom Zement bedeckt, die Impressionen der Stiftoberfläche sind zu erkennen.

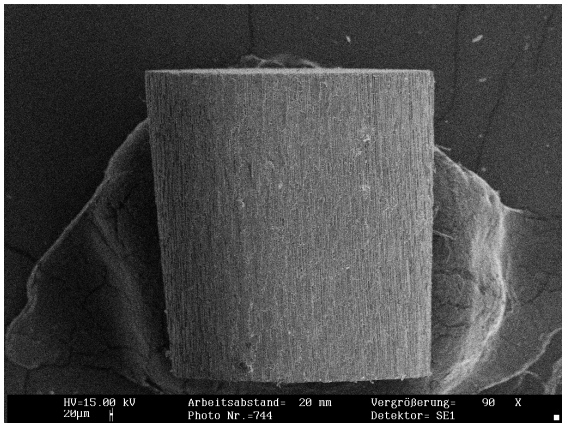


Abb. 14b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Variolink II befestigten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper Light Post nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Die gesamte Oberfläche des Stiftes ist frei von Resten des Befestigungsmaterials, und zeigt deutlich die Fasern des Stiftes.

b.2) Ohne Silanbehandlung

Hier hatten die Proben ohne Silanbehandlung die gleiche Oberflächenstruktur wie die Proben mit Silanbehandlung.

c) Panavia F 2.0 (Kanalinnenwand, Stift)

c.1) Mit Silanbehandlung

Bei Zementierung der Proben mit Panavia F 2.0 fanden sich die Zementreste bei zwei der Proben überwiegend auf den Stiftoberflächen. Dementsprechend wurden auf den Kanalinnenwänden nur noch geringe Reste des Befestigungsmaterials beobachtet (Abb. 15a, 15b). Bei drei der fünf Proben zeigten sich die Befestigungsmaterialreste sowohl auf den Oberflächen der Stifte als auch an den Kanalinnenwänden.

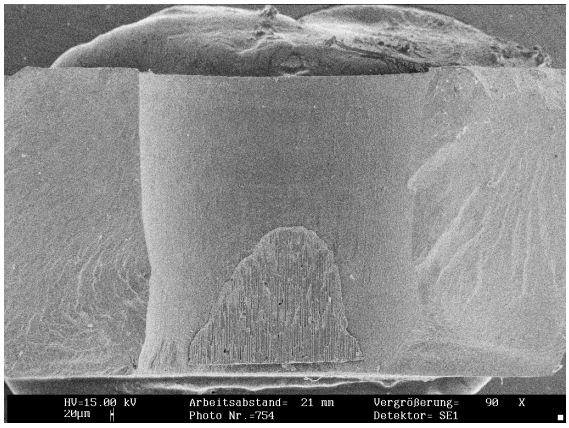


Abb. 15a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Nur wenige Reste des Befestigungsmaterials sind noch auf der Kanalinnenwand.

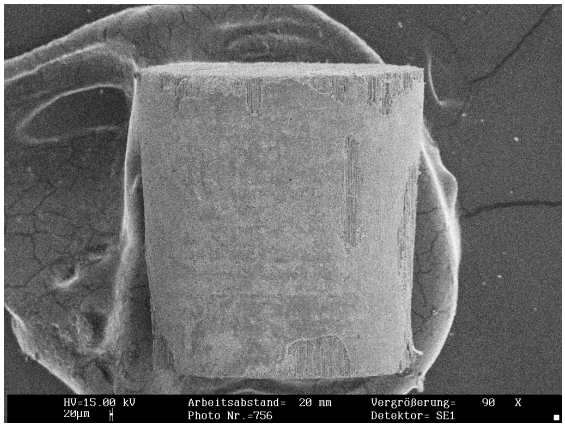


Abb. 15b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Panavia F 2.0 zementierten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper Light Post nach dem Ausstoßversuch (Original-vergrößerung 90fach). Die Stiftoberfläche ist fast vollständig vom Zement bedeckt.

c.2) Ohne Silanbehandlung

Bei den mit Panavia F 2.0 zementierten Stiften traten in drei Fällen großflächig mit Zement bedeckte Stiftoberflächen und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Kanalinnenwänden in Erscheinung (Abb. 16a, 16b). Bei einer der fünf Proben waren die Zementreste überwiegend auf der Kanalinnenwand sichtbar, während auf der Stiftoberfläche nur wenige Reste des Zementes beobachtet wurden.

Bei einer weiteren Probe wurden sowohl auf der Oberfläche des Stiftes als auch an der Kanalinnenwand Reste des Befestigungsmaterials gefunden.

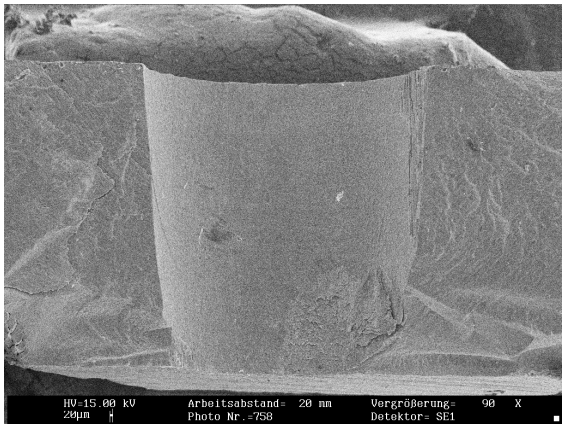


Abb. 16a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Die Kanalinnenwand ist kaum mit Resten des Zements bedeckt.

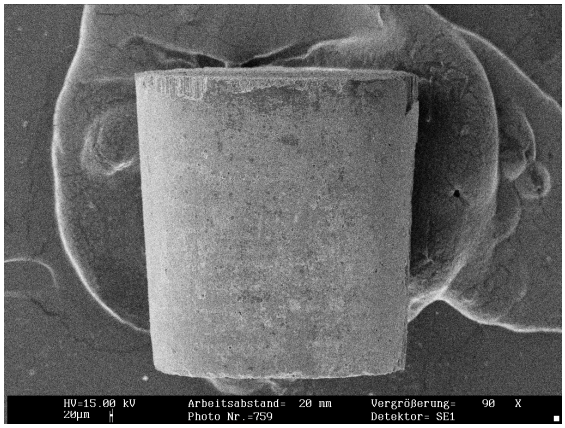


Abb. 16b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Panavia F 2.0 zementierten und nicht silanisierten Double Taper Light Post nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Große Teile der Stiftoberfläche sind vom Zement bedeckt.

d) RelyX Unicem (Kanalinnenwand, Stift)

d.1) Mit Silanbehandlung

Bei den mit RelyX Unicem zementierten Proben wurde bei drei der Proben auf den Kanalinnenwänden eine großflächige Bedeckung mit Befestigungsmaterial beobachtet. Auf den Stiftoberflächen fanden sich nur wenige Reste des Befestigungsmaterials (Abb. 17a, 17b). Bei einer Probe waren großflächig mit Zement bedeckte Stiftoberflächen und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf der Kanalinnenwand sichtbar. Bei einer anderen Probe wurden sowohl auf der Oberfläche des Stiftes als auch an der Kanalinnenwand Reste des Befestigungsmaterials gefunden.

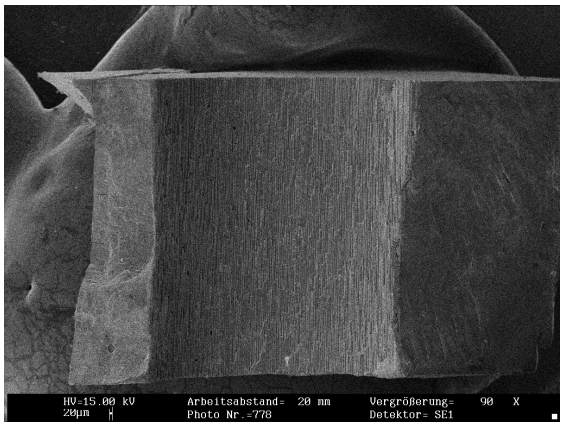


Abb. 17a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Die Kanalinnenwand ist vollständig vom Zement bedeckt, und zeigt die Impressionen der Stiftoberfläche.

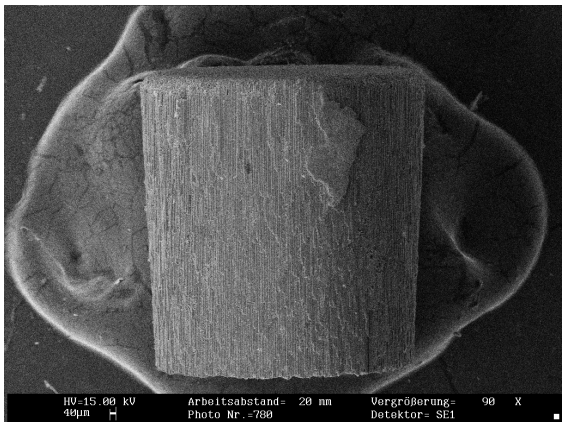


Abb. 17b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit RelyX Unicem zementierten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper Light Post nach dem Ausstoßversuch (Original-vergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist nahezu frei von Befestigungsmaterialresten. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

d.2) Ohne Silanbehandlung

Bei den mit RelyX Unicem zementierten Stiften zeigten sich bei drei der Proben sowohl auf den Oberflächen der Stifte als auch an den Kanalinnenwänden Reste des Befestigungsmaterials. Bei zwei der fünf Proben wurde auf den Kanalinnenwänden eine großflächige Bedeckung mit Befestigungsmaterial beobachtet. Auf den Stiftoberflächen fanden sich nur wenige Reste des Befestigungsmaterials.

3.2.1.4 FRC Postec

Die Abbildungen 18a und 18b zeigen die Stiftoberfläche von FRC Postec im Originalzustand.

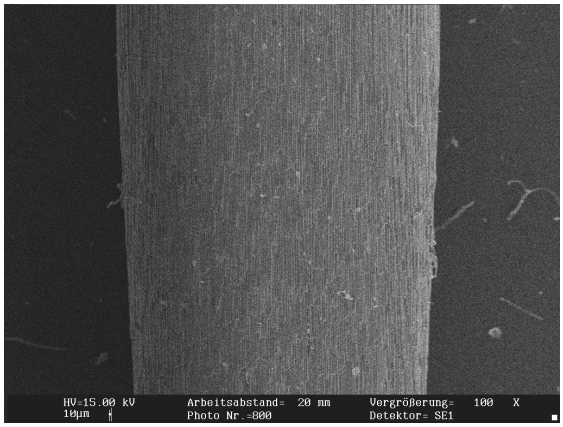


Abb. 18a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme vom Fibre reinforced Composit Postec im Originalzustand (Originalvergrößerung 100fach).

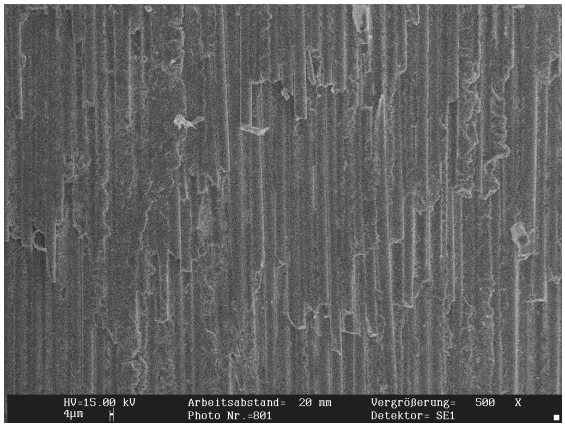


Abb. 18b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme vom Fibre reinforced Composit Postec im Originalzustand (Originalvergrößerung 500fach).

a) Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT (Kanalinnenwand, Stift)

a.1) Mit Silanbehandlung

In der REM-Untersuchung waren in vier der fünf Proben, die mit Dyract Cem Plus zementiert wurden, großflächig mit Zement bedeckte Kanalinnenwände erkennbar. Nur wenige Reste des Befestigungsmaterial fanden sich auf den Stiftoberflächen (Abb. 19a, 19b). Lediglich bei einer Probe wurden sowohl auf der Oberfläche des Stiftes als auch an der Kanalinnenwand Reste des Befestigungsmaterials beobachtet.

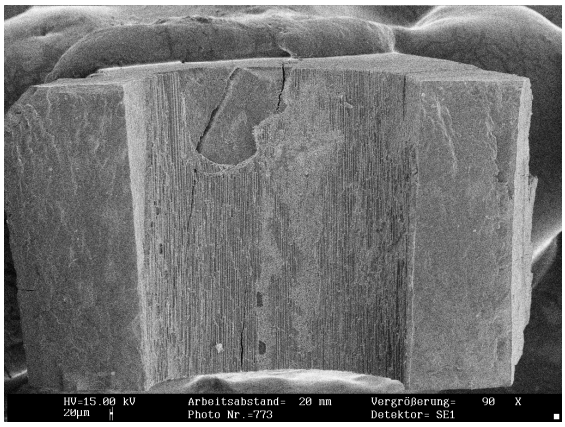


Abb. 19a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Große Teile der Kanalinnenwand sind vom Befestigungs-material bedeckt.

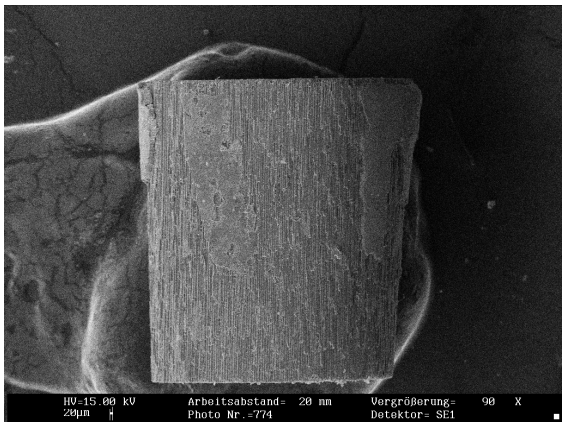


Abb. 19b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Dyract Cem Plus befestigten und mit einem Haftsilan silanisierten Fibre reinforced Composit Postec nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Kleine Teile der Stiftoberfläche sind von Resten des Zements bedeckt.

a.2) Ohne Silanbehandlung

Bei den mit Dyract Cem Plus Zementierten FRC Postec Stiften traten die Reste des Befestigungsmaterials bei allen fünf Proben überwiegend auf den Kanalinnenwänden in Erscheinung, während auf den Stiftoberflächen nur wenige Reste des Befestigungsmaterials gefunden wurden.

b) Variolink II/Excite DSC (Kanalinnenwand, Stift)

b.1) Mit Silanbehandlung

Bei Proben, die mit Variolink II zementiert wurden, waren bei vier der fünf Proben großflächig mit Zement bedeckte Kanalinnenwände und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen erkennbar. Lediglich bei einer Probe wurde auf der Oberfläche des Stiftes eine großflächige Bedeckung mit dem Befestigungsmaterial beobachtet. Dementsprechend fanden sich auf der Kanalinnenwand nur noch geringe Reste des Befestigungsmaterials (Abb. 20a, 20b).

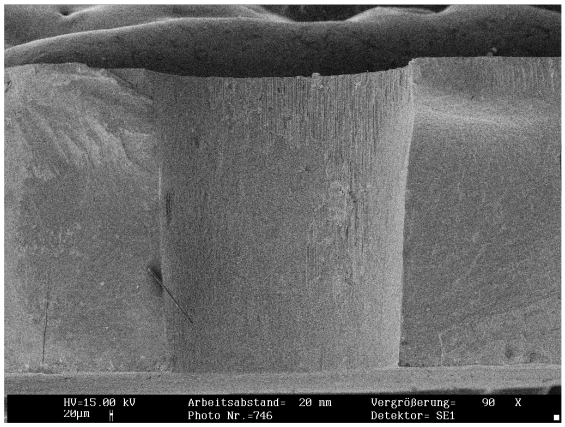


Abb. 20a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Nur wenige Reste des Befestigungsmaterials sind noch auf der Kanalinnenwand.

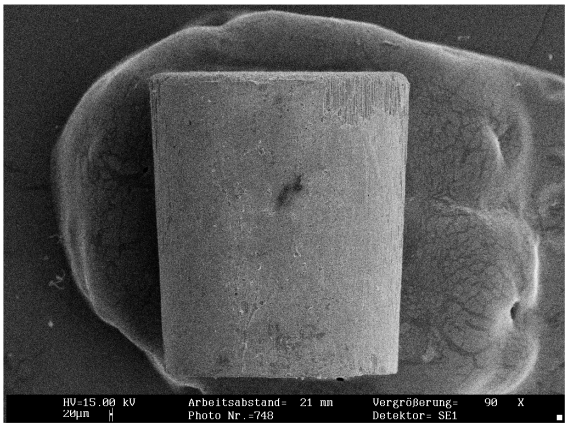


Abb. 20b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Variolink II zementierten und mit einem Haftsilan silanisierten Fibre reinforced Composit Postec nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Die Stiftoberfläche ist fast vollständig vom Befestigungsmaterial bedeckt.

b.2) Ohne Silanbehandlung

Bei Proben, die mit Variolink II zementiert wurden, traten bei allen fünf Proben großflächig mit Zement bedeckte Kanalinnenwände und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen in Erscheinung (Abb. 21a, 21b).

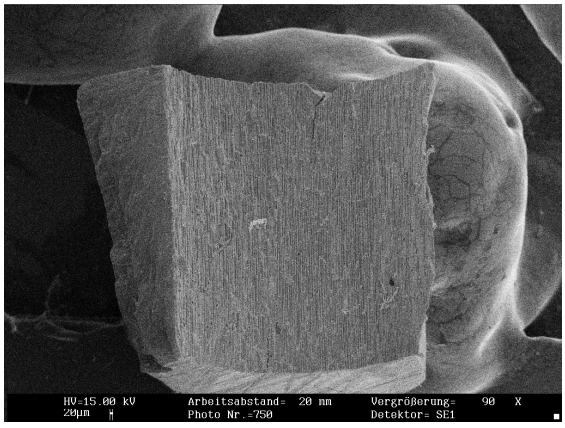


Abb. 21a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Die gesamte Kanalinnenwand ist vom Zement bedeckt, die Impressionen der Stiftoberfläche sind zu erkennen.

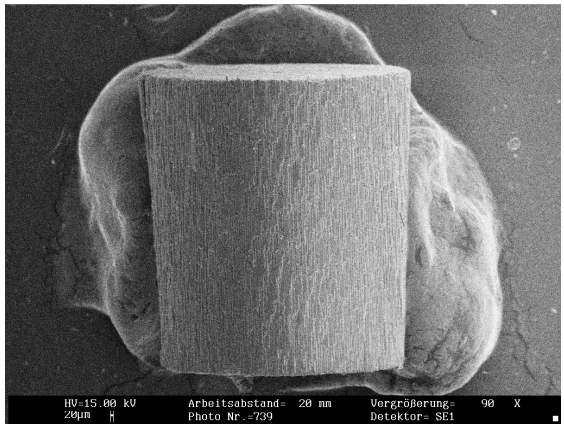


Abb. 21b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Variolink II befestigten und nicht silanisierten Fibre reinforced Composit Postec nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Die gesamte Oberfläche des Stiftes ist frei von Resten des Befestigungsmaterials, und zeigt deutlich die Fasern des Stiftes.

c) Panavia F 2.0 (Kanalinnenwand, Stift)

c.1) Mit Silanbehandlung

Bei den mit Panavia F 2.0 zementierten FRC Postec Stiften fanden sich bei drei der Proben großflächig mit Zement bedeckte Stiftoberflächen und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Kanalinnenwänden. Bei einer der fünf Proben waren die Zementreste überwiegend auf der Kanalinnenwand sichtbar, während auf der Stiftoberfläche nur wenige Reste des Zementes gefunden wurden. Bei einer anderen Probe zeigten sich sowohl auf der Oberfläche des Stiftes als auch an der Kanalinnenwand Reste des Befestigungsmaterials.

c.2) Ohne Silanbehandlung

Bei den mit Panavia F 2.0 zementierten FRC Postec Stiften wurden bei zwei der Proben sowohl auf den Oberflächen der Stifte als auch an den Kanalinnenwänden Reste des Befestigungsmaterials beobachtet (Abb. 22a, 22b). Bei den anderen zwei Proben in dieser Gruppe fanden sich die Zementreste überwiegend auf den Kanalinnenwänden, während auf den Stiftoberflächen nur wenige Reste des Zementes gefunden wurden. Lediglich bei einer Probe waren großflächig mit Zement bedeckte Stiftoberflächen und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf der Kanalinnenwand erkennbar.

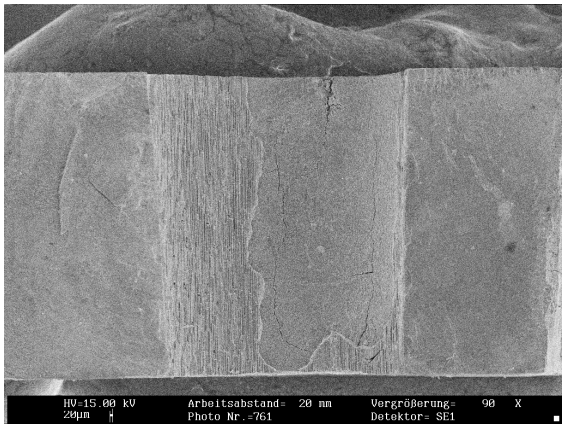


Abb. 22a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach) Teile der Kanalinnenwand sind vom Befestigungs-material bedeckt.

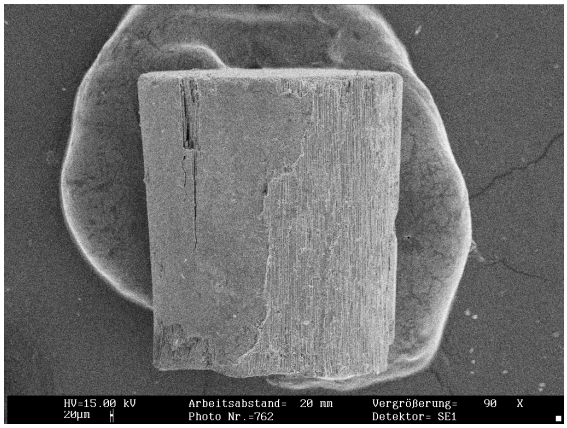


Abb. 22b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Panavia F 2.0 befestigten und nicht silanisierten Fibre reinforced Composit Postec nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist teilweise vom Befestigungsmaterial bedeckt.

d) RelyX Unicem (Kanalinnenwand, Stift)

d.1) Mit Silanbehandlung

FRC Postec Stifte, welche mit Haftsilan behandelt wurden und mit RelyX Unicem zementiert wurden, zeigten sich bei zwei der Proben sowohl auf den Oberflächen der Stifte als auch an den Kanalinnenwänden Reste des Befestigungsmaterials (Abb. 23a, 23b). Bei den anderen zwei Proben in dieser Gruppe traten die Zementreste überwiegend auf den Stiftoberflächen in Erscheinung, während auf den Kanalinnenwänden nur wenige Reste des Zementes gefunden wurden. Lediglich bei einer Probe waren großflächig mit Zement bedeckte Kanalinnenwände und nur wenige Reste des Befestigungsmaterials auf der Stiftoberfläche erkennbar.

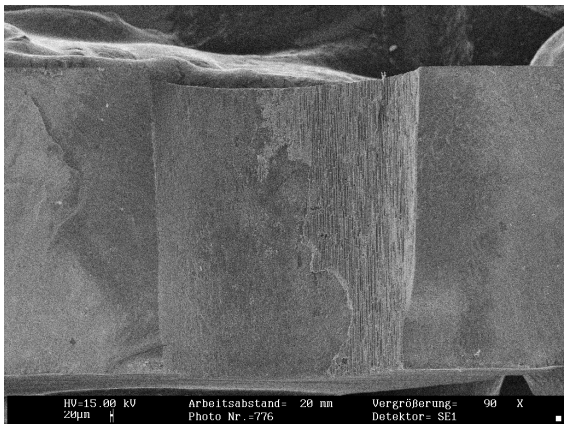


Abb. 23a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Innenwand des Wurzelkanals (Originalvergrößerung 90fach). Teile der Kanalinnenwand sind vom Befestigungs-material bedeckt.

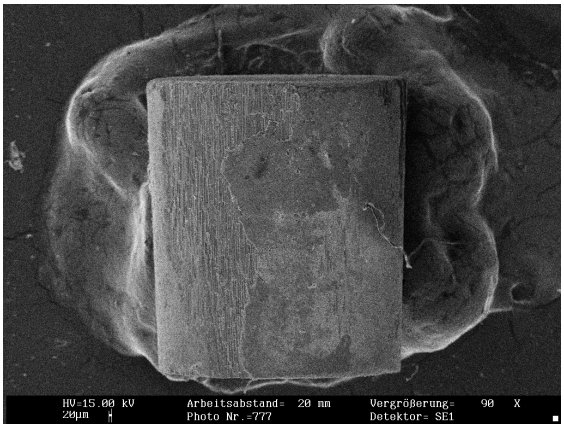


Abb. 23b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit RelyX Unicem befestigten und mit einem Haftsilan silanisierten Fibre reinforced Composit Postec nach dem Ausstoßversuch (Originalvergrößerung 90fach). Teile der Stiftoberfläche sind vom Befestigungs-material bedeckt.

d.2) Ohne Silanbehandlung

Bei den mit RelyX Unicem zementierten Stiften waren bei zwei der Proben sowohl auf den Oberflächen der Stifte als auch an den Kanalinnenwänden Reste des Befestigungsmaterials sichtbar. Bei drei der Proben fanden sich die Zementreste überwiegend auf den Stiftoberflächen. Dementsprechend wurden auf den Kanalinnenwänden nur noch geringe Reste des Befestigungsmaterials beobachtet.

3.2.2. Trennflächen nach Ausstoßen der Stifte aus dem Aufbaukomposit

3.2.2.1 Überblick

Bei den Aufbaukompositproben wurden nur die Stifte in REM untersucht. Die Lokalisierung der Reste der Befestigungsmaterialien auf der Oberfläche von Stift, Aufbaukomposit oder beiden wurde als Kriterium zur Bewertung der Haftfestigkeit verwendet.

Tabelle 17. Ergebnisse der REM – Analysen zur Lokalisation des Verbundversagens

Stifte	Befestigungs-system	Silan	Ablösung des Stifts vom Befestigungsmaterial, Befestigungsmaterial bleibt am Aufbaukomposit (n)	Befestigungs-material löst sich samt Stift von Aufbaukomposit (n)	Gemischte Ablösung (n)
DTWP	DYC	+	4	0	1
		-	5	0	0
	V II	+	5	0	0
		-	5	0	0
	PAF	+	5	0	0
		-	5	0	0
	REX	+	5	0	0
		-	4	0	1
DTLP	DYC	+	5	0	0
		-	5	0	0
	V II	+	3	0	2
		-	5	0	0
	PAF	+	5	0	0
		-	5	0	0
	REX	+	4	0	1
		-	5	0	0
FRCP	DYC	+	5	0	0
		-	4	0	1
	V II	+	5	0	0
		-	5	0	0
	PAF	+	5	0	0
		-	5	0	0
	REX	+	5	0	0
		-	5	0	0

DTWP: Double Taper White Post, DTLP: Double Taper Light Post, FRCP: Glass Fibre reinforced Composite Postec, DYC: Dyract Cem Plus, V II: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

Tabelle 18: Einfluss der drei Faktoren (Silanisierung, Stiftart, Befestigungssystem) im Aufbaukomposit auf die Lokalisation des Verbundversagens

Faktoren	Ablösung des Stifts vom Befestigungsmaterial, Befestigungsmaterial bleibt am Aufbaukomposit (n)	Befestigungsmaterial löst sich samt Stift von Aufbaukomposit (n)	Gemischte Ablösung (n)	Gesamtzahl (n)
S+	56	0	4	60
S-	58	0	2	60
Summe	114	0	6	120
DTWP	38	0	2	40
DTLP	37	0	3	40
FRCP	39	0	1	40
Summe	114	0	6	120
DYC	28	0	2	30
V II	28	0	2	30
PAF	30	0	0	30
REX	28	0	2	30
Summe	114	0	6	120

S+: Die Stifte wurden mit einem Haftsilan silanisiert, S-: Die Stifte wurden nicht silanisiert, DTWP: Double Taper White Post, DTLP: Double Taper Light Post, FRCP: Glass Fibre reinforced Composite Postec, DYC: Dyract Cem Plus, V II: Variolink II, PAF: Panavia F 2.0, REX: RelyX Unicem

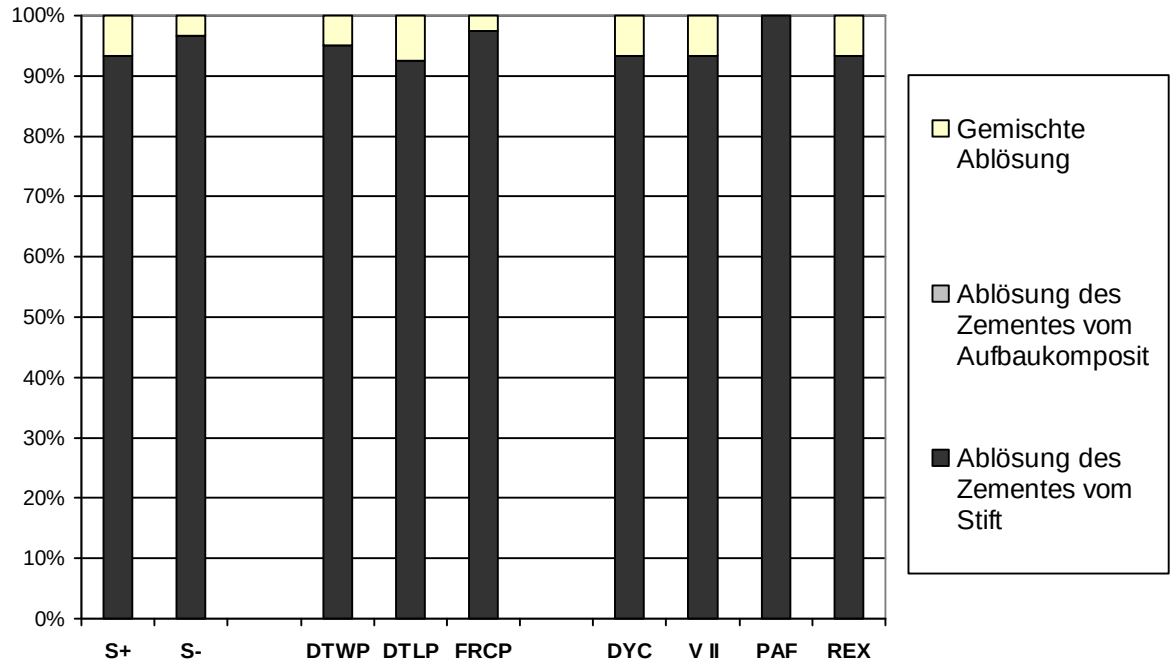


Abb. 24. Prozentualer Anteil von anhaftendem Befestigungsmaterial auf der Stiftoberfläche sowie auf dem Aufbaukomposit.

Die Trennflächenanalyse der Aufbaukompositproben zeigt, dass an den Stiften fast keine Reste der Befestigungsmaterialien gefunden wurden. Daraus konnte geschlossen werden, dass die Reste der Befestigungsmaterialien fast ausschließlich am Aufbaukomposit haften geblieben sind. Die Lokalisierung der Befestigungsmaterialreste ist nicht von Haftsilan, Art des Stiftes oder Art des Befestigungssystems abhängig.

Wie bereits erwähnt, war die Haftung am Aufbaukomposit bei allen Stiften mit allen Befestigungsmaterialien größer als die Haftung am Stift, d.h. alle Befestigungsmaterialien lösten sich vom Stift ab. In Übereinstimmung damit führten alle Befestigungsmaterialien bei der Kombination mit dem Aufbaukomposit zu vergleichbar hohen Haftfestigkeiten. Daraus kann geschlossen werden, dass die Befestigungsmaterialien eine unterschiedlich gute Verbindungen zum Stift erzielen.

Bei den Aufbaukompositproben gab es in der REM-Untersuchung keinen Unterschied zwischen den Proben, die mit Haftsilan behandelt wurden, und den Proben, die ohne Haftsilan fertig gestellt wurden. Aus diesem Grund wurde die Bewertung der beiden Probengruppen gemeinsam beschrieben.

3.2.2.2 DT White Post

a) Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT (Stift)

Bei Aufbaukompositproben, die mit DT White Post verankert und mit den Überschüssen von Dyract Cem Plus bestrichen wurden, fanden sich bei neun der zehn Proben sehr wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den untersuchten Stiftoberflächen (Abb. 25a). Lediglich bei einer silanisierten Probe wurde auf der Stiftoberfläche großflächige Bedeckung (ca. 40%- 60%) mit dem Befestigungsmaterial beobachtet (Abb. 25b).

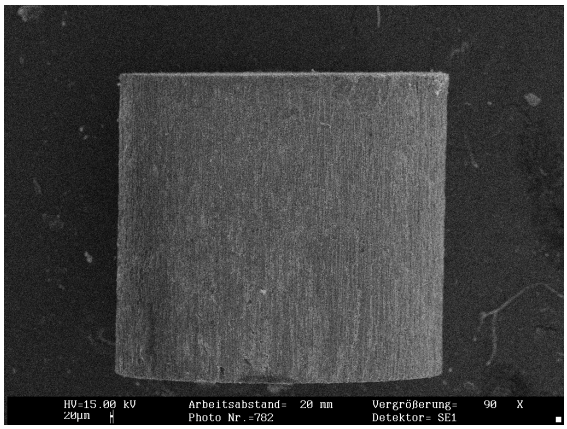


Abb. 25a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Dyract Cem Plus befestigten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper White Post nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist nahezu frei von Befestigungsmaterialresten. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

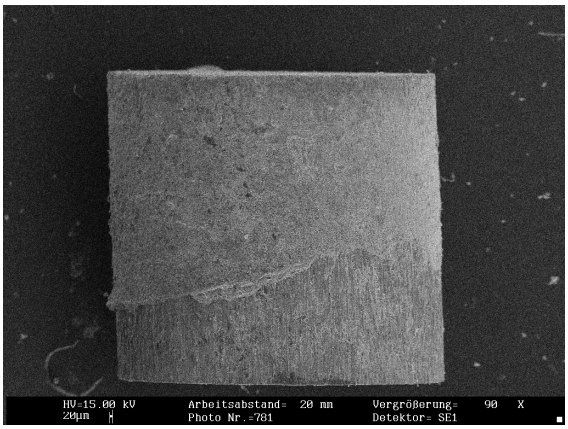


Abb. 25b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Dyract Cem Plus befestigten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper White Post nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Teile der Stiftoberfläche sind vom Befestigungsmaterial bedeckt.

b) Variolink II/Excite DSC (Stift)

Bei den mit den Überschüssen von Variolink II bestrichenen Aufbaukompositproben zeigten sich bei allen silanisierten wie nicht silanisierten Proben sehr wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen.

c) Panavia F 2.0 (Stift)

Bei Aufbaukompositproben, die mit DT White Post verankert und mit den Überschüssen von Panavia F 2.0 bestrichen wurden, fanden sich bei allen silanisierten und nicht silanisierten Proben nur in sehr geringem Umfang Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen (Abb. 26a, 26b).

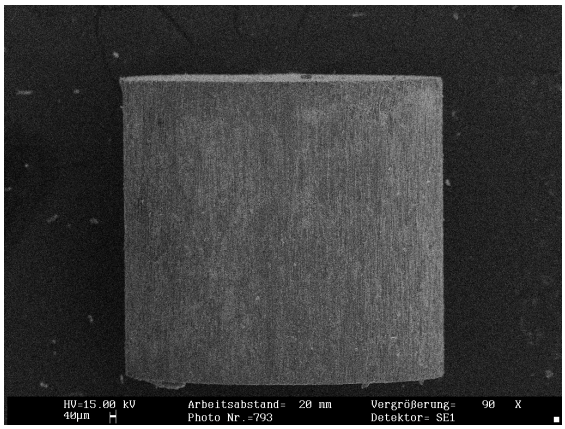


Abb. 26a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Panavia F 2.0 zementierten und nicht silanisierten Double Taper White Post nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist fast vollständig frei von Befestigungsmaterialresten. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

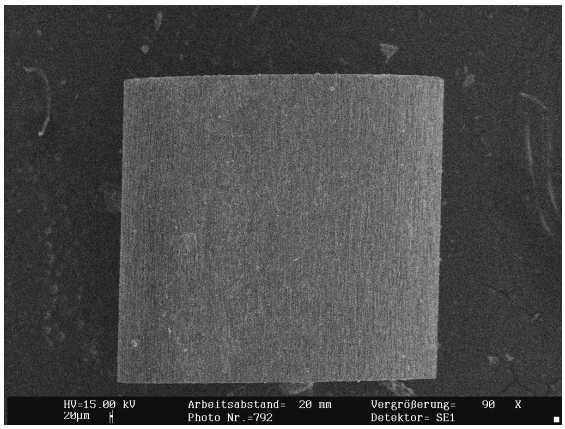


Abb. 26b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Panavia F 2.0 zementierten und nicht silanisierten Double Taper White Post nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist nahezu frei von Befestigungsmaterialresten. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

d) RelyX Unicem (Stift)

Bei Aufbaukompositproben, die mit den Überschüssen von RelyX Unicem bestrichen wurden, waren bei neun der zehn Proben sehr wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen erkennbar. Lediglich bei einer nicht silanisierten Probe wurde eine großflächig (ca. 40%- 60%) mit Zement bedeckte Stiftoberfläche beobachtet.

3.2.2.3 DT Light Post

a) Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT (Stift)

Bei Aufbaukompositproben, die mit DT Light Post verankert und mit den Überschüssen von Dyract Cem Plus bestrichen wurden, wurden bei allen silanisierten und nicht silanisierten Proben sehr wenige Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen gefunden.

b) Variolink II/Excite DSC (Stift)

Die Aufbaukompositproben, die mit DT Light Post verankert und mit den Überschüssen von Variolink II bestrichen wurden, waren bei acht der zehn Proben sehr geringe Reste des Befestigungsmaterials auf den untersuchten Stiftoberflächen

sichtbar (Abb. 27a). Lediglich bei zwei der silanisierten Proben wurde auf den Stiftoberflächen großflächige Bedeckung (ca. 40%- 60%) mit dem Befestigungsmaterial gefunden (Abb. 27b).

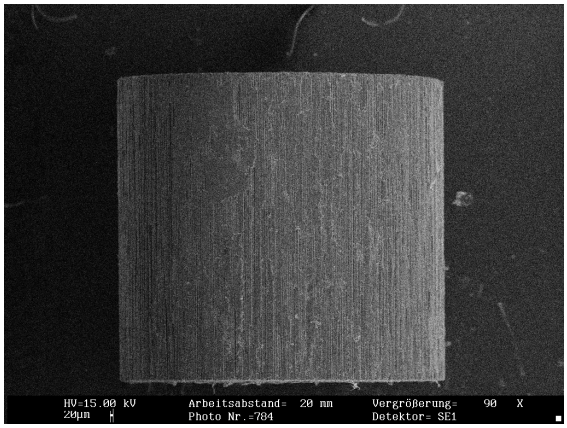


Abb. 27a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Variolink II befestigten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper Light Post nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Auf die Oberfläche des Stiftes sind fast keine Reste des Befestigungsmaterials. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

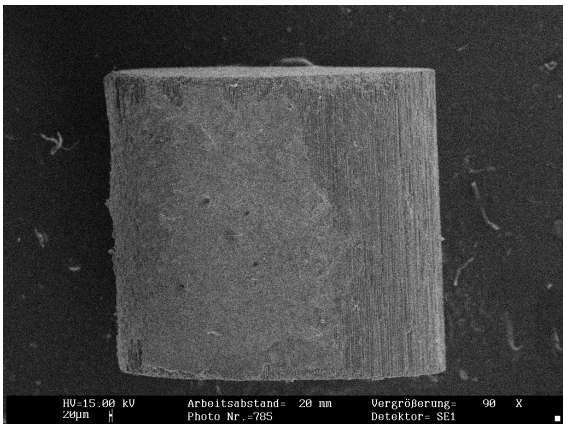


Abb. 27b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Variolink II befestigten und mit einem Haftsilan silanisierten Double Taper Light Post nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Große Teile der Stiftoberfläche sind von Resten des Zements bedeckt.

c) Panavia F 2.0 (Stift)

Bei den mit den Überschüssen von Panavia F 2.0 bestrichenen Aufbaukompositproben waren bei allen silanisierten und nicht silanisierten Proben nur in sehr geringem Umfang Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen sichtbar.

d) RelyX Unicem (Stift)

Bei Aufbaukompositproben, die mit den Überschüssen von RelyX Unicem bestrichen wurden, wurden bei neun der zehn Proben sehr geringe Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen beobachtet. Lediglich bei einer silanisierten Probe traten die Zementreste (ca. 40%- 60%) überwiegend auf der Stiftoberfläche in Erscheinung.

3.2.2.4 FRC Postec

a) Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT (Stift)

Bei Aufbaukompositproben, die mit FRC Postec verankert und mit den Überschüssen von Dyract Cem Plus bestrichen wurden, gab es bei neun der Proben nur geringe Befestigungsmaterialreste auf den Stiftoberflächen (Abb. 28a). Während bei einer nicht silanisierten Probe großflächige Zementreste (ca. 40%- 60%) auf der Stiftoberfläche gefunden wurden (Abb. 28b).

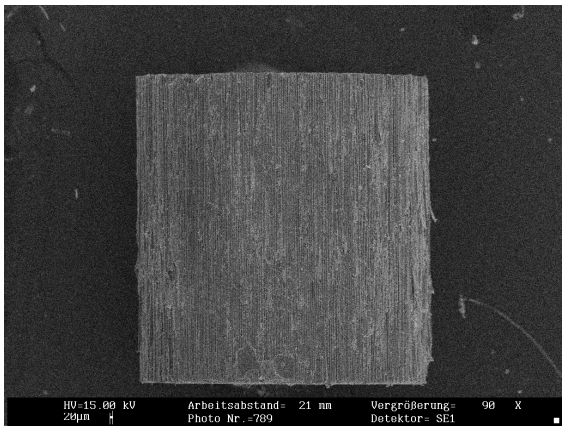


Abb. 28a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Dyract Cem Plus befestigten und nicht silanisierten Fibre reinforced Composit Postec nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist nahezu frei von Befestigungs-materialresten, und zeigt deutlich die Fasern des Stiftes.

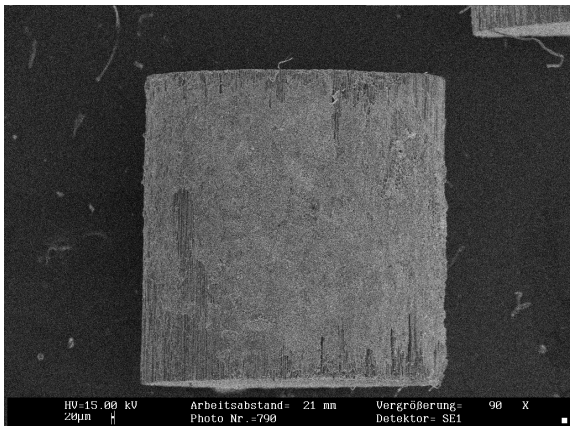


Abb. 28b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit Dyract Cem Plus zementierten und nicht silanisierten Fibre reinforced Composit Postec nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Teile der Stiftoberfläche sind vom Befestigungsmaterial bedeckt.

b) Variolink II/Excite DSC (Stift)

Bei den mit den Überschüssen von Variolink II bestrichenen Aufbaukompositproben wurden bei allen silanisierten und nicht silanisierten Proben nur in sehr geringem Umfang Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen beobachtet.

c) Panavia F 2.0 (Stift)

Bei den mit den Überschüssen von Panavia F 2.0 bestrichenen Aufbaukompositproben fanden sich bei allen silanisierten und nicht silanisierten Proben sehr geringe Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen.

d) RelyX Unicem (Stift)

Bei Aufbaukompositproben, die mit FRC Postec verankert und mit den Überschüssen von RelyX Unicem bestrichen wurden, traten bei allen silanisierten und nicht silanisierten Proben sehr geringe Reste des Befestigungsmaterials auf den Stiftoberflächen in Erscheinung (Abb. 29a, 29b).

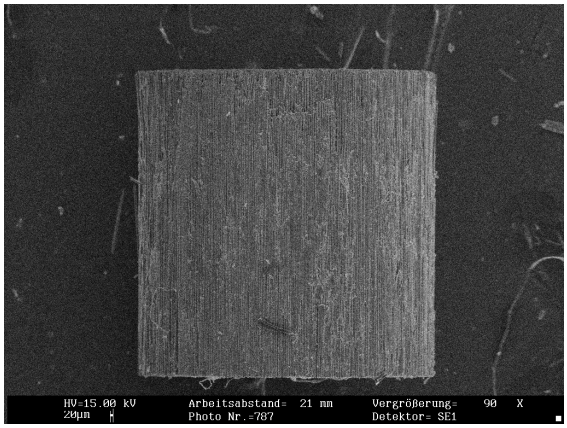


Abb. 29a. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit RelyX Unicem zementierten und nicht silanisiert Fibre reinforced Composit Postec nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Auf die Oberfläche des Stiftes sind fast keine Reste des Befestigungsmaterials. Die Fasern des Stiftes sind zu erkennen.

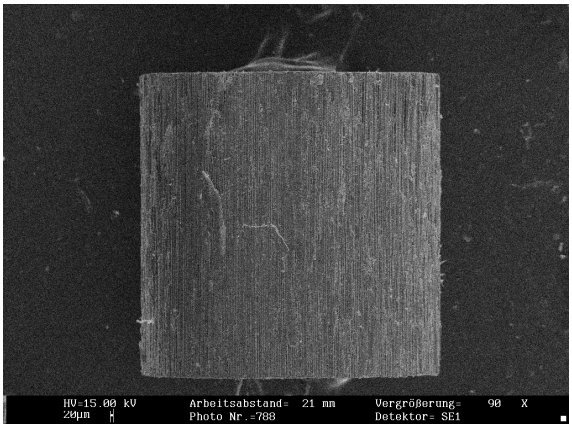


Abb. 29b. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mit RelyX Unicem zementierten und nicht silanisiert Fibre reinforced Composit Postec nach Ausstoßen des Stiftes aus dem Aufbaukomposit (Originalvergrößerung 90fach). Die Oberfläche des Stiftes ist nahezu frei von Befestigungs-materialresten, und zeigt deutlich die Fasern des Stiftes.

4. Diskussion

4.1. Diskussion der Methode

4.1.1. Verwendete Zähne

Für die durchgeführte Untersuchung wurden 120 extrahierte menschliche Zahne herangezogen, deren Wurzelkanäle einen möglichst geraden Verlauf hatten. Es wurde darauf geachtet, kariesfreie Zähne zu verwenden, weil die Haftkraft auf normalem Dentin signifikant höher als auf kariös verändertem Dentin ist (SCHALLER et al. 1998). Um störende Einflüsse anderer Materialien zu vermeiden, wurden füllungsfreie Zähne verwendet. Die Zähne wurden nach der Extraktion in 1%iger wässriger Chloraminlösung gelagert, um Bakterienwachstum und Infektionsrisiko zu verhindern. Um die Veränderung der Eigenschaften der Zahnhartsubstanzen durch bestimmte Aufbewahrungslösungen zu vermeiden, wurde zur Lagerung der Zähne 1%ige Chloraminlösung ausgewählt. Es wurde gezeigt, dass die Lagerung in 1%iger wässriger Chloraminlösung das Adhäsionsverhalten von Kompositen am Dentin nicht beeinträchtigt (HALLER et al. 1993).

4.1.2. Ausstoßversuch

Im Labor durchgeführte In-vitro-Studien zu adhäsiven Dentalwerkstoffen haben den Vorteil, dass sie vergleichsweise schnell und mit wenig Aufwand durchzuführen sind. In-vitro-Studien sind jedoch lediglich als eine Annäherung an das klinisch zu erwartende Verhalten des geprüften Materials zu verstehen, da sich die Bedingungen im Labor von den klinischen in der Mundhöhle grundlegend unterscheiden (HALLER 1994).

Für die Überprüfung der Verbundfestigkeit gibt es verschiedene Methoden wie Zug-, Scher- und Ausstoßversuche, die in vitro durchgeführt werden.

Bei Zugversuchen wird zur Krafteinleitung häufig eine Schraube oder ein Häkchen in die Probe einpolymerisiert. Diese führen zu veränderten Spannungsverteilungen und Kontraktionsbedingungen und können eine gleichmäßige Polymerisation der Probe beeinträchtigen. Ferner treten bei Krafteinleitung Spannungsmaxima im peripheren, Spannungsminima im zentralen Anteil der Verbundfläche auf, wobei sich mit abnehmender Höhe des Probenkörpers das Spannungsmaximum zum Zentrum hin

verschiebt (VAN NOORT et al. 1989). Eine exakt reproduzierbare zentrale Krafteinleitung und idealisierte Kraftwirkung ist daher bei Zugversuchen kaum zu erreichen.

Bei Scherversuchen erfolgt die Krafteinleitung mittels eines Stempels. Hierbei können unerwünschte Biegemomente innerhalb der Verbundschicht auftreten. Diese Biegemomente sind Folge von Zugspannungen auf der Seite der Krafteinleitung und Druckspannungen auf der gegenüberliegenden Seite. Sie vergrößern sich sowohl mit steigendem Abstand der Krafteinleitung von der Dentinfläche, als auch mit zunehmendem Elastizitätsmodul des Probenmaterials und können so das Versuchsergebnis negativ beeinflussen (VAN NOORT et al. 1989).

In der vorliegenden Studie wurde die Haftung des adhäsiv befestigten Stiftsystems mit einem Ausstoßversuch getestet, dessen Versuchsdesign eine im Vergleich zu konventionellen Zug- und Scherversuchen homogenere Spannungsverteilung im Bereich der Verbundfläche mit Minimierung von Biegemomenten und Kerbspannungen ermöglicht. Die Verbundfestigkeitsmessung in Wurzelkanälen mittels Ausstoßversuch wurde von PATIERNO et al. (1996) beschrieben. Dieser Versuch scheint das genaueste und sicherste Verfahren für die Verbundfestigkeitsmessungen von Faserstiften im Wurzelkanal zu sein (GORACCI et al. 2004).

Für den in dieser Studie durchgeführten Ausstoßversuch wurde durch Verwendung der gleichen Küvette für das Einbetten und die Verbundfestigkeitsmessungen eine exakte Positionierung der Probenscheiben in der Ausstoßvorrichtung gewährleistet. Es wurde ein Küvetteneinsatz mit einer jeweils 0,15 mm größeren Bohrung gegenüber dem Stift verwendet. Somit konnte sichergestellt werden, dass der ausgestoßene Stift beim Absenken die Bohrung des Küvetteneinsatzes passieren kann. Um zu gewährleisten, dass der Ausstoßstempel nur auf den Stift und nicht auf die Zahnwurzel Kraft ausübt, wurde ein Stempeldom mit einem jeweils 0,15 mm kleineren Durchmesser gegenüber dem Stift gewählt.

4.1.3. Auswahl der Stifte

Aufgrund des steigenden ästhetischen Anspruchs der Patienten kamen zahnfarbene Stiftsysteme in den letzten Jahren als Alternative zu Metallstiften zum klinischen Einsatz. Die Reduktion von Wurzelfrakturen, die hohe mechanische Belastbarkeit,

das verringerte Risiko einer Reinfektion durch die Zeit und Kosten sparende "chairside"-Behandlung sowie die ästhetischen Vorteile machen Wurzelkanalstifte aus faserverstärktem Komposit zu einer Alternative zu konventionellen metallischen Stiften. Faserverstärkter Kunststoff sowie Zirkonoxid zeichnen sich als aktuelle Materialien für zahnfarbene Stiftsysteme aus. In der vorliegenden Untersuchung wurden DT White Post und DT Light Post als Vertreter der Quarzfaserstifte sowie FRC Postec als Vertreter der Glasfaserstifte verwendet. Somit war der Vergleich zwischen den Haftfestigkeiten der quarz- und glasfaserverstärkten Kunststoffstifte möglich.

4.1.4. Auswahl der Befestigungssysteme

ROSIN et al. (2003) empfehlen auf der Basis der Ergebnisse einer Studie zum Einfluss des Zementtyps auf die Retention von Wurzelstiften die Zementierung der Stift mit Komposit. Dabei spielt jedoch die Wahl des Komposits eine entscheidende Rolle.

Die vier in dieser Studie verwendeten Befestigungssysteme können eingeteilt werden in ein chemisch härtendes Kompomer (Dyract Cem Plus), dualhärtende Befestigungskomposite (Variolink II, Panavia F 2.0) und ein selbstadhäsives Universal-Befestigungskomposit (RelyX Unicem). Variolink II wird vom Hersteller für die Befestigung von FRC Postec-Stiften empfohlen. In der hier durchgeführten Untersuchung wurde auf die Verwendung von rein lichthärtenden Befestigungssystemen verzichtet, da aufgrund der geringen effektiven Lichtintensität in den tieferen Bereichen des Wurzelkanals der Verbund zum Dentin bei dual- oder chemisch härtenden Systemen den ausschließlich lichthärtenden Befestigungs-kompositen überlegen ist (FERRARI et al. 2001). Dualhärtende Kompositzemente sind zur adhäsiven Zementierung von Wurzelstiften der letzten Generation besser geeignet (SIGNORE et al. 2003).

4.1.5. Silanisierung der Stifte

Die Verwendung eines Haftsilans zur Verbesserung des Verbundes an faserverstärkten Kompositstiften ist noch umstritten. Eine Studie von MONTICELLI et al. (2006) zeigte, dass ein optimaler chemischer Verbund zwischen

Befestigungskompositen und faserverstärkten Kompositstiften durch Verwendung eines Haftsilans nicht erhalten werden kann. Eine andere Studie hat gezeigt, dass oberflächliche befindliche Glasfasern durch die Verwendung eines Haftsilans einem adhäsiven Verbund zugänglich gemacht werden können (AKSORNMUANG et al. 2004). In der Verarbeitungsanleitung von FRC Postec wird die Silanbehandlung der Stifte empfohlen.
Um den Einfluss einer Silanbehandlung der Stifte zu untersuchen, wurde in der vorliegenden Arbeit die Hälfte der Stifte mit einem Haftsilan vorbehandelt, während die andere Hälfte ohne Silanbehandlung eingesetzt wurde.

4.2. Besprechung der Ergebnisse

4.2.1. Einfluss der Silanbehandlung

4.2.1.1 Verankerung der Stifte im Wurzelkanal

In der vorliegenden Untersuchung wirkte sich das Haftsilan auf die verschiedenen Stifte und Befestigungssysteme unterschiedlich aus. Die Silanisierung führte bei DT White Post und DT Light Post tendenziell zu einer Verbesserung der Haftung, ein Effekt, der bei FRC Postec nicht beobachtet wurde. Auch eine Studie von GORACCI et al. (2005a) zeigte, dass die Verbesserung der Haftfestigkeit durch Silanisierung der Stiftoberfläche bei DT Light Post ausgeprägter war als bei FRC Postec. Eine mögliche Erklärung für diese Unterschiede könnte sein, dass sich die Stifte in Aufbau, Oberflächenstruktur und Stiftdesign unterscheiden.
In der durchgeführten Untersuchung hatte das Haftsilan unterschiedlichen Einfluss auf die Messwerte von DT White Post und DT Light Post bei Zementierung mit den vier verschiedenen Befestigungssystemen. Die unterschiedliche Auswirkung der Silanisierung könnte durch den unterschiedlichen Verbund zwischen der Epoxydharzmatrix der Faserstifte und den Bestandteilen der vier verschiedenen Befestigungssysteme begründet sein.
Nach Herstellerangaben wurde die Silanisierung der FRC Postec empfohlen. In der vorliegenden Untersuchung hatte das Haftsilan keinen signifikanten Einfluss auf die Messwerte von FRC Postec bei Zementierung mit den vier verschiedenen Befestigungssystemen. Eine Studie von PERDIGAO et al. (2006) bestätigt, dass die

Ausstoßfestigkeit von FRC Postec durch die Verwendung eines Haftsilans nicht erhöht wurde. Dagegen wurde in der Studie von SAHAFI at el. (2003) gezeigt, dass eine Silikatisierung der Stifte in Kombination mit einer Silanisierung zur Steigerung der Haftfestigkeiten zwischen Befestigungsmaterialien und Faserstiften führte.
In der REM–Analyse hatte das Haftsilan keinen Einfluss auf die Lokalisierung der Reste der Befestigungsmaterialien. Der Verbund zwischen Befestigungsmaterial und Stift war bei allen silanisierten und nicht silanisierten Stiften schwächer als der Verbund zwischen Befestigungsmaterial und Kanalwand. Die Ergebnisse der Trennflächenanalyse bestätigen die statistische Auswertung der Messwerte bezüglich des Einflusses der Silanisierung.

4.2.1.2 Verankerung der Stifte im Aufbaukomposit

Die hier erzielten Ergebnisse bestätigen die Beobachtung anderer Autoren (GORACCI et al. 2005a, SAHAFI et al. 2004), wonach die Haftfestigkeit von DT White Post, DT Light Post und FRC Postec durch die Silanisierung verbessert wurde. Dies überrascht insofern, als es sich bei der Matrix um eine Epoxidharzmatrix handelt, die keine funktionellen Gruppen für die Reaktion mit Silanlösung hat. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass durch das Haftsilan ein Verbund zu den Glas- bzw. Quarzanteilen der Stifte erzeugt wird. Eine weitere Erklärung für die Erhöhung der Haftfestigkeit zwischen Faserstift und Aufbaukomposit durch die Silanbehandlung könnte möglicherweise die bessere Benetzung der Stiftoberfläche durch die Silanisierung sein. AKSORNMUANG et al. (2004) bestätigen, dass die Verbundfestigkeit zwischen Faserstiften und Aufbaukomposit durch die Verwendung eines Haftsilans gesteigert wurde. In der REM-Analyse der vorliegenden Studie zeigte sich, dass die Reste des Befestigungsmaterials bei fast allen der silanisierten und nicht silanisierten Proben am Aufbaukomposit haften geblieben sind, was darauf hindeutet, dass der Verbund des Befestigungsmaterials zum Aufbaukomposit unabhängig von der Silanbehandlung besser war als der zur Stiftoberfläche. Die Haftmechanismen und die Auswirkungen der Haftvermittler auf den Verbund von Kompositen zu glasfaserverstärkten Stiften sind allerdings bisher nur wenig untersucht und noch nicht exakt definiert (FERRARI & SCOTTI 2004). Es gibt daher kaum Informationen über den möglichen Einfluss der Silanisierung auf die Verbundfestigkeit zwischen Stift und Komposit.

4.2.2. Einfluss der Stifte

4.2.2.1 Verankerung der Stifte im Wurzelkanal

In der durchgeführten Untersuchung waren die Haftfestigkeiten von DT Light Post und FRC Postec im Verglich zu DT White Post signifikant höher. Untersuchungen von GRANDINI et al. (2003) zum Ermüdungswiderstand verschiedener Faserstiftarten bestätigen, dass DT Light Post und FRC Postec bessere Haftfestigkeiten lieferten als andere Faserstifte. Die höhere Haftfestigkeit von DT Light Post im Vergleich zu DT White Post könnten möglicherweise durch die Lichtleitfähigkeit der DT Light Post erklärt werden.

Die unterschiedlichen Haftfestigkeiten von FRC Postec und DT White Post könnte auf Unterschiede in der Verteilung der Fasern in der organischen Matrix, im Faserdurchmesser, in der Faserdichte, in der Konizität sowie in Aufbau und Oberflächenstruktur der Stifte zurückzuführen sein. Beiden Stifte bestehen aus Fasern und Epoxidharzmatrix. Bei FRC Postec handelt es sich um einen Glasfaserstift, während DT White Post ein Quarzfaserstift ist. Daneben könnte die unterschiedliche Elastizität der Epoxidharzmatrix der beiden Stifte ein möglicher Grund für die beobachteten Ergebnisse sein. FRC Postec ist laut Herstellerangabe ein lichtleitender Wurzelstift. Die höhere Haftfestigkeit von FRC Postec im Vergleich zu DT White Post könnten möglicherweise durch die Lichtleitfähigkeit der FRC Postec erklärt werden. Dagegen zeigte die Beobachtung von SEEFELD et al. (2006), dass die höchsten Haftfestigkeiten bei Verwendung der DT White Post in Vergleich mit acht verschiedenen Arten der Faserstifte erreicht wurden.

Die REM-Analyse der Trennflächen ergab, dass die Lokalisierung der Befestigungsmaterialien nicht von der Stiftart abhing. Reste des Befestigungsmaterials sind bei Mehrheit der Proben an der Kanalwand haften geblieben. Diese Ergebnisse scheinen zu belegen, dass der Verbund des Befestigungsmaterials zur Kanalwand unabhängig von der Stiftart besser war als der zur Stiftoberfläche. Im Gegensatz zu den in dieser Studie erhaltenen Ergebnisse war bei BOSCHIAN PEST et al. (2002) der Verbund aller untersuchten Befestigungsmaterialien zum Faserstift stärker als zum Wurzelkanaldentin. Andere Studien von FERRARI et al. (2002) und VICHI et al. (2002) zeigten einen guten Verbund zwischen der Epoxidharzmatrix der transluzenten Faserstifte und den

Befestigungsmaterialien, was sich durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie nicht bestätigen ließ.
Die dichte cross-linked Polymers von der Epoxidharzmatrix der faserverstärkten Kompositstifte könnte für den schwachen Verbund des Befestigungsmaterials zu den Faserstiften verantwortlich sein, da die Monomere der Befestigungsmaterialien in das cross-linked Polymer nicht penetriert werden können (VALLITTU et al. 1997).

4.2.2.2 Verankerung der Stifte im Aufbaukomposit

Die höchsten Werte für die Haftfestigkeit im Aufbaukomposit wurden bei der Verwendung von FRC Postec gemessen. In einer Studie von ROSENTRITT et al. (2000) wies unter acht untersuchten Faserstiften DT Light Post den höchsten Faseranteil (32 Fasern/mm) auf. Dieser beträgt bei FRC Postec 25 Fasern/mm. Der bessere Verbund des Aufbaukomposits zu FRC Postec könnte darin begründet sein, dass FRC Postec einen geringeren Faseranteil im Stift besitzt als DT Light Post. Hierdurch besteht eine größere Matrixoberfläche, die mit dem Bestandteil vom Komposit (Bis-GMA) einen chemischen Verbund eingehen kann (FERRARI & SCOTTI 2004). In einer aktuellen Studie von MANNOCCI et al. (2005) konnte erstmals die Penetration von Monomeren aus Adhäsivsystemen in die Matrix von Glasfaserstiften nachgewiesen werden. Der Unterschied in Durchmesser und Oberflächenstruktur der verwendenden Stifte könnte möglicherweise eine weitere Rolle für die erhaltenen Ergebnisse spielen.
Die Herstellungsmethode der drei Stifte könnte ebenfalls von Bedeutung sein. Die Trennflächenanalyse der Aufbaukompositproben ergab, dass die Lokalisierung der Befestigungsmaterialien nicht von der Stiftart abhing. Reste des Befestigungsmaterials sind bei fast allen Proben am Aufbaukomposit haften geblieben, was darauf hindeutet, dass der Verbund des Befestigungsmaterials zum Aufbaukomposit unabhängig von der Stiftart besser war als der zur Stiftoberfläche. Eine Erklärung für die gute Verbindung der Befestigungsmaterialien mit dem Aufbaukomposit könnte in der ähnlichen chemischen Zusammensetzung der beiden Komposite liegen.

4.2.3. Einfluss der Befestigungssysteme

4.2.3.1 Verankerung der Stifte im Wurzelkanal

Die in dieser Studie gefundenen Haftwerte erscheinen bei Verwendung dualhärtender Befestigungskomposite höher zu sein als bei Verwendung rein chemisch härtender Kompomere. Die höchsten Werte für die Haftfestigkeit im Rahmen dieser Untersuchungen wurden für Variolink II gemessen. Variolink II ist ein dualhärtendes Komposit; vor der Applikation dieses Materials wird die Dentinoberflächen mit 37% Phosphorsäure geätzt. Die Konditionierung mit Phosphorsäure bewirkt eine vollständige Entfernung der Schmierschicht. Die von Etch- und Rinse- Bondingsystemen bekannte Hybridschichtbildung im Dentin könnte ebenso eine Erklärung für die hohen Verbundwerte darstellen, wie die Copolymerisation der Methacrylgruppen, die sowohl im Befestigungskomposit (Variolink II) als auch im Adhäsiv (Excite DSC) enthalten sind. Die Ausstoßfestigkeiten in einer Studie von GORACCI et al. (2005b) waren bei Verwendung von Variolink II höher als bei Verwendung von Panavia 21 und RelyX Unicem. Diese Ergebnisse entsprechen den Ergebnissen der hier durchgeführten Untersuchung. Große Unterschiede der Abzugskräfte bei der Verwendung verschiedener Befestigungssysteme wurden auch in anderen Untersuchungen festgestellt (QUALTROUGH et al 2003, SCHÖNBRODT et al. 2003).

Das selbstadhäsive, dualhärtende Befestigungskomposit RelyX Unicem zeigte in der vorliegenden Studie Haftwerte, die im Mittelfeld der ermittelten Mittelwerte liegen. Bei Verwendung von RelyX Unicem sind Konditionierung und Bonding der Zahnhartsubstanz nicht erforderlich (3M ESPE 2002). Das Material erhält laut Herstellerangaben ein neuartiges Monomersystem, welches auch mehrfunktionelle Phosphorsäure-Methacrylate beinhaltet. Die daraus resultierende selbst-konditionierende Wirkung ist ein möglicher Grund für die zufrieden stellenden Haftwerte von RelyX Unicem.

Die Verbundfestigkeiten von Panavia F 2.0 waren im Vergleich zu Variolink II und RelyX Unicem niedrig. Bei Panavia F 2.0 handelt es sich um ein dualhärtendes Befestigungskomposite, welches einen selbstkonditionierende Primer enthält (ED Primer II). Der säurehaltige Primer, der für die Konditionierung der Dentinwand verantwortlich ist, scheint aufgrund der dicken Schmierschicht, wie sie bei der Präparation des Stiftbettes im Wurzelkanal erzeugt wird, wenig effektiv zu sein

(GORACCI et al. 2005b). Hierin könnte eine mögliche Ursache für die niedrigen Werte von Panavia F 2.0 liegen. Im Gegensatz zu den in dieser Studie erhaltenen Ergebnisse waren bei WRBAS et al. (2006) die Haftwerte von RelyX Unicem niedriger als die von Panavia F 2.0.

Die geringsten Haftfestigkeitswerte wurden in der vorliegenden Studie mit dem Kompomer Dyract Cem Plus gemessen. Dabei handelt es sich um ein rein chemisch härtendes Material. Die bei Autopolymerisaten bekannt niedrige Konversionsrate könnte eine Erklärung für die niedrigen Haftfestigkeitswerte darstellen.

In der REM-Analyse der Trennflächen zeigte sich, dass die Anhaftung der Reste des Befestigungsmaterials ausschließlich von der Art des Befestigungsmaterials abhängig war. Bei der Zementierung mit Variolink II und Dyract Cem Plus befanden sich die Zementreste im Wesentlichen an der Kanalwand. Dies deutet darauf hin, dass der Verbund der beiden Zemente zum Stift schlechter war als der zur Kanalwand.

Eine Erklärung für den besseren Verbund von Excite DSC/Variolink II zur Kanalwand könnte in der Konditionierung des Wurzelkanaldentins mit 37% Phosphorsäure und in der Bildung der Hybridschicht begründet liegen. Der gute Verbund von Dyract Cem Plus zum Dentin lässt sich mit der Verwendung von Prime&Bond NT als Haftvermittler erklären. In der Studie von WRBAS et al. (2006) führt die Oberflächenbehandlung der Stifte mit Prime&Bond NT zu einer Steigerung der Verbundfestigkeit zwischen Befestigungsadhäsiv und Wurzelkanalstift, was sich durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie nicht bestätigen ließ. Bei Zementierung mit Panavia F 2.0 war dessen Haftung am Stift stärker als die an der Kanalwand. Panavia F 2.0 weist eine Haftungsfähigkeit zu Faserstiften auf, da es aus ein adhäsives Monomer (MDP) enthält (SAHMALI et al. 2004, SAHAFI et al. 2004). Bei Zementierung mit RelyX Unicem scheint die Zementhaftung an der Kanalwand ähnlich gut zu sein wie der Haftverbund am Stift. Darauf deutet hin, dass die Reste des Befestigungssystems in etwa gleichem Maße sowohl in den Innenflächen der Kanälen als auch auf Stiftoberflächen zu erkennen waren.

4.2.3.2 Verankerung der Stifte im Aufbaukomposit

Die Haftfestigkeiten im Aufbaukomposit waren bei Verwendung von RelyX Unicem am höchsten. Eine mögliche Erklärung für die höheren Ergebnisse könnte die Zusammensetzung der beiden Aufbaukomposite und Befestigungskomposite sein.
Die bei der Verwendung des rein chemisch härtenden Kompomers erreichten Haftfestigkeiten waren im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien relativ hoch. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei selbstpolymerisierenden Kompositen die Polymerisationsschrumpfung im Vergleich zu licht- oder dualhärtenden Kompositen höher ist (CHUNG & GREENER 1990, VERSLUID et al. 1996, ASMUSSEN & PEUTZFELD 2003). Das daraus resultierende Aufschrumpfen von Dyract Cem Plus ist möglicherweise für die hohen Verbundkräfte im Vergleich zu den anderen Materialien verantwortlich.
Bei Verwendung von Panavia F 2.0 waren die Haftfestigkeiten niedrig im Vergleich mit Dyract Cem und RelyX Unicem. Die niedrigsten Haftwerte wurden bei Verwendung von Variolink II gezeigt, die Ursache dafür könnte in den im Variolink II enthaltenen Monomeren liegen. Als weitere Ursachen für die unterschiedliche Belastbarkeit der Materialkombinationen sind chemische, biologische und physikalische Faktoren denkbar, die jedoch mit den hier durchgeführten Versuchen nicht identifiziert werden konnten.
In der REM-Untersuchung der Trennflächen zeigte sich, dass die Anhaftung der Befestigungsmaterialien zum Aufbaukomposit von der Art des Befestigungsmaterials unabhängig ist. Die Reste der vier verschiedenen, zur Zementierung verwendeten Befestigungsmaterialien sind am Aufbaukomposit haften geblieben, was darauf hindeutet, dass der Verbund des Befestigungsmaterials zum Aufbaukomposit unabhängig von dessen Art besser war als der zur Stiftoberfläche.

4.3. Schlussfolgerungen

Bei Betrachtung der Ergebnisse im Wurzelkanal sowie im Aufbaukomposit scheinen die Haftfestigkeiten sowohl von der Stiftart als auch von den Befestigungsmaterialien beeinflusst zu sein. Das Haftsilan wirkt sich auf die verschiedenen Stifte und Befestigungsmaterialien im Wurzelkanal unterschiedlich aus, während er im Aufbaukomposit nur einen schwachen Einfluss hat. Bei der Verwendung von

Befestigungssystemen im Wurzelkanal scheinen dualhärtende Systeme den rein chemisch härtenden Systemen überlegen zu sein und daher für alle untersuchten Stifte zu empfehlen. Die höchsten Haftfestigkeiten wurden bei Befestigung der FRC Postec mit Variolink II erzielt. Sowohl die Befestigungsmaterialien als auch die Stifte führten bei der Kombination mit dem Aufbaukomposit zu vergleichbar hohen Haftfestigkeiten.

Die Applikation der Mischung Prime&Bond NT + DC Activator führte auf allen untersuchten Stiften nicht zur Verbesserung des Verbundes von Dyract Cem Plus zu den Stiften. Die Erwartung, dass die Silanisierung der Stiftoberfläche zu einer wesentlichen Verbesserung des Verbundes von Befestigungsmaterialien zu den Stiften führt, bestätigte sich nicht. Der Verbund von Befestigungsmaterialien zum Dentin bzw. zum Stift hängt demzufolge nicht von der Silanbehandlung oder von der Stiftart ab, sondern ist nur von Befestigungssystemen ab.

Um den Verbund zwischen den Befestigungsmaterialien und den Faserstiften zu verbessern sowie die Haftfestigkeit und die Stabilität von Haftsilan zu erhöhen, sollen weitere Studien zur Bewertung der möglichen Kombination der Silanlösung mit einem Adhäsiv durchgeführt werden.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse können jedoch noch keine Aussagen bezüglich der Haltbarkeit in der klinischen Situation gemacht werden. Um solche Aussagen machen zu können, müssen weitere Untersuchungen mit komplexen Belastungssimulationen und Langzeituntersuchungen durchgeführt werden.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden In-vitro-Studie wurde mit Hilfe des Ausstoßversuchs die Haftfestigkeit von drei faserverstärkten Kunststoffstiften (Double Taper (DT) White Post, VDW; Double Taper (DT) Light Post, VDW; Fibre reinforced Composite (FRC) Postec, Ivoclar Vivadent) in den Wurzelkanälen von extrahierten Zähnen sowie im Aufbaukomposit bei Verwendung von vier verschiedenen Befestigungssystemen (Dyract Cem Plus, Variolink II, Panavia F 2.0, RelyX Unicem) bestimmt. Zur Vorbehandlung der Stifte wurde bei einem Teil der Proben ein Haftsilan (Monobond S, Ivocar Vivadent) verwendet. Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss der Stiftart, der verschiedenen Befestigungssysteme sowie der Silanbehandlung der Stifte herauszufinden.

Für die durchgeführte Untersuchung wurden 120 extrahierte menschliche Zähne verwendet und je nach Befestigungsmaterialien für die Aufnahme der faserverstärkten Kunststoffstifte vorbehandelt. Jede Stiftart wurde mit vier verschiedenen Befestigungsmaterialien befestigt. Die Hälfte dieser Stifte wurde mit Haftsilan vorbehandelt, die andere Hälfte wurde nicht silanisiert. An dem koronalen Abschnitt der Stifte wurde Aufbaukomposit aufgebaut. Nach Einbettung der Zähne und 24-stündiger Wasserlagerung bei 37 ℃ wurden au s diesem Kunststoffblock zwei Scheiben von 2 mm Dicke senkrecht zur Wurzelkanalachse, eine vom Zahn und die andere vom Aufbaukomposit, herausgesägt. Anschließend wurden 240 Proben geprüft. Im Ausstoßversuch wurden die Haftfestigkeiten gemessen, danach statistisch ausgewertet.

Die dreifaktorielle Varianzanalyse ergab, dass sich sowohl die Art des Stiftes als auch die adhäsiven Befestigungssysteme signifikant auf die Haftfestigkeit im Wurzelkanal auswirkten (jeweils $p<0,0001$). Im Gegensatz dazu hatte die Behandlung der Stifte mit Haftsilan keinen Einfluss auf die Messwerte ($p=0,497$). Es wurden keine signifikanten zweifachen Wechselwirkungen nachgewiesen. Signifikante dreifache Wechselwirkungen wurden nachgewiesen ($p=0,007$).

In Abhängigkeit von dreifachen Wechselwirkungen wirkte sich das Haftsilan auf die verschiedenen Stifte und Befestigungssysteme unterschiedlich aus. Die erreichten Mittelwerte bei Verwendung von DT Light Post und FRC Postec (24,85- 24,60 MPa) waren höher als bei Verwendung von DT White Post (18,95 MPa). Bezüglich des Einflusses der Befestigungssysteme wurden bei Zementierung der Stifte mit

Variolink II die höchste Mittelwerte erzielt (27,44 MPa), die niedrigsten Mittelwerte wurden bei Zementierung mit Dyract Cem Plus ermittelt (19,29 MPa), während die Mittelwerte von RelyX Unicem (23,70 MPa) und Panavia F 2.0 (20,78 MPa) im mittleren Bereich lagen.

Die dreifaktorielle Varianzanalyse im Aufbaukomposit ergab, dass sich sowohl die Art des Stiftes als auch die adhäsiven Befestigungssysteme signifikant auf die Haftfestigkeit auswirkten (jeweils p=0,004), während die Behandlung der Stifte mit Haftsilan nur einen schwachen Einfluss auf die Messwerte hatte (p=0,039). Signifikante zweifache oder dreifache Wechselwirkungen zwischen den drei Faktoren (Stift, Befestigungssystem und Haftsilan) wurden nicht nachgewiesen.

Die höchsten Haftfestigkeiten im Aufbaukomposit wurden bei Verwendung von FRC Postec erzielt (26,89 MPa). Kein signifikanter Unterschied wurde zwischen DT Light Post und DT White Post gezeigt. Die Zementierung mit RelyX Unicem und Dyract Cem plus führte zu einem signifikant größeren Mittelwert (26,55 – 26,04 MPa) im Vergleich mit den anderen Befestigungssystemen.

Die Scheiben wurden auseinender getrennt und die Stiftoberflächen sowie die Kanalinnenwände im Rasterelektronenmikroskop bei 90facher Vergrößerung untersucht. Geprüft wurde, wo die Reste des Befestigungsmaterials haften geblieben sind. Die REM-Untersuchung im Wurzelkanal ergab, dass die Haftung des Befestigungsmateriales weder von Haftsilan noch von der Art der Stifte abhängt, sondern nur von der Art der Befestigungssysteme abhängig ist. Mit Dyract Cem und Variolink II war der Verbund zum Dentin stärker als zum Stift, im Gegensatz zu Panavia F 2.0. Mit RelyX Unicem war der Verbund zum Stift und zur Kanalwand fast gleich.

Bei keiner Prüfprobe im Aufbaukomposit blieb das Befestigungsmaterial ausschließlich am Stift haften.

Zur Verbesserung des Verbundes der Befestigungsmaterialien zu den Faserstiften sollten weitere Studien zur Bewertung der möglichen Kombination der Silanlösung mit einem Adhäsiv durchgeführt werden.

Klinische Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit die in vitro erzielten Verbünde den Belastungen in der Mundhöhle standhalten können.

6. Literaturverzeichnis

1. Aksornmuang J., Foxton R.M., Nakajima M., Tagami J.: Microtensile bond strength of a dual-cure resin core material to glass and quartz fiber post. J Dent 32: 443-450 (2004).
2. Albers H.F.: Core-build-ups and posts. Adept Report 4: 25-35 (1994).
3. Antoniadou M., Kern M., Strub J.P.: Effect of a new metal primer on the bond strength between a resin cement and two high-noble alloys. J Prostheth Dent 84: 554-560 (2000).
4. Asmussen E., Peutzfeldt A.: Polymer structure of a light-cured resin composite in relation to distance from the surface. Eur J Oral Sci 111: 277-279 (2003).
5. Assif D., Gorfil C.: Biomehanical considerations in restoring endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 71: 565-567 (1994).
6. Assif D., Oren E., Marshak B.L., Aviv I.:Photoelastic analysis of stress transfer by endodontically treated teeth to the supporting structure using different restorative techniques. J Prosthet Dent 61: 535-543 (1989).
7. Attin T., Helwig, E., Hilgers R.D.: Der Einfluss verstärkender Wurzelstifte auf die Frakturanfälligkeit endodontisch versorgter Zähne. Dtsch Zahnärztl Z 49: 586-591 (1994).
8. Bachicha W., DiFiore P., Miller D., Lautenschlager E., Pashley D.: Microleakage of endodontically treated teeth restored with posts. J Endod 24: 703-708 (1998).
9. Baraban D.J.: The Restauration of endodontically treated teeth. An update, J Prosthet Dent 59: 553-558 (1988).
10. Bateman G., Ricketts D.N., Saunders W.P.: Fibre-based post systems: a review. Br Dent J 195: 43-48 (2003).
11. Blatz M., Sadan A., Kern M.: Resin-ceramic bonding: A review of the literature. J Prosthet Dent 89: 268-274 (2003).

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

13. Caputo A., Standlee J.: Biomechanics in clinical dentistry. Quintessence Publishing Co., London. 21-31 (1987).

14. De Wald J.P., Mody C.R., Ferracane JL., Cotmrore J.M.: Crown retention: a comparison study of core type and luting agent. Dent Mater 3: 71-73 (1987).

15. Derand T.: Stress analysis of cemented or resin bonded loaded porcelain inlays. Dent Mater 7: 21-24 (1991).

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

17. Duncan J., Pameijer C.: Retention of parallel-sided titanium posts cemented with six luting agents: an in vitro study. J Prosthet Dent 80: 423-428 (1998).

18. Edelhoff D., Spiekermann H., Yildirim M.: Klinische Erfahrungen mit konfektionierten Wurzelstiften und individuellen Stumpfaufbauten aus Keramik. Dtsch Zahnärztl Z 55: 746-750 (2000).

19. Feher A., Edder B., Lüthy H., Schumacher M., Loeffel O., Schärer P.: ISO-Zementevaluation und klinische Untersuchungen von Zirkonoxid-stiftaufbauten. Acta Med Dent Helv 4: 201-209 (1999).

20. Fernandes A. S., Dessai G.S. Factors affecting the fracture resistance of post-core reconstructed teeth: a review.Int J Prosthodont 14: 355-363 (2001).

21. Ferrari M., Mannocci F., Vichi A., Cagidiaco M., Mjör I.: Bonding to root canal: Structural characteristics of the substrate. Am J Dent 13: 255-260 (2000a).

22. Ferrari M., Scotti R.: Fiber post–Characteristics and clinical applications. Masson, Milano. 15-51 (2004).

23. Ferrari M., Vichi A., Grandini S., Ceppi S.: Influence of microbrush on efficacy of bonding into root canals. Am J Dent 15: 227-231 (2002).

24. Ferrari M., Vichi A., Grandini S., Goracci C.: Efficacy of a self-curing adhesive-resin cement system on luting glass-fiber posts into root canals: an SEM investigation. Int J Prosthodont 14: 543-549 (2001).

25. Ferrari M., Vichi A., Mannocci F., Mason P.N.: Retrospective study of the clinical performance of fiber posts. Am J Dent 13 (Spec No): 9B-13B (2000b).

26. Frenzel E., Kern M.: Klebeverbund von dual- und autopolyraerisieren-den, phosphatmonomerhaltigen Kompositklebern zu hochgoldhaltigen Legierungen. 49 Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkiude. Berlin. 35-36 (2000).

27. Goracci C., Raffaelli O., Monticelli F., Balleri B., Bertelli E., Ferrari M.: The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization. Dent Mater 21: 437-444 (2005a).

28. Goracci C., Sadek F.T., Fabianelli A., Tay F.R., Ferrari M.: Evaluation of the adhesion of fiber posts to intraradicular Dentin. Oper Dent 30-5: 627-635 (2005b).

29. Goracci C., Tavares A.U., Fabianelli A., Monticelli F., Raffaelli O., Cardoso P.C., Tay F.R., Ferrari M.: The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. Eur J Oral Sci 112: 353-361 (2004).

30. Grandini S., Goracci C., Monticelli F., Tay F.R., Ferrari M.: Fatigue resistance of different Kinds of fiber posts. J Dent Res 82: 322-327 (2003).

31. Hallensleben D.: Untersuchung über die Stabilität stiftverankerter Aufbauten-(Eine in-vitro-Untersuchung). Med Diss, Berlin (1999).

32. Haller B.: Aktueller Stand der Komposit-Dentinhaftung. Zahnärztl Mitt 18: 86-97 (1992).

33. Haller B.: Mechanismus und Wirksamkeit von Dentinhaftvermittlern. Dtsch Zahnärztl Z 49: 750-759 (1994).

34. Haller B., Blunck U.: Übersicht und Wertung der aktuellen Bondingsysteme. Zahnärztl Mitt 93: 808-818 (2003).

35. Haller B., Fritzenschaft, A.: Dentinhaftung von Ein- und Mehrkom ponenten-Haftvermittlern bei Dry und Moist Bonding in vitro. Dtsch Zahärztl Z 54: 225-230 (1999).

36. Haller B., Hofmann N., Klaiber B., Bloching U.: Effect of storage media on microleakage of five dentin bonding agents. Dent Mater 9: 191-197 (1993).

37. Huysmans M C., Van der Varst P C.: Finite element analysis of quasistatic and fatigue failure of post and cores. J Dent 21: 57-64 (1993).

38. Kantor M.E., Pines M.S.: A comparative study of restorative techniques for pulpless teeth. J Prosthet Dent 38: 405-412 (1977).

39. Kern M., Simon M.P., Strub J.R.: Erste klinische Erfahrungen mit Wurzelstiften aus Zirkonoxidkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 53: 266-268 (1998).

40. Kern M., Thompson V.P.: Durability of resin bonds to pure titanium. J Prosthodont 4: 16-22 (1995).

41. Kessler J.: Vergleichende und experimentelle Untersuchung Über die Belastbarkeit zweier intraradikulär unterschiedlich verankerter Stumpfaufbauten. Med Diss, Homburg / Saar (1982).

42. Koutayas S.O., Kern M.: All-ceramic post and cores. State of the art. Quintessence Int 30: 383-392 (1999).

43. Kovarik R.E., Breeding C., Caughman F.: Fatigue life of three core materials under simulated chewing conditions. J Prosthet Dent 68: 584-590 (1992).

44. Kugel G., Ferrari M.: The science of Bonding from first to sixth generation. J Am Dent Assoc 131(supplement): 20-25 (2000).

45. Kurer H., Combe E., Grant A.: Factors influencing the retention of dowels. J Prosthet Dent 38: 515-525 (1977).

46. Lauer H., Ottl P., Haibach O.: Die prothetische Versorgung des avitalen Zahnes. Zahnarzt Mag 11: 15-19 (1996).

47. Lehmann K., Hellwig E.: Einführung in die restaurative Zahnheilkunde, 7. Auflage Urban und Schwarzenberg München, Berlin, Wien. 41-51 (1993).

48. Linde L.A.: The use of composite resins in combination with anchorange posts as core materials in endodontically teated teeth: clinical aspects of the technique. Quintess Int 24: 115-122 (1993).

49. Lovedahl P.E., Nicholls J.I.: Pin-retained amalgam cores vs. cast-gold dowel-cores. J Prosthet Dent 38: 507-514 (1977).

50. Lutz F., Kreici I., Schüpbach P.: Adhäsivsysteme für Zahnfarbene Restaurationen. Schweiz Monatsschr Zahnmed 103: 537-649 (1993).

51. Malferrari S., Monaco C., Scotti R.: Clinical evaluation of teeth restored with quartz fiber-reinforced epoxy resin posts. Int J Prosthodont 16: 39-44 (2003).

52. Mannocci F., Ferrari M., Watson T.F.: Intermittent loading of teeth restored using quartz fiber, carbon-quartz fiber, and zirconium dioxide ceramic root canal posts. J Adhes Dent 1: 153-158 (1999).

53. Mannocci F., Sherriff M., Watson T.F., Vallittu P.K.: Penetration of bonding resins into fibre- reinforced composite posts: a confocal microsopic study. Int Endod J 38: 46-51 (2005).

54. Martelli R.: Ästhetische Restauration von Frontzähnen mit Wurzelstiften der vierten Generation. Zahn Prax 5: 336-341 (2002).

55. Millstein P.L., Ho J., Nathanson D.: Retention between a serrated steel dowel and different core materials. J Prosthet Dent 65: 480-482 (1991).

56. Monticelli F., Goracci C., Ferrari M.: Micromorphology of the fiber post – resin core unit: a scanning electron microscopy evaluation. Dent Mater 20: 176-183 (2004).

57. Monticelli F., Toledano M., Tay F.R., Sadek F.T., Goracci C., Ferrari M.: A simple etching technique for improving the retention of fiber posts to resin composites. J Endod 32: 44-47 (2006).

58. Naumann M.: Kleben im Wurzelkanal- neue therapeutische Chancen, Zahnärztl Prax 53: 184-188 (2002).

59. Nergiz I., Schmage P.: Wurzelkanal im Wandel der Zeit. Endodontic Journal 1: 10-17 (2004).

60. Nergiz I., Schmage P., Platzer U.: Abzugskraftmessungen bei Wurzelstiften mit verschiedenen Oberflächen. Dtsch Zahnärztl Z 48: 661-664 (1993).

61. Nergiz I., Schmage P., Platzer U., McMullan-Vogel C.: Effect of different surface textures on retentive Strength of tapered posts. J Prosthet Dent 78: 451-457 (1997).

62. Nergiz I., Sohn J., Schmage P., Platzer U.: Retentive strengths of metal posts using chemical surface treatment. J Dent Res 80-A: 690-696 (2001).

63. Olivia R.A., Lowe J.A.: Dimensional stability of silver amalgam and composite used as core materials. J Prosthet Dent 57: 554-559 (1987).

64. Pao Y., Reinhardt R.: Root stresses with tapered– end post design in periodontally compromised teeth. J Prosthet Dent 57: 281-286 (1987).

65. Patierno J.M., Rueggeberg F.A., Anderson RW, Weller RN, Pashley DH: Push-out strength and SEM evaluation of resin composite bonded to internal cervical dentin. Endod Dent Traumatol 12: 227-236 (1996).

66. Patyk A.J., Friedrich M., Attin T.: Untersuchungen des Lichttransfers von Glassfaserstiften und der daraus resultierenden polymerisation des Befestigungskomposits. Dtsch Zahnärztl Z 60: 253-257 (2005).

67. Perdigao J., Gomes G., Lee I.K.: The effect of silane on the bond strength of fiber posts. Dent Mater 22: 752-758 (2006).

68. Qualtrough A., Chandler N.P., Purton D.G.: A comparison of the retention of tooth-colored posts. Quintessence Int 34: 199-201 (2003).

69. Randow K., Glantz P.O.: On cantilever-loading of vital and non-vital teeth. Acta Odontal Scand 44: 271-277 (1986).

70. Reidlind W., Kappert H.F.: Veränderung einer Gingivaverfärbug nach Austausch eines Wurzelstiftes und Versorgung mittels Glaskeramik – Ein Fallbericht. Quintessenz 39: 1919-1925 (1988).

71. Rosensteil S., Land M., Crispin B.: Dental luting agents: A review of the current literature. J Prosthet Dent 80: 280-301 (1998).

72. Rosentritt M., Fürer C., Behr M., Lang R., Handel G.: Comparison of in vitro fracture strength of metallic and tooth-coloured posts and cores. J Oral Rehabil 27: 595-601 (2000).

73. Rosin M., Fleissner P., Welk A., Steffen H., Heine B.: The influence of surface configuration on the retention of posts designed for use with a caston technique. Quintessence Int 32: 119-130 (2001).

74. Rosin M., Wilkens M., Splieth C.: Einfluss des Zementtyps auf die Retention von Wurzelstiften. Quintessenz 54: 975-981 (2003).

75. Roulet J., Degrange M.: Adhension. The silent revolution in dentistry. Quintessence Publishing Co., London.120-127 (2000).

76. Ruemping D., Lund M., Schnell R.: Retention of dowels subjected to tensile and torsional forces. J Prosthet Dent 41: 159-162 (1979).

77. Sahafi A., Peutzfeldt A., Asmussen E., Gotfredsen K.: Bond strength of resin cement to dentin and to surface-treated posts of titanium alloy, glass fiber and zircoina. J Adhes Dent 5: 153-162 (2003).

78. Sahafi A., Peutzfeldt A., Asmussen E., Gotfredsen K.: Effect of surface treatment of prefabricated posts on bonding of resin cement. Oper Dent 29: 60-68 (2004).

79. Sahmali S., Demirel F., Saygili G.: Comparison of in vitro tensile bond strengths of luting cements to metallic and tooth-colored posts. Int J Periodontics Restorative Dent 24: 256-263 (2004).

80. Schaller H.G., Kielbassa A.M., Hahn P., Attin T., Hellwig E.: Die Haftung von Dentinhaftvermittlern an kariös verändertem Dentin. Dtsch Zahnärztl Z 53: 69-72 (1998).

81. Schmeissner H.: Indikation und Konstruktion von stiftverankertem Zahnersatz. Zahnärztl Mitt 73: 1339-1342 (1983).

82. Schmeissner H.: Nachuntersuchungen und experimentelle Untersuchungen von Stiftkronen mit und ohne zirkuläre Stumpfumfassung. Dtsch Zahnärztl Z 27: 535-539 (1972).

83. Schmeissner H.: Zur Belastbarkeit gegossener Stiftaufbauten in Abhängigkeit unterschiedlicher Präparationsgestaltung. Dtsch Zahnärztl Z 34: 744 (1979).

84. Schönbrodt M., Schmage P., Nergiz I., Platzer U.: Haftfestigkeit zahnfarbener Wurzelstifte in Abhängigkeit von der Oberflächen-behandlung und dem Befestigungskomposit. Dtsch Zahnärztl Z 58: 55-59 (2003).

85. Schwartz R.S., Robbins J.W.: Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review. J Endod 30: 289-301 (2004).

86. Seefeld F., Wenz HJ., Ludwig K., Kern M.: Resistance to fracture and structural characteristics of different fiber reinforced post systems. Dent Mater 23: 265-271 (2007).

87. Signore A., Benedicenti S., Barone M., Kaitsas V.: Chemische und biomechanische Eigenschaften konfektionierter faserverstärkter Kunststoffwurzelstifte. Zahn Prax 4: 344-351 (2001).

88. Signore A., Kaltsas V., Barone M., Benedieenti S., Frazzingaro G.: Adhäsive Zementierung faserverstärkter Wurzelstifte. Interdiszipl J Proth Zahnheilkd 6: 256-269 (2003).

89. Simon M.: Präprothetische Rekonstruktionen mit Zirkondioxid-Wurzelstiften. Phillip J. 14: 95-100 (1997).

90. Soltesz U., Leupolz M.: Härte- und Festigkeitsverhalten von Glasionomerzementen. Dtsch Zahnärztl Z 48: 237-241 (1993).

91. Sorensen J., Martinoff J.: Clinically significant factors in dowel design. J Prosthet Dent 52: 28-35 (1984).

92. Standlee J., Capato A., Hanson E.: Retention of endodontic dowels: Effects of cement, dowel length, diameter, and design. J Prosthet Dent 39: 400-405 (1978).

93. Standlee J., Caputo A., Collard E., Pollack M.: The rententive and stress distributing properties of split threaded endodonti dowels. J Prosthet Dent 68: 436-442 (1992).

94. Stockton L.W.: Factors affecting retention of post systems. aliterature review. J Prosthet Dent 81: 380 -385 (1999).

95. Strub J.R., Kern M., Trüp J.C., Witkowski S., Hürzeler M.B.: Curriculum Prothetik I. Quintessenz Verlag, Berlin. 70-77 (1994).

96. Taira Y., Yanagida H., Matsumura H., Yoshida K., Atsuta M., Suzuki S.: Adhesive binding of titanium with a thione-phosphate dual functional primer and self-curing luting agents. Eur J Oral Sci 108: 456-460 (2000).

97. Taleghani M., Leinfelder K.F.: Evaluation of a new glass ionomer cement with silver as a core builtup under a cast Restoration. Quintess Int 19: 19-24 (1988).

98. Tinner D., Marinello C., Kerschbaum T.: The preprosthetic preparation of the endodontically treated abutment tooth. Post and core technique: a questionnaire analysis. Schweiz Monatsschr Zahnmed 111: 402-409 (2001).

99. Torbjoner A., Karlsson S., Syvanld M., Hensten-Pettersen A.: Carbon fiber reinforced root canal posts. Mechanical and cytotoxic properties. Eur J Oral Sci 104: 605-611 (1996).

100. Trabet K., Caputo A., Aben Rass M.: Tooth fracture-A comparison of endodontic and restorative treatments. J Endod 4: 341-345 (1978).

101. Vallittu P.K., Ruyter I.E., Nat R.: The swelling phenomenon of acrylic resin polymer teeth at the interface with denture base polymers. J Prosthet Dent 78: 194-199 (1997).

102. Van Meerbeck B., Inokoshi S., Braem M., Lambrechts P., Vanherle G.: Morphological aspects of the resin-dentin interdiffusion zone with different adhesive systems. J Dent Res 71: 1530-1540 (1992).

103. Van Noort R., Noroozi S., Howard I.C., Cardew G.: A critique of bond strength measurements. J Dent 17: 61-67 (1989).

104. Vichi A., Grandini S., Ferrari M.: Comparison between two clinical procedures for bonding fiber posts into a root canal: a microscopic investigation. J Endod 28: 355-360 (2002).

105. Wagner S.M., Kern M.: Long-term resin bond strength to zirconia ceramic. J Adhes Dent: 2: 139-145 (2000).

106. Wintermantel E, Suk-WooHa: Biokompatible Werkstoffe und Bauweisen Springer Verlag, Berlin (1996).

107. Wirz J.: Endodontische und parapulpäre Verankerungselemente für die restaurative Therapie. Dtsch Zahnärztekal 42: 52-66 (1983).

108. Wirz J., Christ R. Korrosionserscheinungen an Schrauben und Stiften bei Zahnaufbauten – eine In–vitro-Studie. Schweiz Monatsschr Zahnmed 5: 408-428 (1982).

109. Wirz J., Graber G., Widmer W.: Metallische Verankerungselemente in der restaurativen Zahnmedizin. Quintessenz, Berlin. 243-245 (1987).

110. Wirz J., Johner M., Pohler O.: Korrosionverhalten verschiedener Schrauben und Stifte im Wurzelkanal. Schweiz Monatsschr Zahnmed 90: 217-241 (1980).

111. Wrbas K.T., Kampe M.T., Schirrmeister J.F., Altenburger M.J., Hellwig E.: Retention glasfaserverstärkter Wurzelkanalstifte in Abhängigkeit vom Befestigungskomposit. Schweiz Monatsschr Zahnmed 116: 18-24 (2006).

7. Anhang

Tabelle 19. Ausstoßfestigkeitswerte der einzelnen Testproben bei Befestigung von DT White Post mit vier verschiedenen Arten der Befestigungsmaterialien

DT White Post	Befestigungsmaterialien	n	Haftsilan	Kompositaufbau (MPa)	Wurzelkanal (MPa)
	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	1	+	29,09	28,97
		2	+	30,78	24,97
		3	+	15,65	11,58
		4	+	29,75	22,68
		5	+	27,21	2,54
		6	-	25,44	15,43
		7	-	35,69	2,69
		8	-	23,20	16,93
		9	-	24,83	9,85
		10	-	21,41	7,90
	Variolink II/Excite DSC	1	+	35,96	29,71
		2	+	16,87	19,69
		3	+	35,54	20,04
		4	+	19,48	21,44
		5	+	14,77	24,62
		6	-	20,60	25,48
		7	-	9,59	21,25
		8	-	18,96	26,89
		9	-	19,36	16,05
		10	-	18,47	25,42
	Panavia F 2.0	1	+	19,95	5,86
		2	+	32,46	18,93
		3	+	17,08	16,77
		4	+	15,55	16,67
		5	+	13,12	14,59
		6	-	26,00	29,70
		7	-	22,02	19,10
		8	-	10,38	10,13
		9	-	20,61	21,26
		10	-	18,32	20,36
	RelyX Unicem	1	+	25,84	17,61
		2	+	32,68	26,33
		3	+	32,53	22,45
		4	+	33,55	20,54
		5	+	21,92	29,50
		6	-	24,12	21,81
		7	-	17,27	20,89
		8	-	20,44	12,57
		9	-	36,12	16,34
		10	-	25,75	22,37

Tabelle 20. Ausstoßfestigkeitswerte der einzelnen Testproben bei Befestigung von DT Light Post mit vier verschiedenen Arten der Befestigungsmaterialien

DT Light Post	Befestigungsmaterialien	n	Haftsilan	Kompositaufbau (MPa)	Wurzelkanal (MPa)
	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	1	+	23,14	30,04
		2	+	12,35	14,83
		3	+	36,00	22,29
		4	+	26,66	14,03
		5	+	30,18	8,36
		6	-	31,55	25,21
		7	-	20.96	21,43
		8	-	20,24	38,74
		9	-	24,26	21,65
		10	-	17,66	31,46
	Variolink II/Excite DSC	1	+	19,12	32,66
		2	+	14,29	26,64
		3	+	28,80	40,89
		4	+	14,71	27,09
		5	+	12,16	41,10
		6	-	15,10	19,78
		7	-	21,36	23,52
		8	-	15,65	25,85
		9	-	21,85	26,42
		10	-	15,66	18,18
	Panavia F 2.0	1	+	38,00	23,53
		2	+	36,01	21,40
		3	+	26,15	21,13
		4	+	18,84	33,22
		5	+	25,43	22,27
		6	-	25,52	25,36
		7	-	14,84	17,07
		8	-	15,68	21,66
		9	-	27,55	19,78
		10	-	19,79	16,85
	RelyX Unicem	1	+	21,18	36,07
		2	+	11,08	23,70
		3	+	28,77	37,39
		4	+	25,58	23,22
		5	+	20,49	24,59
		6	-	25,44	24,71
		7	-	21,18	25,40
		8	-	16,88	23,36
		9	-	20,93	20,11
		10	-	33,27	23,27

Tabelle 21. Ausstoßfestigkeitswerte der einzelnen Testproben bei Befestigung von FRC Postec mit vier verschiedenen Arten der Befestigungsmaterialien

FRC Posrec	Befestigungsmaterialien	n	Haftsilan	Kompositaufbau (MPa)	Wurzelkanal (MPa)
	Dyract Cem Plus/Prime&Bond NT	1	+	27,86	16,75
		2	+	30,25	33,44
		3	+	23,43	21,75
		4	+	26,36	8,39
		5	+	29,81	15,97
		6	-	36,75	22,90
		7	-	32,43	24,57
		8	-	22,17	15,42
		9	-	33,18	24,45
		10	-	12,89	23,63
	Variolink II/Excite DSC	1	+	32,51	23,54
		2	+	28,90	37,63
		3	+	25,74	32,76
		4	+	20,62	29,93
		5	+	24,39	24,45
		6	-	27,06	37,59
		7	-	24,98	34,36
		8	-	19,57	27,58
		9	-	28,27	28,11
		10	-	21,68	34,40
	Panavia F 2.0	1	+	25,75	17,89
		2	+	25,87	28,55
		3	+	22,74	21,11
		4	+	26,33	14,86
		5	+	27,15	28,50
		6	-	20,00	22,34
		7	-	23,85	16,67
		8	-	14,35	24,21
		9	-	26,50	25,75
		10	-	32,88	27,86
	RelyX Unicem	1	+	32,38	20,37
		2	+	30,93	24,53
		3	+	31.56	18,35
		4	+	31,11	34,97
		5	+	32,59	17,07
		6	-	28,63	25,58
		7	-	27,74	21,50
		8	-	31,72	16,75
		9	-	33,41	34,18
		10	-	21,33	25,37

8. Danksagung

Herrn **Prof. Dr. med. dent. Bernd Haller** danke ich für die Überlassung des Themas und die Übernahme des Referates. Ein besonderer Dank gebührt ihm für die kompetente Führung und intensive und überzeugende Betreuung bei der Dürchführung und Fertigstellung der vorliegenden Arbeit.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn **Henry Frehse** für die Einweisung und technische Unterstützung bei der Erstellung und Auswertung der Proben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern in der Heimat.

Schließlich möchte ich meinem Mann danken, der mir jeder Zeit mit Rat und Tat beistand sowie Mut und Kraft gab.