

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Parodontologie, Präventive Zahnmedizin und Zahnerhaltung

Direktor: Prof. Dr. Thomas Beikler

Haftfestigkeiten kurzer Titan- und FRC-Wurzelstifte

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin an der Medizinischen
Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von:

Britta Dorothea Werner aus Hamburg

Hamburg 2019

Angenommen von der Medizinischen Fakultät am: 24.01.2020

Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

Prüfungsausschuss, die Vorsitzende: Prof. Dr. Petra Schmäge

Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter: PD. Dr. Dr. Henning Hanken

In Dankbarkeit
meiner Familie und meinem Freund gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

1.1	Funktion des Wurzelstiftes.....	1
1.2	Eigenschaften des Stift-Wurzel-Komplexes.....	6
1.3	Stiftbefestigung mit Composite.....	8
1.4	Konditionierung der Stiftoberfläche.....	8
1.4.1	Tribochemisches Beschichtungsverfahren.....	9
1.5	Reduktion der Stiftlänge.....	10
1.6	Fragestellung.....	12

2. Material und Methode

2.1	Versuchsdesign.....	13
2.2	Erlanger Wurzelstifte.....	17
2.3	Probenherstellung.....	19
2.4	Befestigungs - Composite.....	24
2.4.1	Rely X Unicem.....	24
2.4.2	Dentin Build Evo.....	25
2.5	Versuchsdurchführung.....	27
2.5.1	Lagerung/Alterung.....	27
2.5.2	Proben Vorbereitung für den μ -Push-Out Test.....	28
2.6	Ausstoßverfahren (μ -Push-Out-Test) zur Messung der Haftfestigkeit.....	30
2.6.1	Bestimmung der Bruchmodi.....	32
2.6.2	Berechnung der Haftfestigkeit aus Kraft und Segmentfläche.....	33
2.6.3	Statistische Auswertung.....	34

3. Ergebnisse

3.1	Bruchmodalitäten.....	35
3.2	μ -Haftfestigkeiten in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial und Stiftmaterial.....	41
3.2.1	Titan – Wurzelstifte mit Dentin Build Evo eingesetzt.....	41
3.2.2	Titan – Wurzelstifte mit Rely X Unicem eingesetzt.....	42
3.2.3	FRC – Wurzelstifte mit Dentin Build Evo eingesetzt.....	43
3.2.4	FRC – Wurzelstifte mit Rely X Unicem eingesetzt.....	44
3.3	μ -Haftfestigkeiten bezüglich Beschichtung.....	45
3.4	μ -Haftfestigkeiten bezüglich Wurzelsegment.....	45
3.5	Ergebnisse.....	46

3.5.1 Einfluss der Parameter: Stiftmaterial, Befestigungsmaterial, Stiftart und Segment.....	46
3.5.2 Ergebnisse Mikrohaftfestigkeiten (MPa)	48
4. Diskussion.....	50
5. Schlussfolgerung.....	58
6. Zusammenfassung.....	59
6.1 Englische Zusammenfassung (Abstract).....	61
7. Literatur.....	63
8. Danksagung.....	75
9. Eidesstattliche Versicherung.....	76

1. EINLEITUNG

1.1 Funktion des Wurzelstiftes

Endodontisch behandelte Zähne haben oftmals ausgedehnte koronale Hartsubstanzdefekte. Der Grund dafür ist, dass eine unterminierende Kariesexkavation erforderlich war oder die vertikalen Zugänge für die maschinelle, endodontische Aufbereitung großzügig präpariert wurden. Um den Zahn mit einer langfristig erfolgreichen Restauration zu versorgen, muss diese ausreichend stabil gegenüber den im Mund wirkenden Kaukräften sein. Deshalb wird der Aufbau ggf. durch einen Stift im Wurzelkanal verankert und mittels Ferrule-Design von der Krone gefasst. (Lazari et al 2018, Ausiello et al 2017, Wanderer et al. 2014, Santos et al 2018) Durch das Ferrule-Design wird die auf den Stift-Stumpf-Aufbau einwirkende Belastung reduziert. Eine mindestens 1 mm breite Stumpffassung wird gefordert. (Ausiello et al 2017, Santos et al 2018)

Wurzelstifte dienen der Verankerung von Prothetik auf tief zerstörten Zähnen. Während früher jeder wurzelkanalgefüllte Zahn mit einem Stift versehen wurde, wird die Indikation für einen Wurzelstift heute individuell gestellt. Entscheidungskriterien für das Setzen eines Wurzelstiftes sind der Grad der Zerstörung der koronalen Hartsubstanz, die Möglichkeit ein Ferrule Design zu gestalten, (Lazari et al 2018, Ausiello et al 2017, Santos et al 2018) sowie Art und Ausmaß der prothetischen Versorgung und damit der Belastung des einzelnen Pfeilerzahns. (Blankenstein 2002, De Cleen 1994, McLean 1998, Morgano 1996, Naumann und Michael 2003)

Wurzelstiften kommt also die Funktion zu, dem Aufbau Retention zu bieten und die übertragenen funktionellen Kräfte gleichmäßig auf die Wurzel zu verteilen.

Die Indikationen für das Setzen von Wurzelstiften wurden in den letzten Jahren zunehmend eingeschränkt. Misserfolge in Form von Wurzelfrakturen traten durch die Wurzelstifte auf, wenn diese Spannungsspitzen oder eine Keil-Wirkung im Wurzelkanal ausübten, bzw. die Wurzel bei der Präparation schwächten und das Risiko von Perforationen bargen. (Zogheib et al. 2011, Naumann und Michael 2003) Wurzelfrakturen führen zu Zahnverlust und sollten daher vermieden werden.

Die Adhäsivtechnik ermöglichte den koronalen Aufbau von ausgedehnten koronalen Defekten, aber die langfristige Haltbarkeit gegenüber horizontal abscherenden Kräften ist weiterhin limitiert.

Nach wie vor ist der gut adaptierte Wurzelstift anderen Kanalverstärkenden Methoden, wie der mit reinem Composite und anschließendem Aufbau, dem sogenannten Monoblock-Verfahren, in seinen Haftwerten überlegen. (Bakaus et al 2018, Gomes et al 2014b, Weine et al 1991)

Grundsätzlich ist anerkannt, dass Wurzelstifte bei tief zerstörten Zähnen indiziert sind. D.h, Zähne mit einer koronalen Defektausdehnung von mind. 2 Flächen, einem fehlenden Dentinkern bzw. einem großen vertikalen Defekt oder einem sog. Flaring* durch die Trepanation oder Wurzelkanalaufbereitung, sollten mit Wurzelstiften rekonstruiert werden (DGZMK Stellungnahme 2003, Nergiz und Schmage 2004, Heydecke und Peters 2002, Naumann und Michael 2003, Morgano et al 1996, Smith und Schuman 1997)

Angestrebtes Ziel der Wurzelstiftkonstruktion war es immer, eine gleichmäßige Kraftübertragung durch die Wurzelstifte auf den gesamten Wurzelkanal zu gewährleisten, um dadurch eine optimale Kraftweiterleitung der koronalen, funktionellen Kräfte zu erhalten, die langfristig Bestand hat.

Seit den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurden verschiedene konfektionierte Wurzelstift-Aufbausysteme auf den Markt gebracht, bei denen Vorbohrer und Stift formkongruent aufeinander abgestimmt waren, d.h. dass der Steigungswinkel und Durchmesser gleich waren. (Postec Ivoclar Vivadent, DT Light Post VDW)

Ursprünglich wurde in den 1960er bis 1980er Jahren mit Schraubenankern oder parallelwandigen Wurzelstiften gearbeitet. Dabei belasteten die Schraubspitzen oder die parallele Form die konische Zahnwurzel unphysiologisch. Konische Stifte haben sich daher ab den 1990er Jahren durchgesetzt, da sie durch ihre wurzelkongruente Form die einwirkenden Kräfte auf eine möglichst große Wurzeloberfläche gleichmäßig übertragen. (Dietschi et al 1979, Schmage et al 1992, Pinto et al 2018) Das in dieser Arbeit verwendete ER-Stiftsystem wurde von Prof. Dr. Manfred Hoffmann an der prothetischen Abteilung Universität Erlangen 1986 entwickelt.

*Trichterförmige Erweiterung des oberen Teils vom Wurzelkanal durch Zugangspräparation für endodontische Aufbereitung mit stärker konischen Aufbereitungsinstrumenten.

Die konischen Stifte üben allerdings auch eine Keilwirkung aus, weshalb sie mit einem koronalen Stiftkopf auf dem Boden der Pulpakammer abgestützt werden sollten. (Sorensen und Martinoff 1984, Coelho et al 2009, Ausiello et al 2018)

Die adhäsive Befestigung relativiert zwar die Notwendigkeit der koronalen Abstützung konischer Stifte, jedoch verhindert nur der chemische Verbund, dass die Wurzel durch weitergeleitete Kaukräfte vertikal belastet wird.

Der Stiftkopf als koronales Retentionselement am Wurzelstift vermeidet zum einen die vertikale Keilwirkung des konischen Wurzelstiftes, zum anderen bietet er eine Verstärkung im Bereich der größten Belastung am marginalen Übergang, sodass der Wurzelstift nicht so leicht bricht. Um einen koronalen Retentionsanteil des Wurzelstiftes oder sog. „Stiftkopf“ passend in ein präpariertes Stiftbett einzufügen, muss der konische Wurzelstift eine definierte Länge haben. Die Insertionstiefe bei der Stiftbettpräparation muss eingehalten werden und der Stift entsprechend der Wurzelmorphologie ausgesucht werden. Nur dann liegt der Stiftkopf nach der Präparation des Stiftbettes mit einem formkongruenten Instrument dem Plateau am Defektboden passgenau auf. (Gomes et al 2014a)

Klinisch stellt sich vor allem der bakteriendichte langfristige Verschluss des apikalen Foramens als wichtiges Erfolgskriterium für die Erhaltung des Zahnes und damit seiner gesamten Versorgung dar. (Shillingburg et al 1970) Die apikal des Wurzelstiftes verbleibende Wurzelfüllung sollte für eine ausreichende Abdichtung gegen das bakterielle Mikroleakage mindestens 4 mm oder mehr betragen. (Waliszewski und Sabala 1978, Wu et al 1998) Je näher sich die Stiftspitze am Foramen Apicale befindet, desto eher besteht die Gefahr einer Infektion des Wurzelkanals durch einen unentdeckten, nicht dicht mit Guttapercha versiegelten Seitenkanal. (Kayser 1996)

Bei tiefzerstörten Zähnen ist oft nur eine verminderte Restwurzellänge nutzbar, wodurch die mögliche Länge der Wurzelstifte limitiert ist.

1.2 Eigenschaften des Stift-Wurzel-Komplexes

Wurzelstifte werden heute präfabriziert aus Titan, Gusslegierungen, Zirkonoxid-Keramik und aus Glasfaserverstärktem Composite (FRC= Fiber-reinforced Composite) angeboten. (Coelho et al 2009, Santos et al 2010)

Zirkonoxid-Keramik-Stifte sind noch härter als Metallstifte. Metallstifte aus Gusslegierungen erfordern bei der Anfertigung einen zusätzlichen Laborarbeitsschritt und ggf. einen Anguss aus einer Edelmetalllegierung, was die Anwendung zeitaufwändig und teuer macht.

Titan-Stifte haben nach wie vor ihre Indikation behalten. (Nokar et al 2018)

Die Biegefestigkeit von Titan-Stiften ist hoch, weshalb der Werkstoff Titan sich bewährt hat, wenn eine höhere Belastung mit unterschiedlichen Kraftvektoren zu erwarten ist und eine Stiffraktur oder Dezementierung vermieden werden soll.

FRC-Stifte versagen schneller durch Fraktur oder Dezementierung als Metallstifte, sind dann aber gut revidierbar. (Makade et al 2011)

Die Haftfestigkeit von Titan und FRC Stiften können heute als gleichwertig betrachtet werden. Jedoch ist die Biegefestigkeit von FRC geringer als von Titan, sodass die Stifte selbst leichter brechen. (Plotino et al 2007, Stewardson et al 2010, Makade et al 2011, Cagidiaco et al 2008)

Ab Ende der 90er Jahre wurden transluzente glasfaserverstärkte Composite-Wurzelstifte (FRC-Stifte) entwickelt. Ihr großer Vorteil wurde in der besseren Ästhetik und in ihren dentin-ähnlichen Elastizitäts-Modul-Werten gesehen, wodurch ihre physikalischen Eigenschaften mehr denen des Wurzeldentins entsprachen. (Frederickson et al 1998, Isidor et al 1996, Santos et al 2010, Pinto et al 2018)

Die bei Metallstiften häufiger beobachteten vertikalen Wurzelfrakturen wurden auf die zu große Materialhärte zurückgeführt. Deshalb erschien das dentinähnliche Elastizitäts-Modul der FRC-Stifte vorteilhaft zugunsten der Vermeidung von Zahnfrakturen. (Coelho et al 2009, Mannocci et al 1999) Stressspitzen durch Kaubelastungen werden durch FRC Stifte gleichmäßiger übertragen (Amin et. al 2014, Isidor et al 1996, Ferrari et al 2000, Pfeiffer et al 2006)

FRC-Stifte erforderten die adhäsive Befestigung mit Compositen. Composite-Befestigungsmaterialien haben ebenfalls ein höheres Elastizitätsmodul als die konventionellen Zemente. (Mezzomo et al 2003) Deshalb wurde die Stiftbefestigung mit Composite-Zementen empfohlen, um eine gewisse „Pufferwirkung“ im

Zementspalt zu bewirken. (Boschian et al 2002, Schmage et al 2009a, Schmage et al 2011, Bitter et al 2007) Dies sollte die Frakturanfälligkeit von wurzelstiftversorgten Zähnen zusätzlich reduzieren (Santos et al 2010, Lazari et al 2013)

Lange Zeit war das Zementieren von Wurzelstiften die einzige Möglichkeit der Befestigung im Wurzelkanal. Die Haftung von Zementen, insbesondere von Phosphatzement beruhte auf den Rauigkeiten und der mikromechanischen Verzahnung der Grenzflächen. Hierbei galt: umso größer die Retentionsfläche, desto besser war die Friktion des Stiftes im Kanal. (Krupp et al 1979, Johnson und Sakumura 1978, Nergiz et al 1997 und 2002)

Dabei wurde eine rein mechanische Haftung über die Friktion erzielt, deren Höhe über die Mantelfläche (Länge/Durchmesser) und die Kontaktfläche im Wurzelkanal bestimmt wird.

Gleichzeitig sind auch Oberflächenstrukturen und Steigungswinkel der Stifte für ihre Haftfestigkeit relevant.

Um eine befriedigende retentive Wirkung zu erhalten, verlangte der Standard lange eine Wurzelstiftlänge von 2/3 der Wurzellänge (Sapone und Lorencki 1981). Mindestens sollte die Stiftlänge die Höhe der ehemaligen klinischen Zahnkrone nicht unterschreiten. (Barker 1963, Gutman 1977)

Das Stiftbett stellt im mechanischen Sinne den „Lastarm“ dar, während der koronale Anteil den „Kraftarm“ bildet. Wenn die eintreffenden Kräfte auf einen zu kurzen Lastarm abgeleitet werden, erhöht sich ihr Wert bezogen auf eine kleinere Fläche. Dadurch wird nicht nur der Stift leichter gelockert, sondern er kann auch die Wurzelwände bis zur Ermüdung und somit Infraktur belasten. Ein umso längerer Stift überträgt daher die eintreffenden und weitergeleiteten Kaukräfte günstiger auf eine größere Wurzellänge. (Pickard 1964, Adanir und Belli 2008) Allerdings konkurriert diese Forderung mit derjenigen, dass mindestens 4 mm apikale Restwurzelfüllung nach der Revidierung für den Wurzelstift belassen werden sollen. (Shillingburg et al 1970, Mannocci et al 2001, Waliszewski und Sabala 1978)

Die Häufigkeit von Wurzelfrakturen korreliert mit der Länge der Präparationstiefe und -weite im Wurzelkanal. (Liu et al 2013, Zandbiglari et al 2006) Es gilt abzuwägen, dass eine höhere Präparationstiefe zwar eine längere friktive Fläche bewirkt, aber den Zahn auch schwächt und damit die mechanische Belastbarkeit seiner prothetischen Versorgung wieder reduziert. (Junqueira et al 2017) Weiterhin

wird insbesondere der marginale Bereich funktionell stark belastet, sodass zu große Stiftdurchmesser bezogen auf die umgebende Restzahnhartsubstanz Frakturen begünstigen. Für die Errechnung des Stiftdurchmessers wurde als klinische Grundregel ein Drittel des Zahndurchmessers angegeben. (Johnson et al 1976, Mou et al 2009) Als Mindestwert beschreibt die Literatur 1 mm zirkulär verbleibende Restdentinstärke. (Caputo und Stanlee 1976)

Gerade bei tief zerstörten Zähnen ist von einer großen koronalen Höhe auszugehen, die durchschnittlich ca. 8-10 mm beträgt. Sie variiert individuell bezüglich Rezession, marginalem Knochenabbau, interalveolärem Abstand und Morphologie. Legt man die endodontische Meßlänge von 20 mm im Oberkiefer und 18 mm im Unterkiefer zugrunde und subtrahiert eine Kronenhöhe von 8-10 mm, verbleiben zwischen 8 und 12 mm Restwurzellänge.

Von dieser Restwurzellänge sollen wiederum 4 mm hermetisch mit Wurzelfüllung versiegelt sein. Demnach stehen maximal 8 mm für eine Stiftverankerung zur Verfügung. (siehe Abb.1)

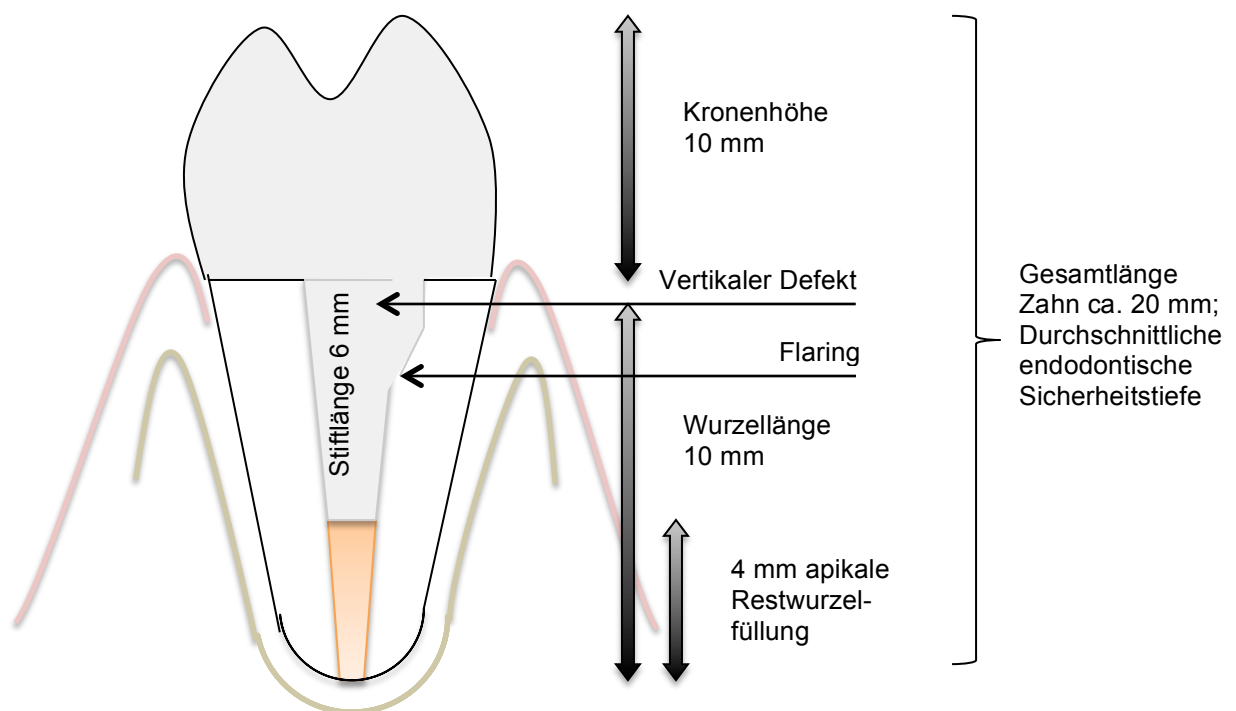


Abb. 1: Schemazeichnung: Illustration einer realistischen Wurzelstiftlänge

Diese Länge widerspricht deutlich der Forderung nach einer Stiftlänge, die mindestens der Kronenhöhe entspricht. Die klinische Praxis hat sich in den letzten Jahren dahin weiterentwickelt, Wurzelstifte nur kürzer zu inserieren, ohne dass es dafür bisher eine wissenschaftliche Evidenz gäbe. Hinzu kommt, dass mit dem Trend zu FRC-Stiften vorrangig Schaftstifte ohne Stiftkopf verwendet wurden, die in beliebiger Tiefe inseriert werden können.

Neuste Untersuchungen ergaben, dass der selbstadhäsive Zement Rely X Unicem bessere Haftwerte erreichte als andere gebräuchliche Befestigungs-Composite-Zemente (Farina et al 2011, Soares et al 2012, Das et al 2015). Wie effektiv die Verbindung zwischen Dentin und Befestigungscomposite ist, hängt letztlich von dem verwendeten Adhäsiv-System ab und der Entstehung von einer ausreichenden Penetrationszone (Hybridschicht). Mehrflaschensysteme waren dabei den Einflaschen Systemen bezüglich der Ausbildung von retentiven Plugs überlegen. (Vichi et al 2002, Krämer et al 2000) Andere Autoren in neueren Untersuchungen fanden keine Unterschiede bezüglich der Haftfestigkeiten der Systeme und nur eine signifikante Abnahme der Haftfestigkeit von koronal nach apikal. (Schmage et al 2006, Rodriques et al 2017) Das Composite füllt zudem Inkongruenzen zwischen Wurzelstift und Stiftbett auf.

Entscheidend ist dabei die effektive Auflösung der Schmierschicht und damit ein Eröffnen der Dentin Tubuli, um diese für die Ausbildung retentiver Kunststoffzapfen (sog. „Tags“) zu nutzen. Die ausreichende Freilegung der Tubuli hängt in erster Linie mit der Wahl des chemischen Spülprotokolls bei der Aufbereitung des Kanals zusammen. Die Literatur verweist hier auf unterschiedliche Lösungen (Bitter et al 2017, Culhaoglu et al 2017, Martinho et al 2015)

Um ein Verblocken der Tubuli durch den anfallenden Abtrag bei der Aufbereitung zu verhindern, soll der Kanal regelmäßig mit NaOCl gespült und gereinigt werden. Eine letzte Spülung mit CHX wird empfohlen. (Toman et al 2014, Martinho et al 2015)

1.3 Stiftbefestigung mit Compositen

Mit der Einführung der Dentineadhäsive konnten Wurzelstifte mit Compositen im Wurzelkanal befestigt werden. Dazu war es allerdings notwendig, dass sowohl das Adhäsiv als auch das Composite autopolimerisierend oder dualhärtend waren, weil die Lichtleitung bis in die Tiefe des Kanals nicht gewährleistet war. Die Konditionierung und die Mehrschritttechnik der Adhäsive machten das Handling fehleranfällig. Zudem beeinflussen auch die Vorbehandlung des Zahnes mit eugenolhaltigen Materialien und der Sealer in den Dentintubuli die Haftfestigkeit. Moderne Composite verzichten zum Teil ganz auf die Konditionierung und Adhäsiv-Applikation oder diese ist stark vereinfacht. Unterschieden werden die Befestigungscomposite als Composite-Zemente oder solche, die gleichzeitig als Aufbau Composite dienen können. Letztere haben den Vorteil, dass sie die Idee des Monoblocks, d.h. des Stift-Stumpfaufbaus in einem Stück inseriert, umsetzen können. Aktuell bewährt haben sich selbstadhäsive Compositezemente z.B. Rely X Unicem (3M Espe) und Aufbaucomposite mit dualhärtendem, selbstätzendem Adhäsiv, z.B. Dentin Build (Komet), Build-It (Pentron), LuxaCore (DMG), Rebilda D (Voco). Der Füllkörperanteil dieser Composite beläuft sich auf etwa 70 Gew% (50 Vol%). Mit steigendem Füllkörperanteil nimmt die Viskosität und die Benetzbarkeit der Composite ab, die Schrumpfung wird jedoch verringert und Spannungen in geschlossenen Kavitäten wie dem Wurzelkanal dadurch minimiert. Zusätzlich werden die mechanischen Eigenschaften mit steigendem Füllkörpergehalt erheblich verbessert. (Schmage et al 2012b, Keul et al 2016, Panitiwat und Salimee 2017)

1.4 Konditionierung der Stiftoberfläche

Unterschiedliche Konditionierungen der Stiftoberfläche wurden bereits in den 1990er Jahren entwickelt und genutzt. (Proano et al 1998, Schmage 2006, Monticelli et al 2006, Edelhoff et al 2000)

Eine Retentionssteigerung konnte durch eine makro- und mikromechanische Oberflächenvergrößerung der Stifte geschaffen werden. (Nergiz et al 1997, Sahafi et al 2003) Horizontale Rillen oder allein die Oberflächenaktivierung durch Sandstrahlung (Al_2O_3) ermöglichten eine mechanische Verzahnung der Zemente in den Unterschnitten und erhöhten dadurch die Retention ohne eine Vergrößerung der

Stiftlänge oder aber des Stiftdurchmessers zu verlangen. (Özcan et al 1998)

Die Sandstrahlung der präfabrizierten Metallstifte ist heute der Standard, aber zusätzlich wird ein besserer chemischer Verbund zwischen Stift und Befestigungscomposite gefordert, um bakterielles Mikroleakage zu vermeiden. (Özcan et al 1998, Wu et al 1998)

Oberflächenkonditionierungen, die den chemischen Verbund der Grenzflächen intensivieren, wurden zeitgleich mit der Nutzung von Adhäsivsystemen im Wurzelkanal entwickelt. Dafür wurden u.a H_2O und Ethanol empfohlen. (Kaur et al 2018) Auch die Silanisierung in Kombination mit vorangegangener Sandstrahlung und die Oberflächenbehandlung mit verschiedenen Plasma-Agenzien (zB. NH_3 und HMDSO) konnten deutliche Verbesserungen erzielen (Özcan und Vallittu 2005, Prado et al 2017, Lema et al 2013)

Das in dieser Arbeit verwendete tribochemische Verfahren (Tbc) zu Oberflächenkonditionierung hat sich vielfach für diese Zwecke bewährt und wurde in seiner Effektivität gegenüber den anderen Methoden als überlegen bestätigt. (Proano et al 1998, Radthke et al 2014, Schmäge et al 2003, Schmäge et al 2012a, Valandro et al 2006, Magni et al 2007, Goracci et al 2005)

Der adhäsive Verbund zwischen Zahn und Stiftmaterial konnte durch das Tbc-Verfahren in zahlreichen Studien deutlich verbessert werden. (Schmäge et al 2012a, Rathke et al 2014, Schönbrodt et al 2003, Xie et al 2016)

1.4.1 Tribochemisches Beschichtungsverfahren

Die Oberfläche des Stiftes wird beim tribochemischen Beschichtungsverfahren für den Verbund zum Befestigungscomposite vorbereitet. Durch den Einsatz von mechanischer Energie wird eine chemische Verbindungsschicht auf den Stift aufgebracht.

Mittels Korundstrahlung (Aluminiumoxid Strahlsand) mit einer Korngröße von 30-110 μm wird die Oberfläche des Wurzelstiftes gereinigt und gleichzeitig aktiviert. Die Oberfläche weist dadurch ein einheitliches Rautiefenmuster auf.

Anschließend erfolgt die tribochemische Beschichtung der vorgestrahlten Oberfläche mit Kieselsäure modifiziertem Korund. Hierbei handelt es sich um mit SiO_2 überzogene Partikel der Korngröße 30-110 μm . Auf der Oberfläche des Stiftes lagert sich die dünne Schicht SiO_2 ab, welche durch den Aufprall auf die Stiftoberfläche

aufgeschmolzen wird. Anschließend wird ein Silan als bifunktionelles Molekül aufgetragen, das eine Bindung zwischen den organischen Bestandteilen des Befestigungscomposites und den anorganischen Bestandteilen der Stiftoberfläche schaffen kann.

Wenn dieses Verfahren nicht Chairside direkt vor der Stiftinsertion erfolgt, ist diese Oberfläche nicht stabil. Daher werden die präfabrizierten, beschichteten Stifte mit einer dünnen, gleichmäßigen Schicht PMMA überzogen, damit die Beschichtung nicht beschädigt wird und später aktiviert werden kann.

Das tribochemische Beschichtungsverfahren ist grundsätzlich bei allen Stiftmaterialien möglich, so z.B. bei Titan und FRC. Besonders im randspaltfreien Verbund zwischen Metallen und Kunststoffen hat es sich als zuverlässig erwiesen. (Khan et al 2017, Rathke et al 2014, Xie et al 2016)

Neben der Oberflächenbeschaffenheit des Stiftes spielt auch die Vorbereitung der Dentinoberfläche im Wurzelkanal eine Rolle für die Retention des Stiftes.

Der aufbereitete Wurzelkanal kann zusätzlich manuell aufgeraut werden. Dazu wird ein formkongruentes, diamantiertes Aufrau-Instrument 5 mal rotiert und der Kanal anschließend erneut gespült. Dann kann der Befestigungscomposite in die erzeugten Unterschnitte fließen, wodurch die chemische Bindung durch eine mechanische Komponente ergänzt wird. (Nergiz et al 1997, Nergiz et al 2002, Bakaus et al 2018)

Die chemisch konditionierte und angeraute Dentinoberfläche liegt dann der sandgestrahlten und tribochemisch beschichteten Stiftoberfläche gegenüber und kann über den Befestigungscomposite eine effektive Verbundeinheit bilden.

1.5 Reduktion der Stiftlänge

Durch die Entwicklung und Verwendung von adhäsiven Verbundstoffen wurde die Notwendigkeit einer maximalen Extension von Stiftlänge und -dimension zu Gunsten der Friktion und damit ein hohes Perforationsrisiko in Kauf zu nehmen in Frage gestellt. Eine kürzere Stiftlänge wird inzwischen klinisch akzeptiert und eine ausreichende Haftfestigkeit angenommen. (Junqueira et al 2017, De Souza et al 2016) Im Vordergrund steht die Substanzschonung durch eine minimalinvasive Präparation. Dem gegenüber zeigten Finite-Element-Analysen bei verkürzten Stiften

eine erhöhte Frakturgefährdung der Wurzeln bei nicht axialer Belastung. (Lin et al 2018) Einige Autoren berichten dagegen von einer erhöhten Frakturresistenz bei mit kürzeren Stiften versorgten Zahnwurzeln. (Hatta et al 2011)

Ein adäquater Stiftdurchmesser bleibt obligat, damit der Stift unter Belastung nicht verbiegt oder bricht. Neben der mechanischen Retention haften moderne Befestigungscomposite über einen chemischen Verbund an Wurzeldentin und Stift. Durch die Nutzung von Befestigungscompositen und Oberflächenkonditionierung der Grenzfläche Stift – Composite sowie Dentin-Composite konnte der Haftverbund intensiviert werden. (siehe 1.3+1.4)

Aufgrund der Morphologie des Wurzelkanals sind die Haftwerte des Stiftes im Kanal abhängig von der Region in der Zahnwurzel. Die Anzahl an Dentintubuli, die für die Ausbildung der Hybridschicht zwischen Wurzeldentin und Adhesiv verantwortlich sind, sinkt von koronal nach apikal. (Mjör et al 2001, Akgungor und Akkayan 2006, Rodrigues et al 2017) Dadurch werden in den koronalen Anteilen des Wurzelkanals mehr Tags ausgebildet (De Souza et al 2016) und bessere Haftwerte erlangt als in den apikalen Regionen. (Bouilaguet et al 2003, F. Zcari et al 2012, da Silveira-Pedrosa et al 2016) In der apikalen Region können Reste des Sealers und Debris der Präparation einen optimalen Verbund beeinträchtigen, weshalb sie ohnehin weniger relevant für die Stiftadhäsion ist. (Cecchin et al 2011, Scotti et al, 2014, Serafino et al 2004)

Unter diesen Gesichtspunkten werden die Kopfstifte des ER-Wurzelstift-Aufbausystems (Komet) statt mit 9 mm Länge auf 6 mm Länge reduziert. Grundgedanke war hierbei auch, den Kopf des Stiftes auf dem Boden der Pulpakammer zu platzieren, um die Stressspitzen bei nicht axialer Belastung im noch intakten koronalen Wurzelanteil gleichmäßig zu verteilen. Zugleich soll eine ausreichend lange apikale Restwurzelfüllung belassen werden können, wodurch ein bakteriendichter Verschluss durch das Guttapercha und den Sealer garantiert wird. (Shillingburg et al 1970)

Zusätzlich sind die ER-Stifte durch eine tribochemische Beschichtung konditioniert. Diese Entwicklung soll der in der klinischen Anwendung beobachteten Tendenz, Wurzelstifte direkt in den Wurzelkanal zu inserieren, gerecht werden. Die Kopfstifte werden heute häufig in Situationen mit ausgedehnten Substanzdefekten gewählt, in denen früher individuell gegossene Stift-Stumpfaufbauten angefertigt wurden.

Allerdings besteht bislang noch keine wissenschaftliche Erkenntnis, wie hoch die Haftfestigkeit dieser kurzen Wurzelstifte im Vergleich zu den herkömmlichen ist.

1.6 Fragestellung

In dieser Arbeit sollen die tribochemisch (tbc) beschichteten, auf 6 mm verkürzten konischen Wurzelstifte des Erlanger Systems (Komet/Gebr.Brasseler; Lemgo) auf ihre Haftfestigkeit im Wurzelkanal und ihre Frakturmodalitäten beim Versagen untersucht und mit denen der konventionellen Stiften verglichen werden, die keine Beschichtung haben. Sie wurden in dieser Untersuchung mit zwei Befestigungsmaterialien eingesetzt. Bei der Versuchsdurchführung sollte außerdem der Einfluss des Dentinverbundes in Abhängigkeit vom Wurzelbereich berücksichtigt werden.

Nullhypothesen

Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den kurzen 6 mm und den herkömmlichen 9 mm langen Stiften, die auf 6 mm inseriert wurden, bezüglich der Parameter:

- Stiftmaterial
- Oberflächenbeschichtung
- Befestigungsmaterial
- Region des Wurzeldentins

2. MATERIAL UND METHODE

2.1 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign dieser In-vitro-Untersuchung ist in Tab. 1 und Abb. 2 systematisch dargestellt.

Zur Untersuchung wurden insgesamt 120 humane extrahierte Zähne genutzt, die endodontisch aufbereitet und randomisiert in 12 Gruppen zu $n = 10$ unterteilt wurden. In diese wurden 40 ER Posts X Coated in der Größe „rot“ entsprechend ISO 090 mit 6 mm Stiftlänge in 2 Materialien (Titan und FRC) und mit 2 Zementen (Rely X Unicem und Dentin Build) eingesetzt. Diese Stifte sind mit einer haftvermittelnden Polymerschicht überzogen. Zur Kontrolle dienten herkömmliche ER Post X mit 9 mm ohne Oberflächenbeschichtung, ebenfalls in ISO Größe 090, die nur sandgestrahlt waren und nur 6 mm tief inseriert wurden.

Zum Vergleich der beiden Hauptgruppen wurden unbeschichtete 6 mm ER Post X hinzugenommen. Beide Hauptgruppen entsprachen zwar der Stiftgröße ISO 090, aber bei der Hauptgruppe I (= Kontrolle) war der inserierte apikale Bereich etwas dünner als bei der Hauptgruppe III, weshalb eine dritte Gruppe hinzugenommen wurde: Hauptgruppe II stellt der ER Post X 6 mm unbeschichtet dar. Dazu wurden die Stifte in der Produktion vor dem Beschichtungsprozess abgefangen. Passend zu diesem Prototyp wurde ein entsprechendes Kanalpräparationsinstrument hergestellt.

3 Stifttypen wurden demzufolge untersucht:

- ER Post 9 mm ohne Beschichtung
- ER Post X 6 mm ohne Beschichtung
- ER Post X 6 mm mit Beschichtung

Für jeden Stifttyp stand ein formkongruentes Präparationsinstrument zur Verfügung. Damit wurden jeweils 40 Wurzeln für 6 mm Stiftlänge und ISO 90 vorbereitet.

Je 10 Stifte jeden Materials und mit beiden Zementen wurde in die Wurzeln mit dem jeweiligen Stifttyp inseriert.

Nach dem Einsetzen der Stifte wurden die Wurzeln einer künstlichen Alterung unterzogen, bevor die Mikrohafterestigkeiten und die dazugehörigen Frakturmodalitäten bestimmt wurden.

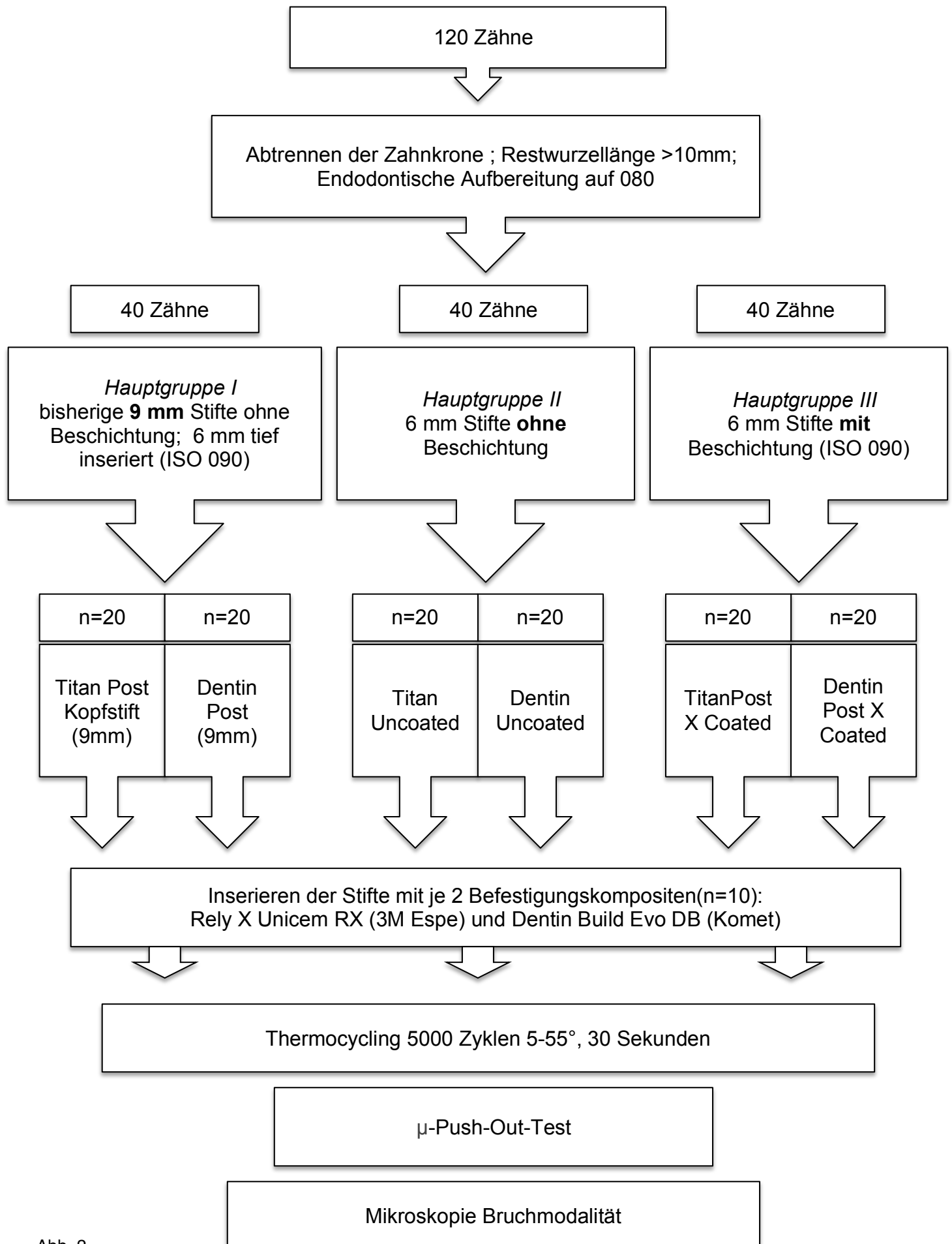


Abb. 2
Versuchsablauf

Tab. 1: Versuchsgruppen

Haupt- gruppe	Test Gruppen	Stift-bett- präparation	Beschich- tung	Komposite Material	Stift Material Titan	Kommerzieller Name	Abk.	Stift Materi- al FRC	Kommerzieller Name	Abk.
I	Konventionel- ler 9 mm Stift auf 6 mm Tiefe inseriert	Konventionel- les Präparations- instrument	Nein	Rely X Unicem	10	ER Titanium Post X	Ti1X	10	ER Dentin Post X	FRC 1X
				Dentin Build Evo	10		Ti1D	10		FRC 1D
				Rely X Unicem	10		Ti2X	10		FRC 2X
II	Kurzer 6 mm Stift ohne Beschichtung	Proto-type Instrument abzüglich der fehlenden Beschichtung s-dicke	Nein	Dentin Build Evo	10	Prototyp	Ti2D	10	Prototyp	FRC 2D
				Rely X Unicem	10		Ti3X	10		FRC 3X
III	Kurzer 6 mm Stift mit Beschichtung	Präparations- instrument für 6 mm Stifte	ja	Dentin Build Evo	10	ER Titanium Posts X Coated	Ti3D	10	ER Titanium Post X Coated	FRC 3D

2.2 Erlanger Wurzelstifte

Die vorliegende Untersuchung wurde mit präfabrizierten konischen Wurzelstiften mit koronaler Retention, hier als Retentionskopf bezeichnet, des Erlanger Wurzelstift-Systems durchgeführt (Komet, Lemgo). Alle Stifte besaßen die gleiche ISO-Größe: 090, die mit der roten Farbmarkierung belegt war.

Hauptgruppe I:

ER-Wurzelstifte mit Retentionskopf sind in den Durchmessern 050, 070, 090, 110, sowie den Längen 9, 12, 15 mm ohne Beschichtung mit herstellerseitig Korundgestrahlter Oberfläche verfügbar. Verwendet wurden die Stifte der ISO 090 mit einer Länge von 9 mm. (Abb. 3a/3b) Insetiert wurden sie nur auf 6 mm Länge.

Der Stiftteil unterhalb des Kopfes besitzt eine Länge von 9 mm und verjüngt sich nach apikal konisch. Der Konvergenzwinkel beträgt $2,1^\circ$. Der Kopf des Stiftes ist 4 mm hoch und besitzt Retentionselemente für das Aufbaucomposite und ist ebenfalls beschichtet.



Abb. 3a: **Titan Post** Kopfstift aus Reintitan und einer Länge von 9 mm (Firmenbezeichnung 49L9) der Größe 090



Abb. 3b: **Dentin Post X** Kopfstift aus glasfaserverstärktem Composite und einer Länge von 9 mm (Firmenbezeichnung 445L9) der Größe 090

Die Glasfaserstifte besitzen nach Angaben des Herstellers eine Biegefestigkeit von 550MPa und ein Elastizitätsmodul von 30 GPa auf.

Die unbeschichteten Wurzelstifte wurden vorsichtig aus der Verpackung entnommen, ohne Fettrückstände von der Haut auf den Stift zu bringen. Sie wurden zusätzlich direkt vor der Insertion in einer 96% Alkohol getränkten Wattekugel gereinigt und anschließend luftgetrocknet.

Hauptgruppe II:

In der Hauptgruppe II, wurden Stifte entsprechend der Hauptgruppe III jeweils ohne Beschichtung aus dem Fertigungsprozess abgefangen. Sie stellten einen Prototyp dar und besaßen einen um den Betrag der Oberflächenbeschichtung geringeren Durchmesser. Die Oberfläche war ebenso wie die der herkömmlichen, unbeschichteten Stifte korund gestrahlt. Verwendet wurden die 6 mm langen Stifte aus Titan und aus FRC.

Hauptgruppe III

ER-Wurzelstifte mit reduzierter Stiftlänge werden aus Titan und FRC in 6 mm Länge mit einem Durchmesser entsprechend ISO Größe 070 und 090 und für die FRC-Stifte auch in ISO 110 angeboten. (Abb. 4a/4b) Die Stifte besitzen eine haftvermittelnde Polymerschicht.



Abb. 4a: **ER Titan Post X Coated:** Kopfstifte aus Reintitan mit Haftvermittelnder zahnfarbender Polymerschicht und einer Länge von 6 mm der ISO Größe 090. Kommerziell wurden sie als TitanPost X (Firmenbezeichnung TPXCL6) gemäß ihres Materials, dem Coating und der 6 mm Stiftlänge bezeichnet.



Abb. 4b: **ER Dentin Post X Coated:** Kopfstift aus glasfaserverstärktem Composite mit haftvermittelnder zahnfarbener Polymerschicht und einer Länge von 6 mm der Größe 090. (Firmenbezeichnung DPXCL6)

Die Beschichtung, Coating genannt, besteht aus einer firmenseitig aufgetragenen Schicht mittels Silikatisierung, Silanisierung und anschließender Beschichtung mit einer haftvermittelnden Polymerschicht im Sinne einer tribochemischen Konditionierung (TBC). Der Kongruenzwinkel entspricht mit $2,1^\circ$ den Stiften der Hauptgruppe I, ebenso verhielt sich der Stiftkopf.

2.3 Probenherstellung

Für diese Studie wurden 120 frisch extrahierte, einwurzelige menschliche Prämolaren ohne Wurzelkrümmung verwendet. Es handelte sich um kariesfreie Zähne der zweiten Dentition, die aufgrund von parodontalen Schädigungen extrahiert wurden.

Nach der Extraktion wurde eine initiale Desinfektion aller Zähne mit Chloramin-T-Lösung vorgenommen. Die Zähne wurden danach gereinigt und für 7 Tage in Glutaraldehyd-Lösung gelegt. Anschließend wurden sie in einem Gefäß mit Ringerlösung kühl gelagert, wodurch keine Zuordnung zu den einzelnen Patienten möglich war. Alle Zahnkronen wurden an der Schmelz-Zement-Grenze mit einem Trenn-Schleif System (EXAKT Trenn-Schleif-System, Norderstedt) unter integrierter Wasserkühlung im rechten Winkel zur Zahnlongsachse abgetrennt.

Es wurde darauf geachtet, dass die Wurzelkanäle einen runden Querschnitt besaßen und die Wurzeln nach dem Abtrennen eine Länge von mindestens 10 mm aufwiesen. Die Wurzelkanäle wurden manuell endodontisch mit Hedström-Feilen in aufsteigender Reihenfolge auf die ISO Größe 080 aufbereitet und der Abtrag regelmäßig durch eine 1,5 ige NaOCl Spülung aus dem Kanal entfernt.

Alle Proben wurden randomisiert in die 3 Hauptgruppen zu je 40 Wurzeln aufgeteilt. Die 40 Zähne wurden mit den jeweiligen Aufbereitungsinstrumenten jeder „Hauptgruppe“ auf eine Tiefe von 6 mm erweitert präpariert.

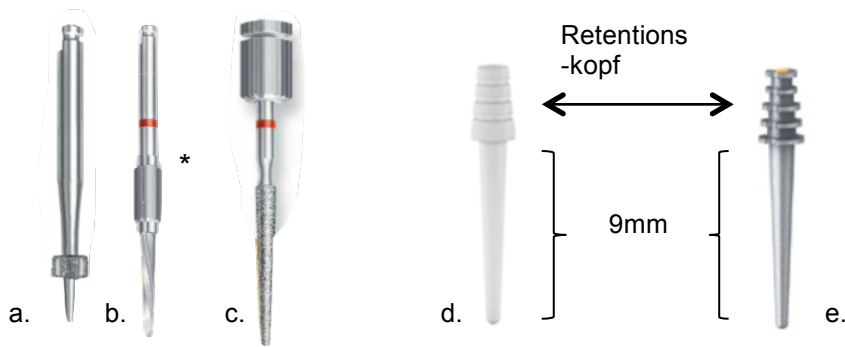


Abb. 5 : **Hauptgruppe I**

- a.) Planschleifer 120D – zum Ausformen des Retentionskastens für den Stiftkopf;
- b.) Erweiterungsinstrument 196L mit aufgesteckter Tiefenlehre * für 6 mm
- c.) diamantiertes Aufrauinstrument 196D
- d.) ER DentinPost X (445L9)
- e.) ER Kopfstift (46L9)

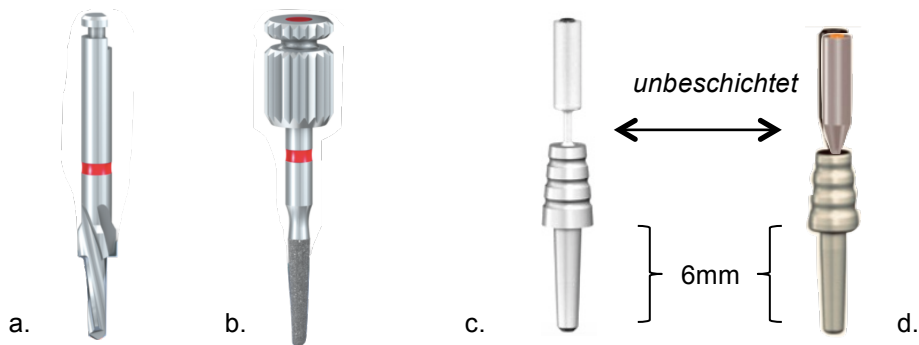


Abb. 6 : **Hauptgruppe II**

- a.) Erweiterungs-Instrument 196S für die Stiftbettpräparation *abzüglich der Beschichtung*
- b.) Aufrauinstrument 196DS
- c.) ER DentinPost X *ohne Coating* (Glasfaser verstärkter Composite)
- d.) ER Titan Post X *ohne Coating* (Reintitan)

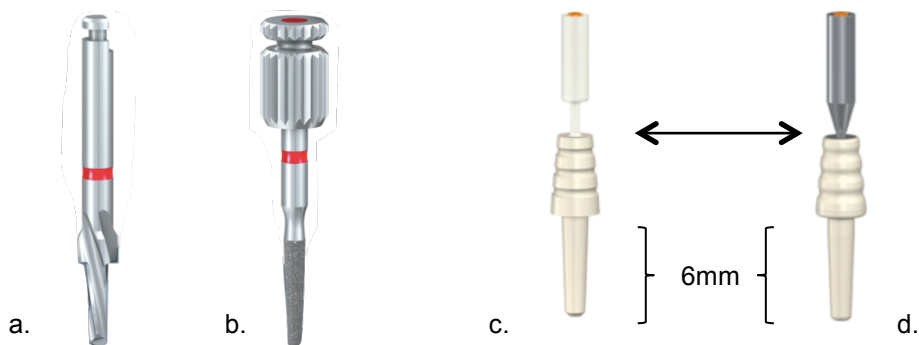


Abb. 7: **Hauptgruppe III**

- a.) Erweiterungs-Instrument 196S für die Stiftbettpräparation und gleichzeitigem Ausformen des Retentionskastens
- b.) Aufrauinstrument 196DS
- c.) ER DentinPost X Coated (aus Glasfaser verstärktem Composite)
- d.) ER Titan Post X Coated (aus Reintitan)

Die Stiftbettpräparation besteht klinisch aus folgenden Arbeitsschritten:

A – Die Wurzelfüllung wird auf die gewünschte Stiftlänge reduziert. Dieser Arbeitsschritt entfiel in dieser Arbeit, weil auf eine Wurzelfüllung verzichtet wurde.

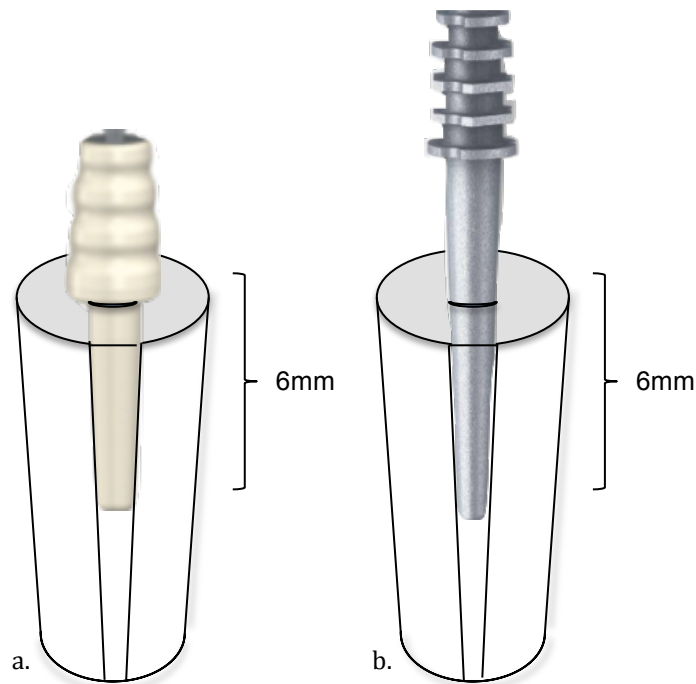
B – Mit dem Plateaubohrer wird das Plateau für den Stiftkopf anlegt. Für die 6 mm ER-Post X ist dieser in das Aufbereitungsinstrument integriert. Für die 9 mm ER-Post wird der Planschleifer 120D verwendet (Abb. 5a)

C – Das Stiftbett-Präparationsinstrument (siehe Abb. 5b, 6a, 7a) zur Wurzelkanalpräparation wird bei konventionellen Stiften mit aufgesteckter Tiefenlehre benutzt (Abb. 5b, Firmenbezeichnung 45L; Wurzelkanalerweiterungs-Instrument 196L)

Für den 6 mm Stift ist die Länge beim Erweiterer definiert. Die Erweiterer 196D unterscheiden sich in der Abbildung 6a und 7a durch den Betrag der Beschichtung, d.h die Dimension von 196D in 6a war etwas dünner als in Abb. 7a.

D – Das diamantierte Anrauinstrument raut das Wurzelentin mechanisch an (siehe Abb. 5b, 6b, 7b), um trotz adhäsiver Befestigung die zusätzliche Friktion durch die mikromechanische Verzahnung und Oberflächenvergrößerung zu nutzen.

Die Wurzelkanäle der Zähne, die den 3 Hauptgruppen zugeordnet waren, wurden mit den entsprechenden Aufbereitungs-Instrumenten 196 für die konventionellen Stifte und 196S für die verkürzten Stifte in der ISO Größe 090 auf eine Tiefe von 6 mm erweitert. (siehe Abb.8 – Schemazeichnung) Die Entfernung der Wurzelfüllung entfiel, da der Wurzelkanal nicht gefüllt wurde. Für die Präparation wurde ein grünes Winkelstück mit einer durchschnittlichen Umdrehung von 1000 U/min verwendet. Die Präparation wurde alle 10 Sekunden unterbrochen und das Instrument wurde von Debris gereinigt.



Zahnwurzel endodontisch aufbereitet ohne Wurzelfüllung

ER Titan Post X

ER Kopfstift

Abb. 8: Schemazeichnung

a.) 6 mm Wurzelstift in der Zahnwurzel eingepasst b.) 9 mm Wurzelstift in der Zahnwurzel eingepasst
Exemplarisch wurden hier der 6 mm ER-Titan Post X Coated und der 9 mm ER-Post abgebildet, getestet wurden aber ebenfalls der 6 mm ER-Dentin Post X Coated sowie der 9 mm ER-Dentin Post und die unbeschichteten 6 mm Prototypen.

Danach wurden die Stifte eingepasst (Abb. 8) und vor dem Zementieren die Wurzelkanäle mit den jeweiligen diamantbesetzten Aufrauinstrumenten, die zu der jeweiligen Hauptgruppe gehörten, mit 5-maliger Umdrehungen manuell aufgeraut. Im Anschluss an die Präparation der Wurzelkanäle wurden diese mit NaOCl (1,5%) gespült sowie mit einer finalen CHX-Spülung geendet. Vor dem Zementieren werden die Wurzelkanäle mit Papierspitzen getrocknet, indem Spüllösung aus dem Kanal abgesaugt wurde, aber die Dentinwände leicht feucht belassen wurden.

Alle 3 Hauptgruppen der Stifte wurden in jeweils 2 Materialienausführungen, nämlich Reintitan und FRC gesetzt. (siehe Abb. 5 d+e, 6 c+d, 7 c+d)

Zum Einsetzen der Stifte wurden 2 dualhärtende Befestigungscomposite verwendet: Dentin Build Evo, ein fließfähiges Hybridcomposite, und Rely X Unicem, ein selbstadhäsives Composite-Befestigungsmaterial. (siehe 2.4) Mit Dentin Build Evo musste das Wurzeldentin mit einem Adhäsiv vorbehandelt werden. (Siehe Composite Herstellerangaben).

Die Befestigungscomposite wurden nach den Herstellerangaben verwendet und auf den jeweiligen Stift-Typ aufgetragen. Sie wurden nicht direkt in den Wurzelkanal eingebracht. Die beschickten Wurzelstifte wurden dann unter Fingerdruck und einer leicht rotierenden Bewegung in den Wurzelkanal inseriert, um eine gleichmäßige Verteilung des Befestigungswerkstoffes zu generieren und Lufteinschlüsse zu vermeiden. Überschüssiger Composite, der beim Einbringen seitlich des Stiftes herausquoll, wurde vor dem Erhärten mit einem Wattepellet entfernt.

Durch Lichtaktivierung wurden die Composite am Kopf des Stiftes 40 Sek. je Probe mit einer Wellenlänge von 950mW/cm^2 ausgehärtet. (SmartLite PS, Dentsply DeTray, Konstanz)

2.4 Befestigungs – Composite

2.4.1 Rely X Unicem

Rely X Unicem (3M ESPE, Landsberg am Lech, Bayern) ist ein universaler, dualhärtender, selbstadhäsiver, flouridhaltiger, röntgenopaker Composite-Befestigungszement. Nach Herstellerangaben ist kein Konditionieren des Dentins notwendig. Verwendet wurde die RelyX Unicem Aplicap, die ein Pulver-Flüssigkeitssystem beinhaltet. Nach Aktivierung der Kapsel werden die Flüssigkeit und das Pulver in einem Hochfrequenzmischgerät miteinander homogen vermengt, sodass der Zement im Anschluss appliziert werden kann.



Abb. 9: Rely X Unicem Composite in der ApliCap mit Aktivator
© 3M ESPE

Laut Hersteller beinhaltet RelyX Unicem bifunktionelle (Meth-) Acrylate. Der anorganische Füllkörperanteil beträgt ca. Gew.72% mit einer Korngröße (D90%) von unter 9,5 Mikrometern. Die Bestandteile der Flüssigkeit sind methacrylierte Phosphorsäureester, Dimethacrylat, Acetat, Stabilisatoren und Initiatoren. Im Pulvergemisch befinden sich silanisiertes Glaspulver, Initiatoren, silanisierte Kieselsäure, Pyrimidin, Calciumhydroxid, Peroxo-Verbindungen und Pigmente.

Das Anmischen erfolgt für 10 Sekunden in einem Rotomix-Mischgerät, in das die aktivierte Kapsel eingespannt wird. Aufgetragen wurde der Composite-Zement direkt auf den Stift, der anschließend durch leicht rotierende Bewegungen unter Fingerdruck in den Kanal inseriert wurde. Der Zement erhärtet nach 5 Minuten von

selbst. Zusätzlich wurde die Zahnwurzel mit Stift von koronal mit einer LED Polymerisationslampe (Densply DeTray, SmartLite PS) für 40 Sek. mit einer Wellenlänge von 950 mW/cm² bestrahlt, um die Aushärtung mittels Photoinitiatoren des dualhärtenden Systems sicherzustellen.

2.4.2 Dentin Build Evo mit Dentin Bond Evo

Dentin Build Evo ist ein dualhärtendes, fließfähiges und röntgenopakes Hybridcomposite der Firma Komet (Lemgo).

Es wird nach Herstellerangaben zusammen mit dem Adhäsiv Dentin Bond Evo verwendet, einem selbstätzenden, dualhärtenden Adhäsiv zur Vorbehandlung und Optimierung des Verbundes zum Wurzeldentin.

Dentin Build Evo basiert auf einer Mischung aus poly- und bifunktionellen Methacrylaten und anorganischen Füllstoffen wie Bariumglasfüllern, feinverteiltes Siliciumdioxid, Nanozirkoniumdioxid und Nanocalciumfluorid.

Der Füllkörperanteil des Composites Dentin Build Evo beträgt 64 Gew.% (48% Volumenprozent) mit einer Partikelgröße von 0,02-10 µm.

Das passende Adhäsiv zum Composite, das Dentin Bond Evo, besteht aus 2 Phasen, die in gleichen Teilen (A+B) 10 sec auf der beigefügten Mischplatte vermischt und damit aktiviert werden. Zur Anwendung kam in dieser Arbeit das zwei Flaschensystem; angeboten wird das Adhäsiv auch in der Single Mix Kapsel.



Abb. 10: Dentin Bond Evo, 2-Flaschen Adhäsiv (Part A+B) mit Mischplatte und Einweg-Applikationsbürsten
© Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG

Mit der Einweg-Applikationsbürste wurde das frisch und homogen vermengte Adhäsiv auf das leicht wasserfeuchte Dentin aufgetragen und 30 Sek. intensiv eingearbeitet. Überschüsse wurden mit Papierspitzen entfernt und 10 Sek. mit einem leichten, ölfreien Luftstrom verblasen, um eine gleichmäßig dünne Schicht zu erhalten. Die Aushärtung erfolgte mit einer LED-Lampe (Smart Lite PS) für 40 Sek. mit einer Wellenlänge von 950 mW/cm^2 . Da das Dentin Bond Evo ein selbstätzendes Adhäsiv ist, entfiel ein separates Ätzen mit Phosphorsäure und das Wurzeldentin wurde in einem Schritt für den adhäsiven Verbund vorbereitet.

Die Inhaltsstoffe des Dentin Bond Evo sind in:

Part A: modifizierte Dimethacrylate, Methacrylate, Nano-Füllstoffe, Phosphorsäureester, Katalysatoren und Stabilisatoren – wobei der Füllkörpergehalt weit unter dem des Composites liegt.

Part B: Katalysatoren und Stabilisatoren in Ethanol

Nach erfolgter Konditionierung des Dentins mit dem Dentin Bond 2-Flaschen-Adhäsiv wird der Dentin Build Evo Composite mittels Applikations-Minimix Spritze auf den Wurzelstift aufgebracht. Die 2 Komponenten im Spritzenbehälter werden erst in der aufzusetzenden Mischkanüle in gleichen Anteilen direkt beim Auftragen vermengt. Die ersten 2-3 mm aus der Mischkanüle wurden verworfen.



Abb. 11: Dentin Build Evo Composite Minimix Spritzen mit Mischkanülen-Aufsatz
© Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG

Der Stift wurde mit dem Composite beschickt und unter leichtem Fingerdruck mit rotierenden Bewegungen in den Wurzelkanal eingebracht, um Lufteinschlüsse zu vermeiden und dem Überschuss zu ermöglichen, aus dem Kanal zu quellen. Die Überschüsse wurden mit Wattepellets entfernt. Die Verarbeitungszeit beträgt (bei 23°) 1,5 min ab Mischbeginn. Das Composite härtet nach 3,5 Minuten selbst aus. Durch das 40 Sekunden lange Bestrahlen mit einer LED-Polymerisationslampe (SmartLite PS) wurde der Vorgang beschleunigt.

2.5 Versuchsdurchführung

2.5.1 Lagerung/Alterung (siehe Abb. 2: Versuchs-Design)

Die Proben wurden direkt nach dem Zementieren der Stifte feucht (bei 27°) für 24 h gelagert. Danach wurden sie einer künstlichen Alterung durch Thermocycling von 5000 Zyklen unterzogen. (Siehe Abb. 12)

In den Korb des Thermocycling-Gerätes wurden die Proben je 30 Sek. in 5° kaltes und 55° warmes Wasser mit einer Abtropfzeit von je 30 Sek. dazwischen eingetaucht.

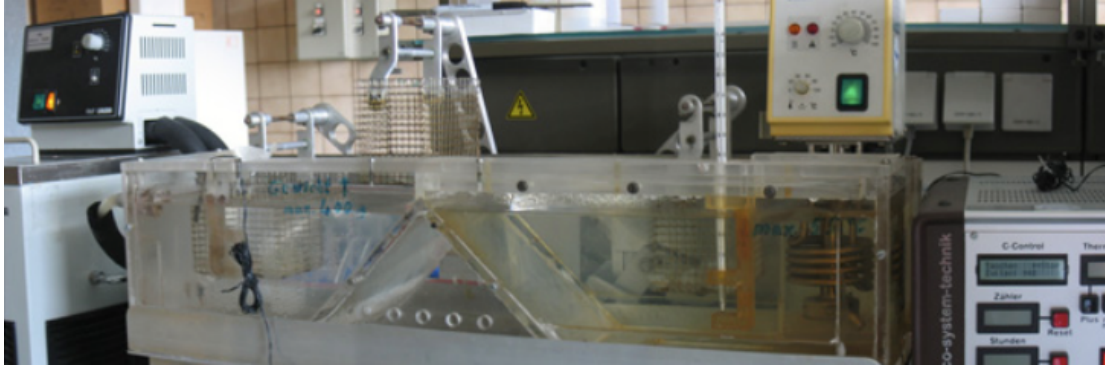


Abb. 12: Thermocycling-Gerät

2.5.2 Proben Vorbereitung für den μ -Push-Out Test

Jede Wurzel wurde von koronal in drei 2 mm ($\pm 0,3$ mm) dicke Scheiben im rechten Winkel zur Stiftlängsachse geschnitten entsprechend dem zervikalen, mittleren und apikalen Drittel des Stiftes im Wurzelkanal. Um hierbei sicher zu gehen, dass der Schnitt rechtwinklig zur Stiftachse und damit zum Wurzelkanal verläuft, wurden die Kopfteile der Stifte in eine Halterung eingespannt und mittels Trennscheibe in einem Fräsgerät (Degussa F1, Degudent Hanau) exakt geschnitten. (siehe Abb. 13 und 14)

Durch dieses Vorgehen wurde sichergestellt, dass die einzelnen Stiftscheiben beim Ausstoßen nicht im Kanal verkanten konnten und damit die Haftwerte verfälscht hätten.

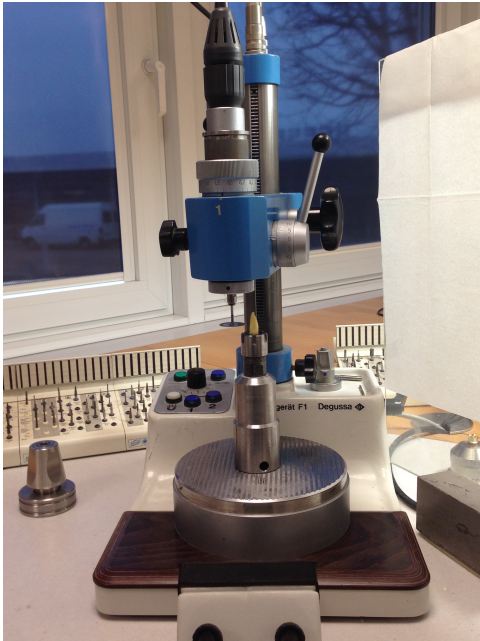
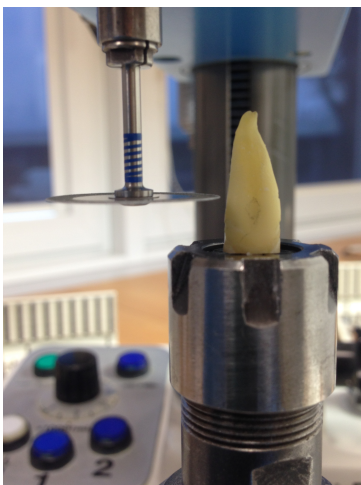
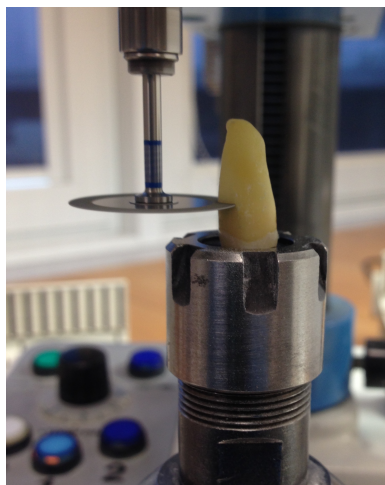


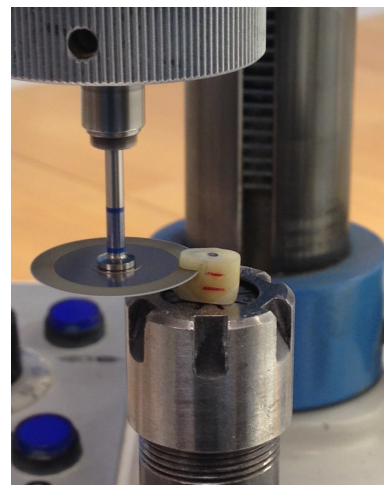
Abb. 13: Die Degussa F1-Fräseinheit mit eingespannter Probe



a.)



b.)



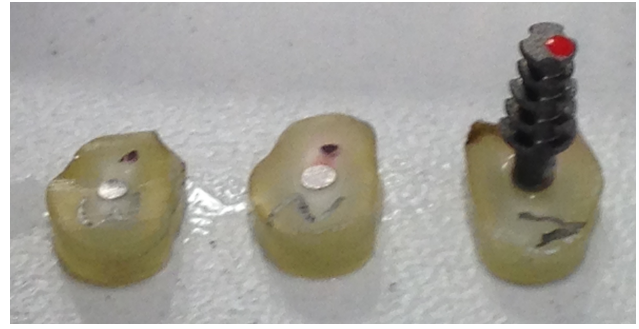
c.)

Abb. 14 a-c: Zahnwurzeln eingespannt in das Degussa F1-Fräsggerät (Schnitt rechtwinklig zur Stift-Kanal-Achse)

Die so erhaltenen Zahnscheiben wurden direkt nach dem Abtrennen entsprechend ihrer Region im Kanal nummeriert. (1=koronal; 2=Mitte; 3=apikal) (siehe Abb. 15) Zusätzlich wurde die Seite der Zahnscheibe, die nach koronal zeigte mit einem Punkt markiert, um später sicher zu stellen, dass die Ausstoßrichtung nach koronal erfolgte. Da sich die Wurzelstifte konisch nach apikal verjüngen, würde ein Ausstoßen in die falsche Richtung zu verfälschten Haftwerten führen bzw. nicht möglich sein.



a.)



b.)

Abb. 15: Zahnwurzel-Probe in 3 Scheiben, je ca. 2 mm dick

a.) Coated 6 mm Probe in 3 Scheiben b.) Uncoated 9 mm Probe in 3 Scheiben

Alle Zahnwurzeln wurden jeweils einzeln in kleinen Probendöschen leicht feucht gelagert und beschriftet, damit nach der Versuchsdurchführung ein Rückvollziehen der Gruppenzugehörigkeit gewährleistet wäre.

2.6 Ausstoßverfahren (μ -Push-Out-Test) zur Messung der Haftfestigkeit

Die Wurzelstiftsegmente wurden in den einzelnen Zahnscheiben dem μ -Ausstoßverfahren unterzogen. Hierfür wurden die Scheiben mit der koronalen Scheibenfläche nach unten auf eine Metallschablone gelegt, deren kreisförmige Ausstanzung einen leicht größeren Radius als den Radius der Wurzelstiftscheibe hat. (siehe Abb. 16 a-c)

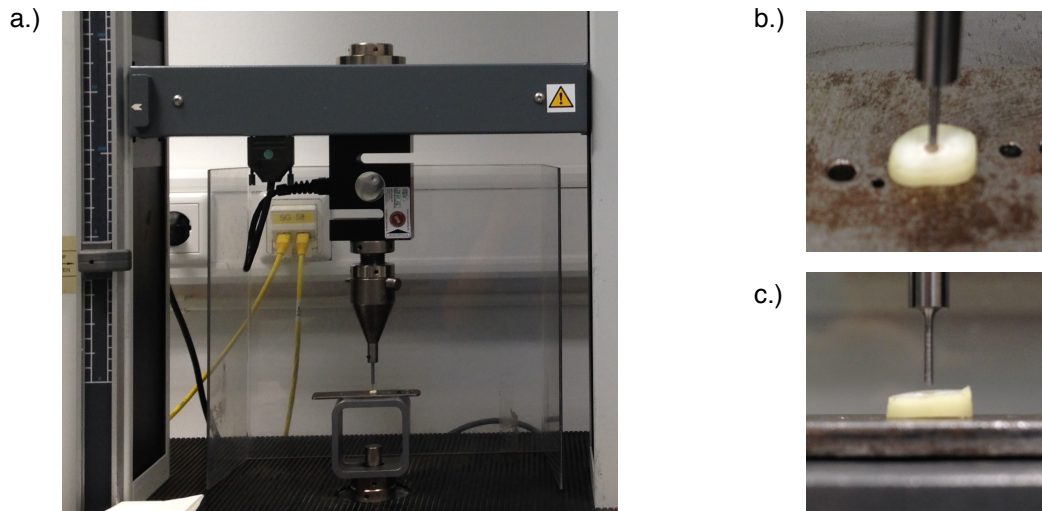


Abb. 16: μ -Ausstoßverfahren, a.) Zahnscheibe im Material-Prüfgerät der Firma Erichsen (Unimat basic, Wuppertal) b.) + c.) Zahnscheiben-Probe auf der Metallschablone mit der koronalwärts gelegenen Seite nach unten, mit Ausstoß-Nadel des oben genannten Prüfgerätes

Mit dem Material Prüfgerät der Firma Erichsen (UNIMAT Basic, Wuppertal) und einer Ausstoßnadel entsprechend kleiner als der auszustoßende Prüfkörper (Wurzelstift) wurden die einzelnen Zahnscheiben nun mit einer steigenden Belastung von 50 N/min und einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min in axialer Richtung ausgelenkt. Notiert wurde jeweils der Wert in Newton, bei dem der Stift aus dem Kanal gedrückt wurde und der Haftverbund zwischen Stift und Zahn versagte. (siehe Abb. 16 a)

Für die später erfolgenden Berechnungen der Haftfläche (Mantelfläche der Stift-Scheiben im Kanal) wurde vor dem Ausstoßversuch die exakte Dicke der Scheiben in μm mittels digitaler Bügelmessschraube (Typ Micromar, Firma Mahr, Göttingen) ermittelt. Der Wert wurde so notiert, dass er der jeweiligen Probe zuzuordnen war. (siehe Abb. 17)

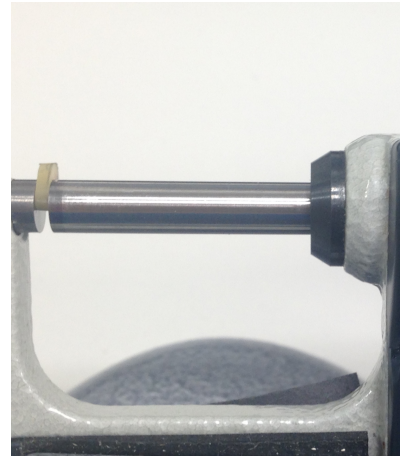
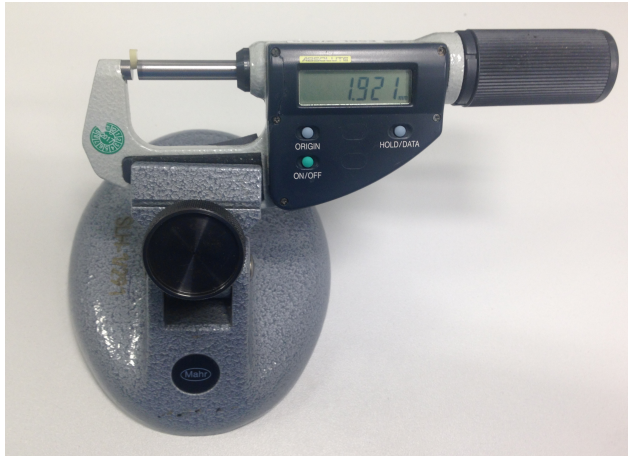


Abb. 17: Zahnprobe eingespannt in der Bügelmessschraube (Micromar, Firma Mahr Göttingen)

2.6.1 Bestimmung der Bruchmodi

Die Bruchmodalitäten der Grenzflächen mit den Composite-Zementen wurden nach Versagen des Haftverbundes jeweils an der Zahnscheibe und an der Wurzelstiftscheibe unter dem Auflicht-Mikroskop inspiziert (Zeiss, Axiophot, Oberkochen, Baden-Württemberg) (Abb. 18)

Die Brucharten wurden entsprechend folgender Einteilung bewertet (Tab. 2):

Modalitäten des Versagens des Haftverbundes	Bruchverlauf
Bruchart 1: Adhäsivbruch	Bruchverlauf zwischen Dentin und Adhäsiv/ Composite
Bruchart 2: Adhäsivbruch	Bruchverlauf zwischen Stift und Composite
Bruchart 3: Kohäsivbruch	Bruchverlauf innerhalb der Composite-Schicht

Tabelle 2: Einteilung der Bruchmodi

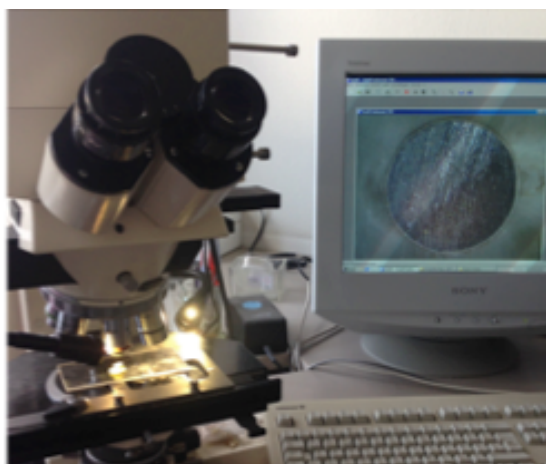


Abb. 18 Bestimmung der Bruchmodi im digitalen Auflichtmikroskop

2.6.2 Berechnung der Haftfestigkeit aus Kraft und Segmentfläche

Die beim Push-Out-Test gemessenen Werte (N) beschrieben die Ausstoß-Kraft, bei der ein Versagen des Verbundes zwischen Dentinscheibe und Wurzelstift-Scheibe auftrat.

Um die Werte vergleichen zu können, müssen alle Werte auf die Segmentoberfläche bezogen, d.h. in die Haftfestigkeit in N/ mm² umgerechnet werden.

Die exakte Mantelfläche der jeweiligen Stiftscheiben wurde nach der folgenden Formel berechnet:

$$\pi(R+r) [h^2+(R-r)^2]^{0,5}$$

R = Radius der nach zervikal gerichteten Seite der Scheibe des Wurzelstiftes (mm)

r = Radius der nach apikal gerichteten Seite der Scheibe des Wurzelstiftes (mm)

h = Dicke der Wurzelstift/Zahn Scheibe (mm)

Der Durchmesser wurde jeweils apikalwärts und koronalwärts des Stift-Konus mit dem digitalen Auflicht-Mikroskop (Zeiss, Axiophot) und dem dazugehörigen Messprogramm am PC unter 600-facher Vergrößerung (siehe Abb.18) gemessen und der Radius berechnet. Für jede Probe wurden die Variablen R,r und h eingetragen und einzeln berechnet. Abb. 19 illustriert die berechneten Mantelflächen. Die umgerechneten Haftfestigkeiten wurden tabellarisch im EXCEL-Programm dokumentiert.

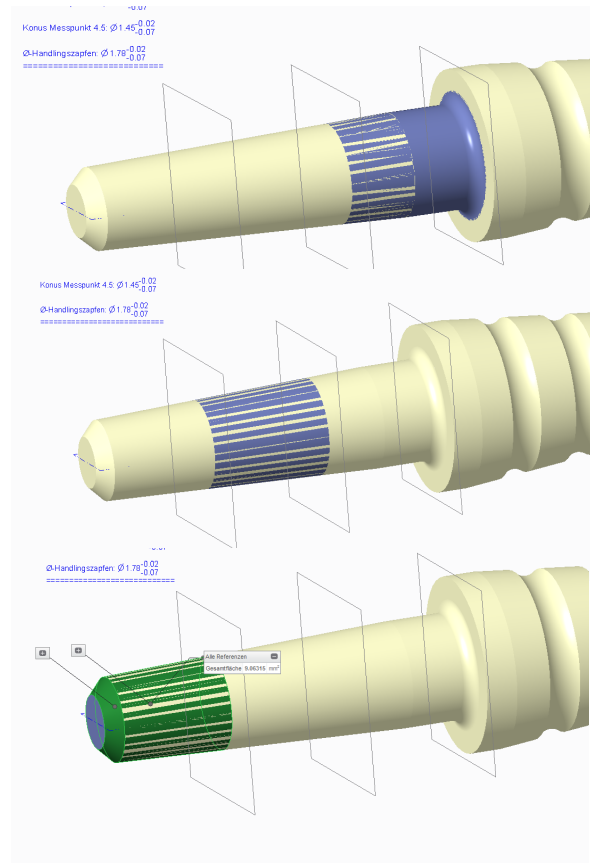


Abb. 19: Schemazeichnung für die 6 mm Coated Stifte zur Verdeutlichung der berechneten Mantelflächen der einzelnen Stiftscheiben (anhand der Konstruktionszeichnungen des Herstellers).

2.6.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit SPSS PC-Programm (Version 24). Statistisch signifikante Differenzen wurden mit dem ein- und vierfaktoriellen ANOVA-Verfahren und der Bonferroni - Korrektur auf einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ berechnet.

3. ERGEBNISSE

3.1 Bruchmodalitäten:

Die Bruchmodalitäten sind für alle Testgruppen in Abbildung 20 dargestellt.

Die Titan und Dentin X Coated Kopfstifte wiesen einen deutlich geringeren Anteil an adhäsiven Frakturen zwischen Stift und Zement auf als die unbeschichteten 6 mm Vergleichsstifte oder die unbeschichteten 9 mm Stifte aus den jeweiligen Materialien. (Abb. 21 a+c und 22 e+f – Das Composite verbleibt hauptsächlich auf dem Coating)

Die unbeschichteten Prototypen der 6 mm Kopfstifte aus Titan und FRC zeigten die größte Tendenz zu einem Versagen des Haftverbundes entlang der Stift-Zement-Grenze. (Abb. 22 c+d - Composite ist mehrheitlich an der Wurzeldentin Wand verblieben) Bei den 9 mm Stifte verhielten sich die Frakturen gemischt (Abb. 22 a+b) und es traten sowohl kohäsive als auch adhäsive Frakturen auf. Am meisten wurden Frakturen zwischen Stift und Adhäsiv gefunden.

Für die beiden verwendeten Composite-Zementen Rely X Unicem und Dentin Build Evo wurden keine Unterschiede in Hinsicht auf das Bruchverhalten beobachtet. Innerhalb der jeweiligen Zementgruppen variierten die Bruchmodi stärker zwischen den verwendeten Stifttypen als zwischen den Materialien.

(siehe Abb. 20-22)

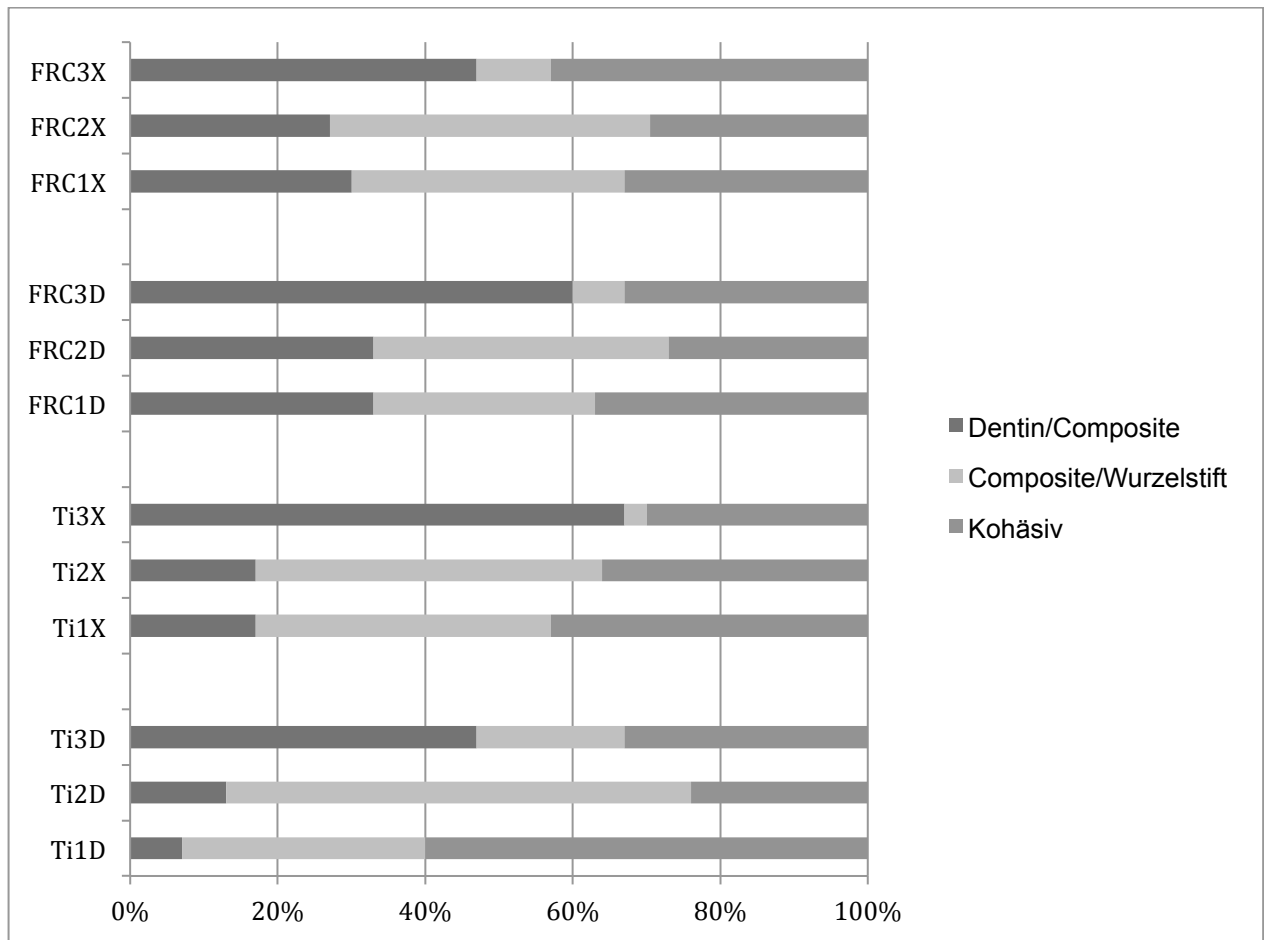


Abb. 20: Ermittlung der Bruchmodalitäten zwischen den Grenzflächen.

Die Abkürzungen bezeichnen das Stiftmaterial Titan und FRC, die Hauptgruppen

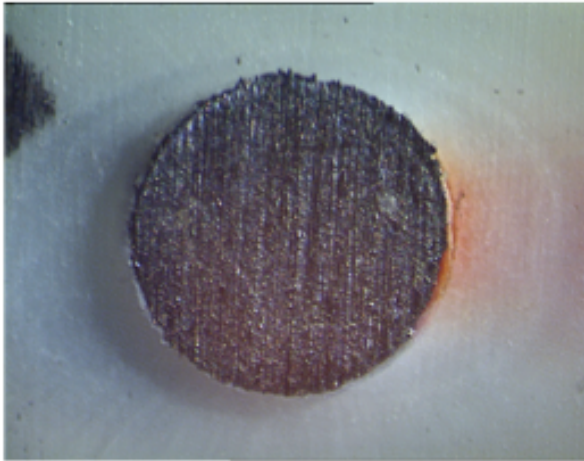
1= 9 mm unbeschichtet;

2= 6 mm Unbeschichtet (Prototyp);

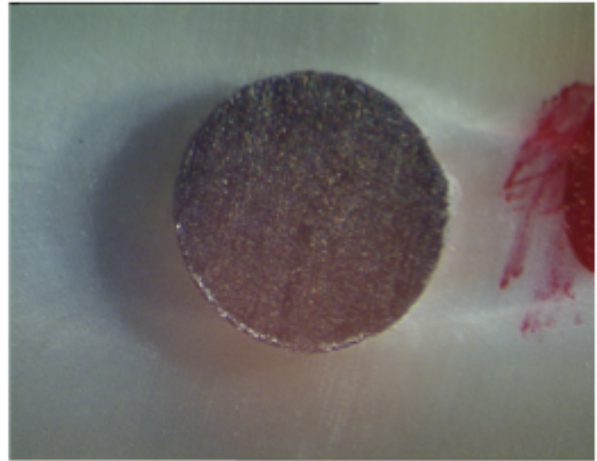
3= 6 mm Beschichtet (Coated)

und das Composite Dentin Build Evo/RelyX Unicem)

a.)

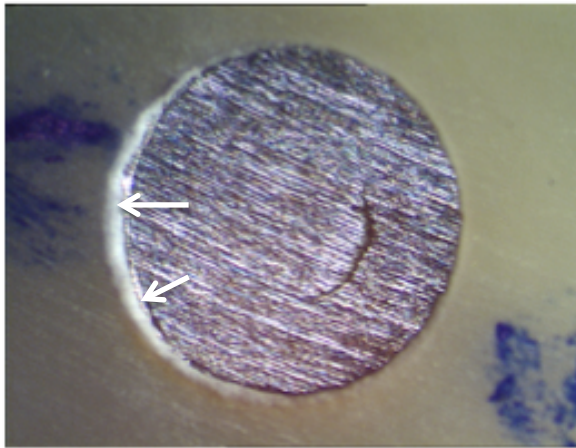


Gruppe I: Titan 9 mm Uncoated
(Zahn 6, Scheibe 2 oben, RX)

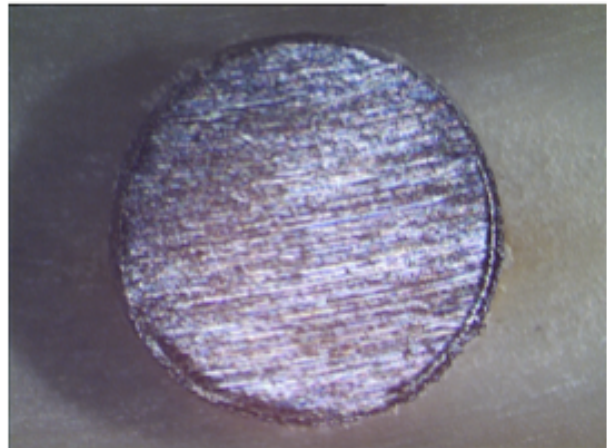


Gruppe I: Titan 9 mm Uncoated
(Zahn 8, Scheibe 3 oben, DB)

b.)

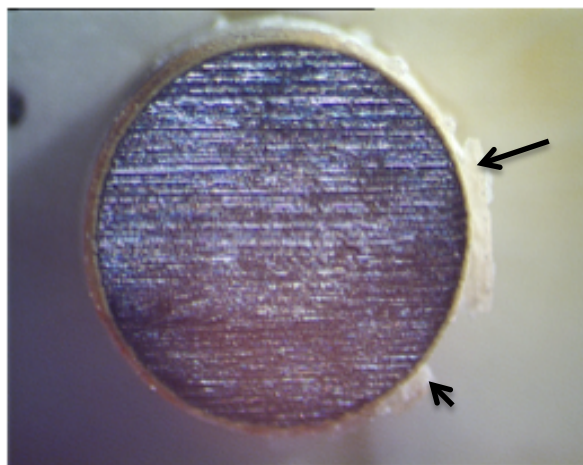


Gruppe II: Titan 6 mm Uncoated
(Zahn 10, Scheibe 2 unten, RX)

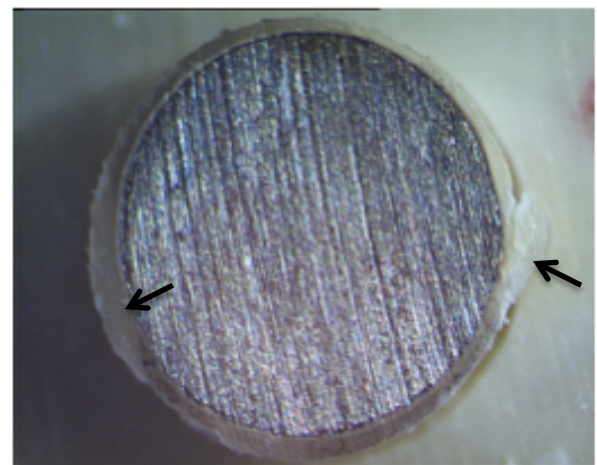


Gruppe II: Titan 6 mm Uncoated
(Zahn 4, Scheibe 2 oben, DB)

c.)

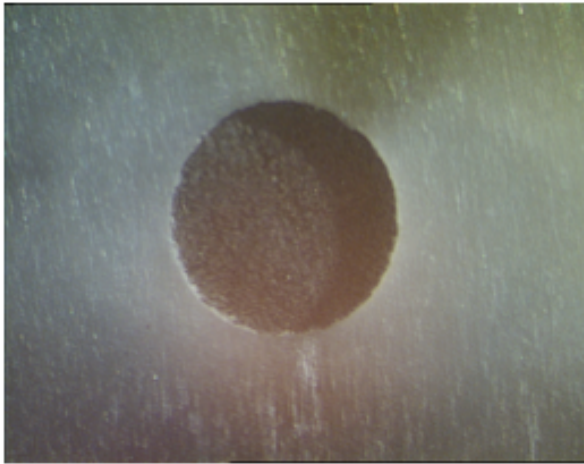


Gruppe III: Titan 6 mm Coated
(Zahn 2, Scheibe 2 oben, RX)

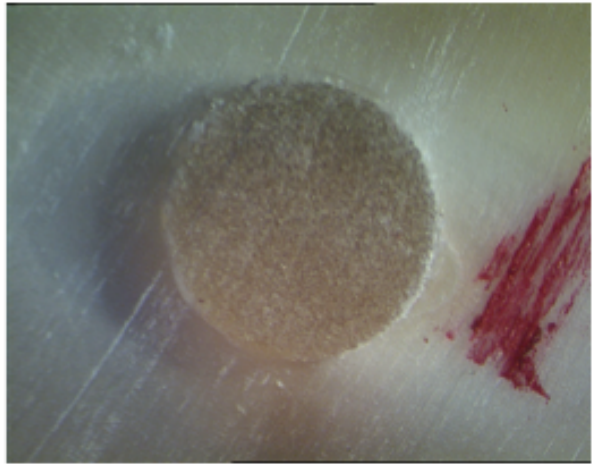


Gruppe III: Titan 6 mm Coated
(Zahn 9, Scheibe 2 oben, DB)

a.)

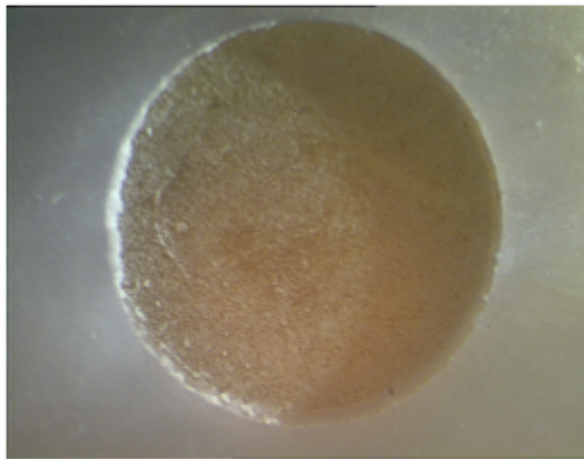


Gruppe I: FRC 9 mm Uncoated
(Zahn 1, Scheibe 3 unten, DB)

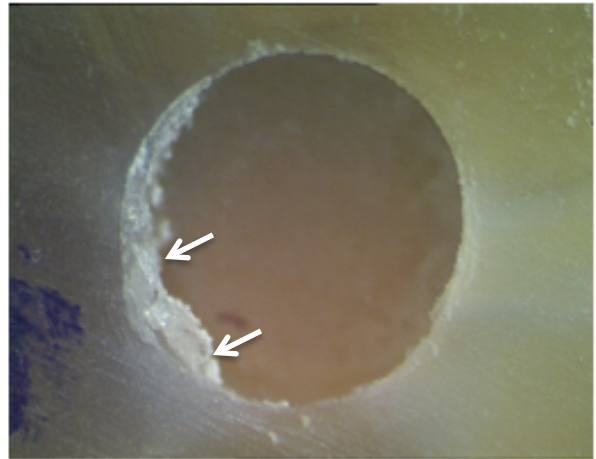


Gruppe I: FRC 9 mm Uncoated
(Zahn 1, Scheibe 3 oben, DB)

b.)

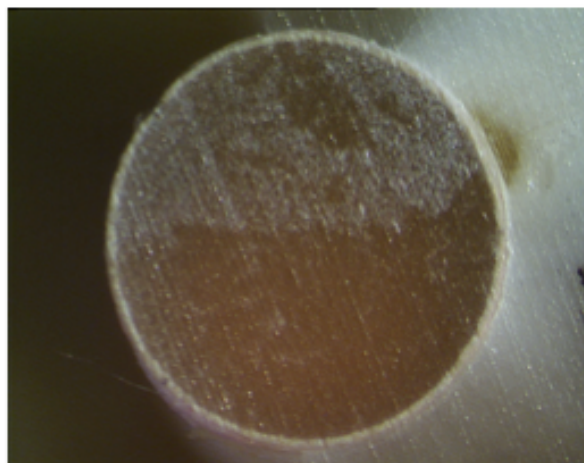


Gruppe II: FRC 6 mm Uncoated
(Zahn 6, Scheibe 1 unten, RX)

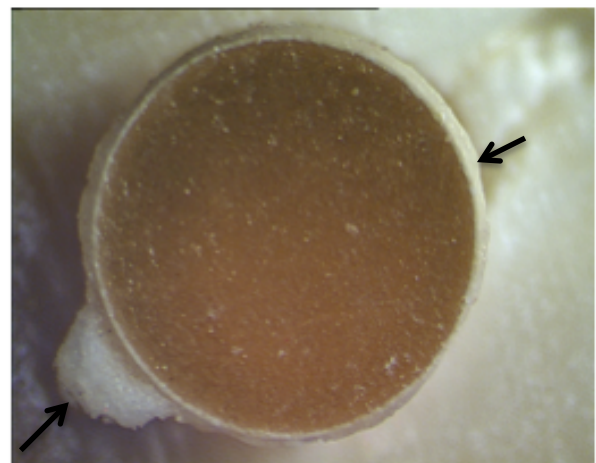


Gruppe II: FRC 6 mm Uncoated
(Zahn 7, Scheibe 3 unten, DB)

c.)



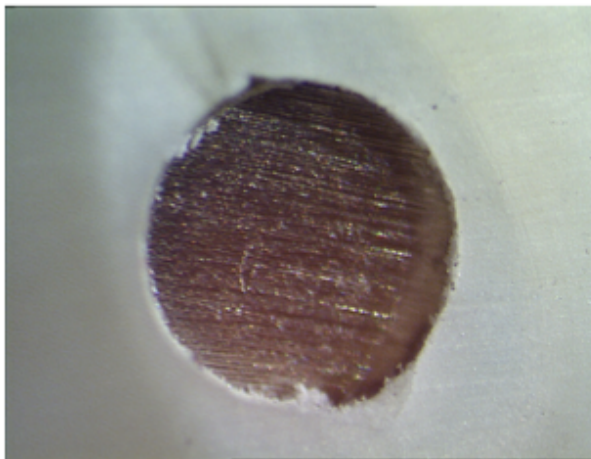
Gruppe III: FRC 6 mm Coated
(Zahn 10, Scheibe 3 oben, RX)



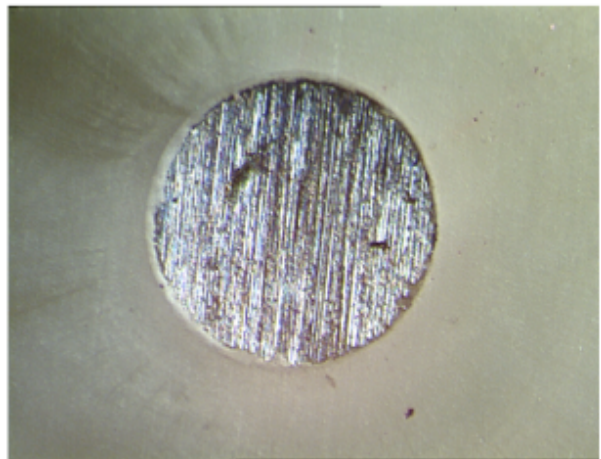
Gruppe III: FRC 6 mm Coated
(Zahn 5, Scheibe 2 oben, DB)

Abb. 21: Die Beschichteten Stifte weisen deutlich mehr Composite-Reste am Mantel auf c.) Titan + FRC Scheiben Coated (schwarze Pfeile), während bei den nicht beschichteten Stiften Composite am Dentin verbleibt a.) Titan + FRC Scheiben 9 mm uncoated + b.) Titan und FRC Scheiben 6 mm uncoated (weiße Pfeile)

a.)

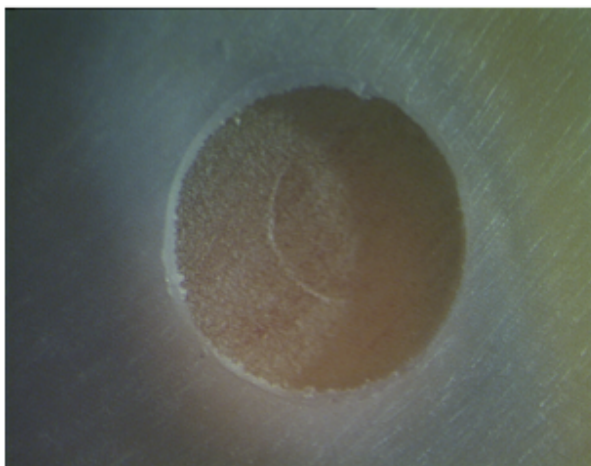


Gruppe I: Titan 9 mm uncoated
(Zahn 3, Scheibe 1 unten, RX)

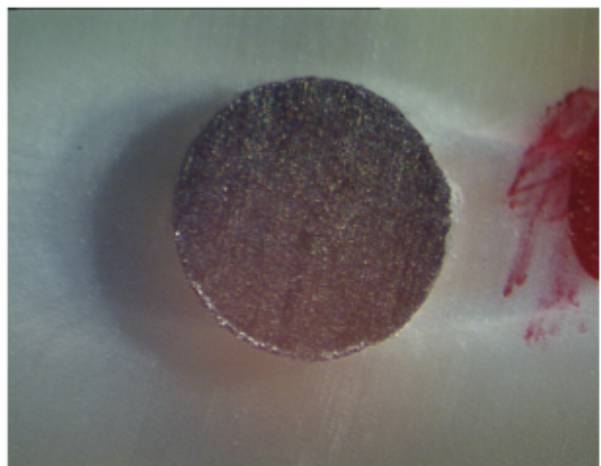


Gruppe I: Titan 9 mm uncoated
(Zahn 2, Scheibe 2 unten, RX)

b.)

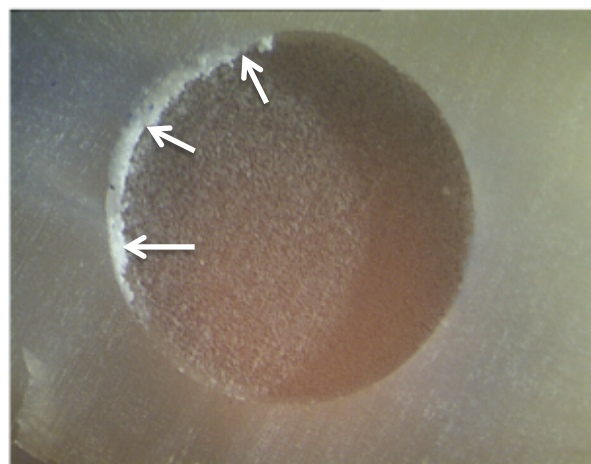


Gruppe I: FRC 9 mm uncoated
(Zahn 8, Scheibe 1 unten, DB)

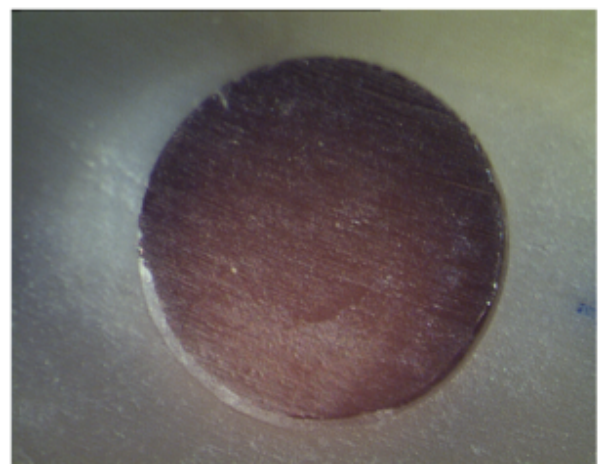


Gruppe I: Titan 9 mm uncoated
(Zahn 8, Scheibe 3 oben, DB)

c.)

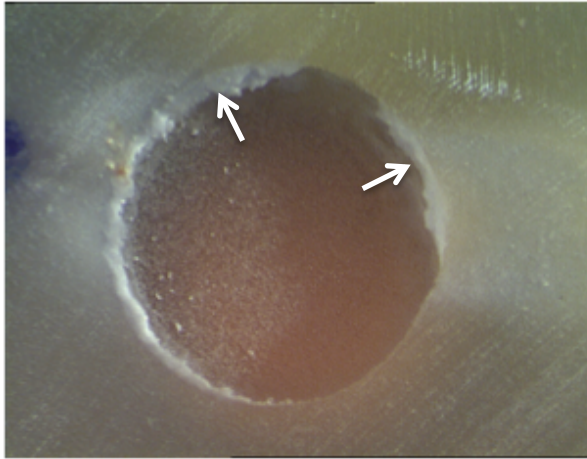


Gruppe II: FRC 6 mm uncoated
(Zahn 5, Scheibe 2 unten, DB)

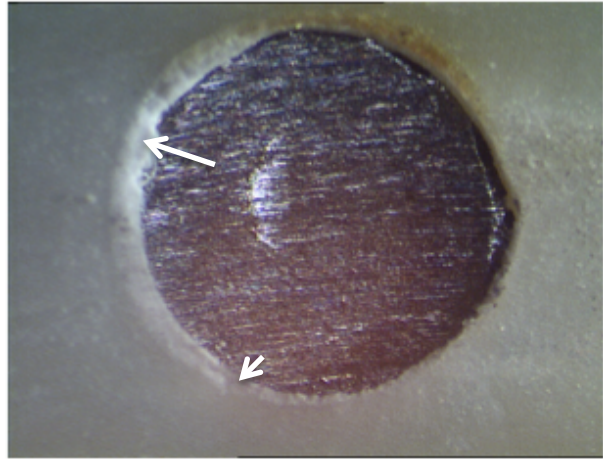


Gruppe II: Titan 6 mm uncoated
(Zahn 9, Scheibe 2 unten, DB)

d.)

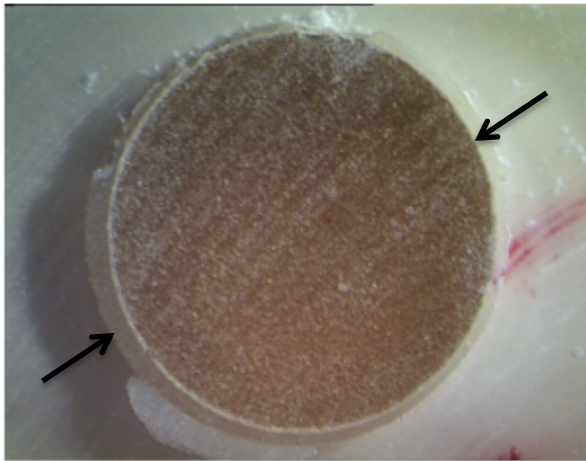


Gruppe II: FRC 6 mm uncoated
(Zahn 9, Scheibe 3 unten, RX)

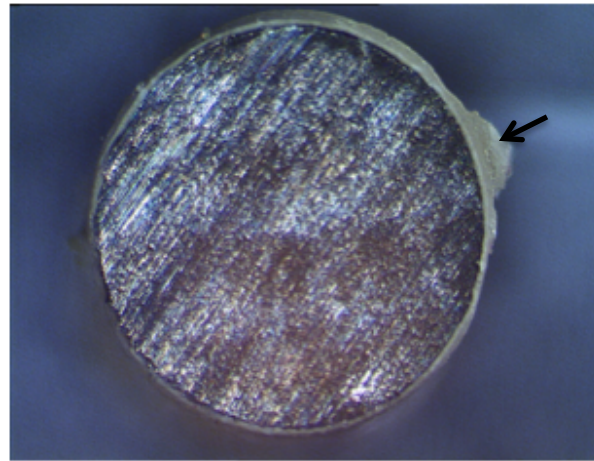


Gruppe II: Titan 6 mm Prototyp
(Zahn 5, Scheibe 2 unten, RX)

e.)

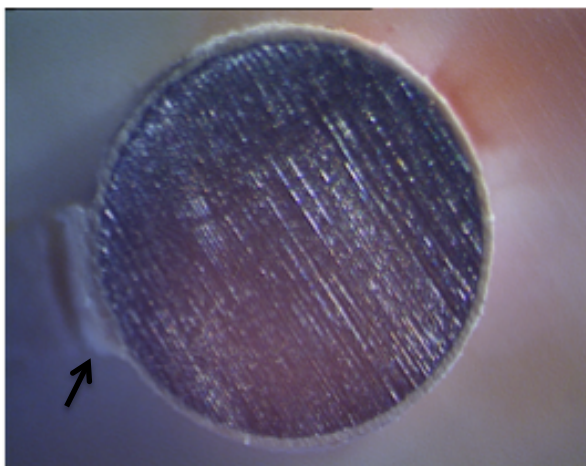


Gruppe III: FRC 6 mm Coated
(Zahn 9, Scheibe 2 oben, DB)

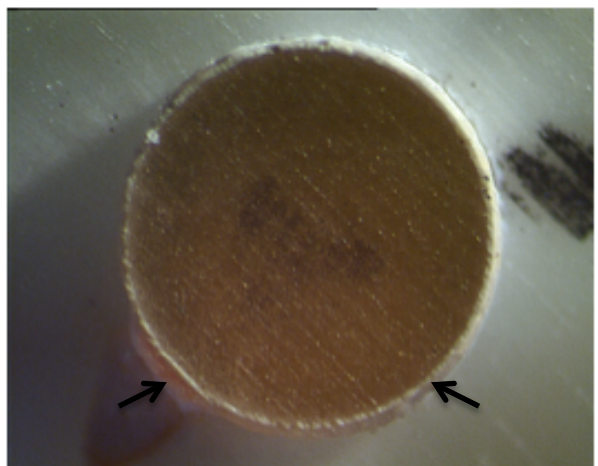


Gruppe III: Titan 6 mm Coated
(Zahn 4, Scheibe 2 oben, DB)

f.)



Gruppe III: Titan 6 mm Coated
(Zahn 7, Scheibe 2 oben RX)



Gruppe III: FRC 6 mm Coated
(Zahn 1, Scheibe 3 oben RX)

Abb. 22: Randomisierte Probenauswahl:

Weißer Pfeile: Composite-Verbleib am Wurzelndentin; Schwarze Pfeile: Composite am Stift

a.) +b.) Konventionelle 9 mm Stifte (I)

b.) +d.) Prototyp 6 mm unbeschichtete Stifte (II)

e.) +f.) Beschichtete 6 mm Wurzelstifte (III)

3.2. μ -Haftfestigkeiten in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial und Stiftmaterial

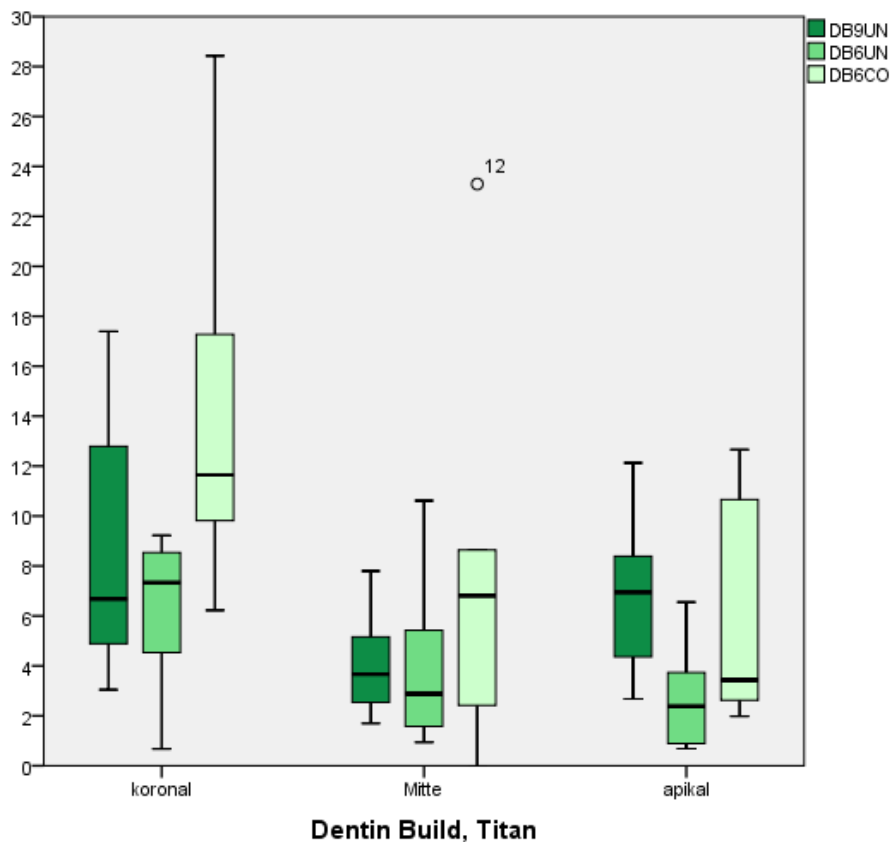


Abb. 23: Haftfestigkeiten in MPa für die 3 Stifttypen (I-III) aus Titan eingesetzt mit Dentin Build Evo (DB)

3.2.1 Titan – Wurzelstifte mit Dentin Build Evo eingesetzt:

Das Befestigungs-Composite Dentin Build Evo erreichte mit den beschichteten Titan-Wurzelstiften einen maximalen durchschnittlichen μ -Haftfestigkeitswert von rund 13,7 MPa ($\pm$ 7,9 MPa) im koronalen Wurzelanteil. Auch im mittleren Drittel waren die μ -Haftfestigkeitswerte für den beschichteten Titan-Wurzelstift mit 7,8 MPa ($\pm$ 6,3 MPa) höher als die Werte der übrigen Stifttypen.

Im apikalen Drittel erzielten die unbeschichteten 9 mm Titan-Stifte mit rund 5,7 MPa ($\pm$ 3,4 MPa) die höchsten Werte, sowie die beschichteten 6 mm Stifte gleichermaßen. Die durchschnittlichen Haftfestigkeiten reduzieren sich für die 9 mm weniger als die Werte für die 6 mm Stifte von koronal nach apikal. Es wurden keine Signifikanzen bzgl. der Haftfestigkeiten zwischen den Parametern Stiftart und Segment gefunden ($p > 0,05$).

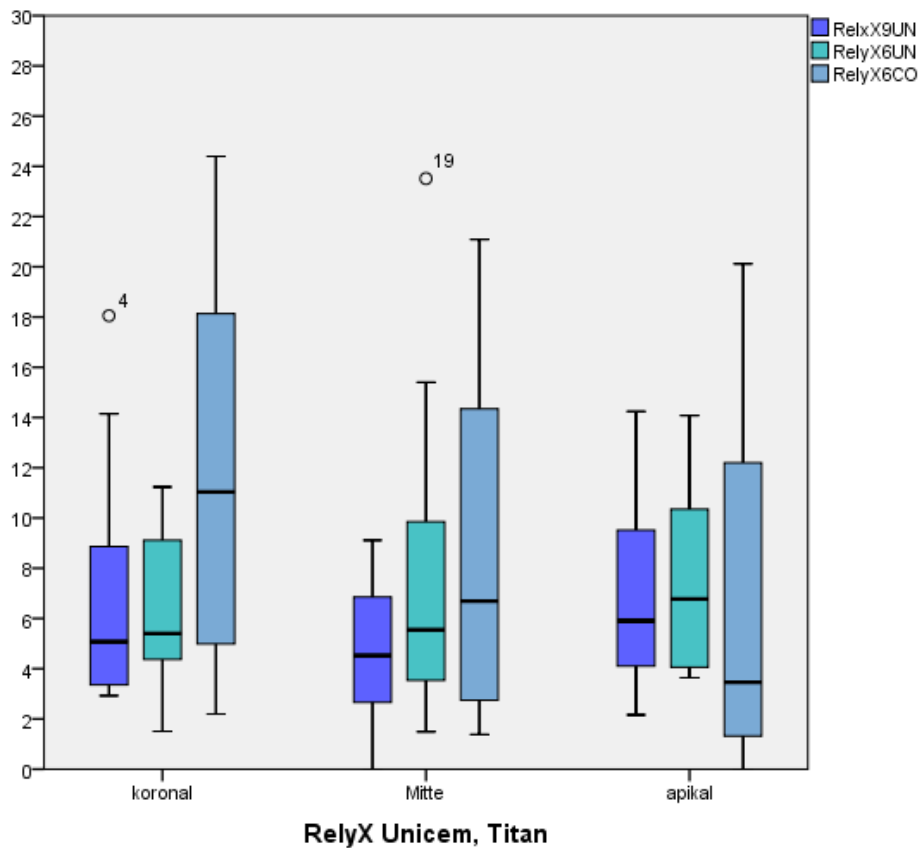


Abb. 24: Haftfestigkeiten in MPa für die 3 Stifttypen (I-III) aus Titan eingesetzt mit Rely X Unicem (RX)

3.2.2 Titan – Wurzelstifte mit Rely X Unicem eingesetzt:

Die beschichteten Titan-Wurzelstifte erreichten mit Rely X Unicem die durchschnittlich besten Haftfestigkeitswerte von 11,0 MPa ($\pm 6,4$ MPa) im koronalen Wurzeldrittel.

Im mittleren Drittel lagen die Werte für die beschichteten Stifte mit 9,1 MPa ($\pm 7,5$ MPa) im Schnitt deutlich über denen der unbeschichteten Wurzelstifte.

Im apikalen Drittel erreichten die beschichteten Titan-Wurzelstifte, die mit Rely X Unicem eingesetzt wurden Haftfestigkeitswerte von 8 MPa ($\pm 6,8$ MPa). Die Ergebnisse variierten für die Stifttypen der Hauptgruppen I-III nicht wesentlich zwischen den Regionen, während die der Hauptgruppen III die 6 mm beschichteten Stifte nach apikalwärts tendentiell reduzierten. Auch hier ergaben sich keine Signifikanzen bzgl. der Haftfestigkeitswerte zwischen den getesteten 3 Stiftarten und der Region im Wurzelkanal ($p > 0,05$).

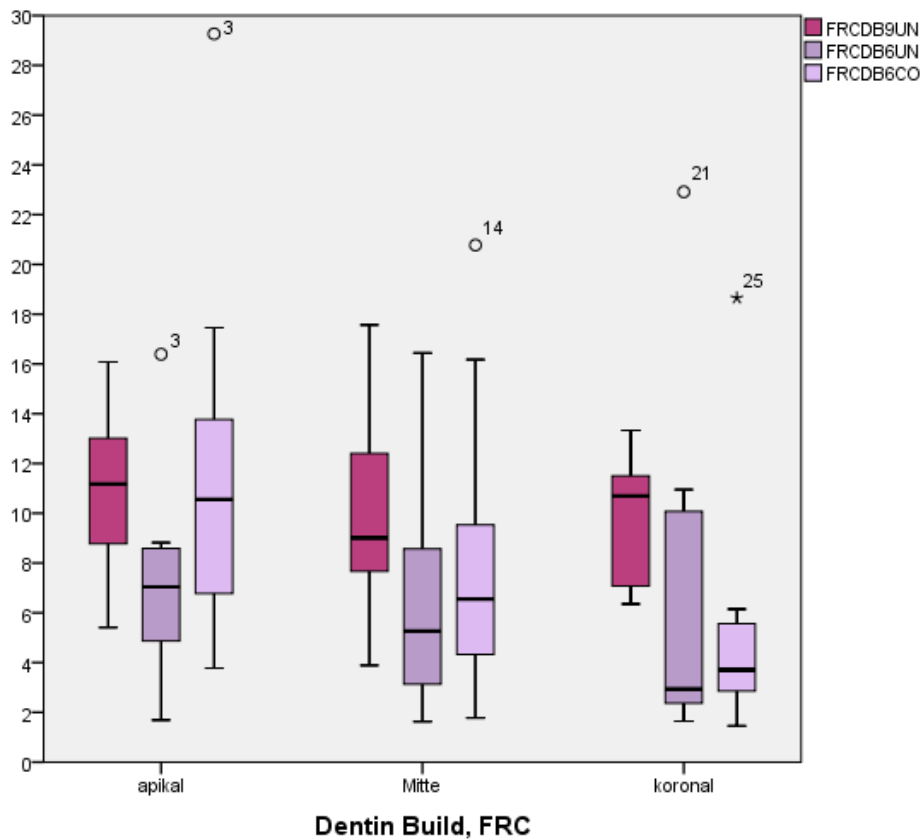


Abb. 25: Haftfestigkeiten in MPa für die 3 Stifttypen (I-III) aus FRC eingesetzt mit Dentin Build Evo (DB)

3.2.3 FRC – Wurzelstifte mit Dentin Build Evo eingesetzt:

Durchschnittlich erreichten die mit DB gesetzten beschichteten FRC-Wurzelstifte mit 11,8 MPa ($\pm 7,5$ MPa) sowie die unbeschichteten 9 mm Stifte mit 10,8 MPa ($\pm 3,1$ MPa) die höchsten Haftfestigkeitswerte.

Im mittleren Drittel waren die beschichteten Stifte mit einem durchschnittlichen Haftfestigkeitswert von 9,2 MPa ($\pm 5,7$ MPa) überlegen.

Im apikalen Drittel der Wurzel zeigten die unbeschichteten, konventionellen Stifte mit 8,9 MPa ($\pm 3,4$ MPa) die besten Haftfestigkeiten.

Die Haftfestigkeiten der 9 mm Stifte variierten nicht zwischen den Regionen, während die Werte für die 6 mm Stifte von koronal nach apikal sanken. Zwischen den Gruppen bestehen keine statistisch signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$).

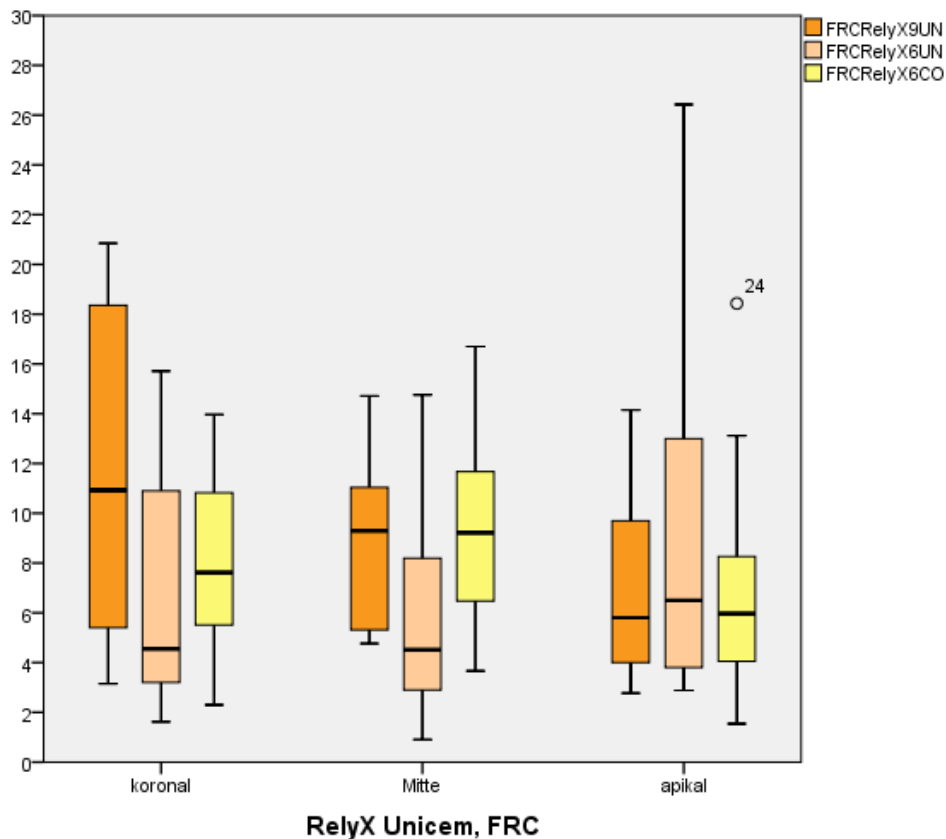


Abb. 26: Haftfestigkeiten in MPa für die 3 Stifttypen (I-III) aus FRC eingesetzt mit Rely X Unicem (RX)

3.2.4 FRC – Wurzelstifte mit Rely X Unicem eingesetzt:

Die höchsten Haftfestigkeiten wurden mit 10 MPa ($\pm 6,0$ MPa) für die unbeschichteten, konventionellen 9 mm Stiften im koronalen Anteil gefunden.

Im mittleren Drittel lagen die durchschnittlichen Haftfestigkeitswerte für die beschichteten und die unbeschichteten FRC-Stifte sehr nah beieinander.

Die Haftfestigkeiten der 6 mm FRC-Stifte im apikalen Bereich erreichten mit 7,1 MPa ($\pm 5,2$) bei den beschichteten und mit 7,2 MPa ($\pm 4,2$ MPa) bei den unbeschichteten Stiften die höchsten Werte.

Bei den 9 mm unbeschichteten Stiften nahmen die Haftfestigkeitswerte von koronal nach apikal ab, während die Werte für die 6 mm FRC-Stifte zwischen den Regionen stagnierten. Keine statistisch signifikanten Unterschiede konnten zwischen den Gruppen gefunden werden ($p > 0,05$).

3.3. μ -Haftfestigkeit bezüglich Beschichtung

Der 6 mm Titan ER Post X coated mit Beschichtung zeigte jeweils in den drei Regionen bessere Haftfestigkeitswerte als es die vergleichbaren, unbeschichteten 6 mm Titan Stifte in den jeweiligen Regionen besaßen. Diese reduzierten sich in apikaler Richtung.

Der Effekt schien unabhängig vom Befestigungsmaterial zu sein, da beide Composite Rely X Unicem sowie Dentin Build Evo dieses Verhalten zeigten.

Bei den FRC- Wurzelstiften erreichten die beschichteten kurzen Stifte jeweils tendenziell höhere Haftfestigkeitswerte als mit den beiden Compositen. Diese variierten allerdings wenig zwischen den Regionen.

3.4. μ -Haftfestigkeit bezüglich Wurzelsegment

Allen Stiften war gemeinsam, dass die Haftfestigkeitswerte tendenziell von koronal nach apikal hin abnahmen, außer in den Gruppen 6 mm unbeschichtete Titanstifte mit Rely X und 6 mm unbeschichtete FRC-Stifte sowie 6 mm beschichtete FRC-Stifte beide mit rely X Unicem inseriert.

Mit Rely X Unicem wurden homogenere Werte bezüglich der verschiedenen lokalisierten Regionen des Wurzeldentins erzielt, die sich zudem zwischen 5 bis 10 MPa durchschnittlich bewegten. Dagegen reduzierten sich die Haftfestigkeitswerte mit Dentin Build Evo immer von koronal nach apikal, erzielten aber höhere Werte koronal (6-13 MPa). Diese reduzierten sich um durchschnittlich ein Drittel bis zur Hälfte in die apikale Region mit den jeweiligen Stifftyp (außer bei 9 mm Titan Post).

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Einfluss der Parameter:

Stiftmaterial, Befestigungsmaterial, Stiftart und Segment

Faktoren	Summe der Flächen	p-Wert
Stiftmaterial	84,972	0,0842
Composite	2,453	0,7687
Stiftart	404,032	0,0009 S
Segment	294,578	0,006 S
Stiftmaterial * Composite	22,841	0,3698
Stiftmaterial * Stiftart	138,318	0,0886
Stiftmaterial * Segment	29,775	0,5917
Composite * Stiftart	113,941	0,1355
Composite * Segment	111,118	0,1423
Stiftart * Segment	206,66	0,1239
Stiftmaterial * Composite * Stiftart	26,555	0,6262
Stiftmaterial * Composite * Segment	26,529	0,6265
Stiftmaterial * Stiftart * Segment	219,915	0,1034
Composite * Stiftart * Segment	146,43	0,2728
Stiftmaterial * Composite * Stiftart * Segment	20,537	0,948

Tab. 2: Signifikanzen der Einflüsse der einzelnen Parameter auf der Basis einer 4-faktoriellen ANOVA ($p < 0,05$)

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Prüfung auf statistisch signifikante Differenzen bei der Kombination der einzelnen Parameter mittels der multifaktoriellen ANOVA angegeben. Dabei wurden für die Parameter Stiftart und Segment signifikante Differenzen gefunden ($p < 0,05$). Allerdings bezogen sich diese bei Analyse der einzelnen Gruppen gegeneinander zwischen Gruppen die nicht sinnvoll verglichen werden sollten.

Zunächst erfolgte ein Vergleich der 3 Hauptgruppen bezüglich ihrer Haftfestigkeiten untereinander. Anschließend wurde mittels einfaktorieller ANOVA ein Vergleich der Befestigungsmaterialien und des Stiftmaterials derselben Hauptgruppe innerhalb der Gruppe mit demselben Stiftmaterial und derselben Stiftart vorgenommen.

Abschließend wurden die Haftfestigkeiten bezüglich der unterschiedlichen Wurzelsegmente untereinander verglichen.

3.5.2 Ergebnisse Mikrohaftfestigkeiten (MPa)

In den Tabellen 3-6 sind die Durchschnittswerte und Standardabweichungen bzgl. der Haftfestigkeiten in MPa der unterschiedlichen Stiftscheiben vom koronalen zum apikalen Segment aufgelistet.

Titan-Stifte

Tabelle 3

Mikro-Haftfestigkeiten in MPa der **Titan**-Wurzelstifte der 3 Hauptgruppen bzgl. ihrer Region im Wurzelkanal mit **Dentin Build Evo**

Hauptgruppe	I	II	III
Wurzelsegment	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)
koronal	8,68 ($\pm$ 5,07)	6,36 ($\pm$ 2,83)	13,65 ($\pm$ 7,92)
Mitte	4,02 ($\pm$ 1,96)	3,72 ($\pm$ 2,89)	7,75 ($\pm$ 6,3)
Apikal	5,7 ($\pm$ 3,4)	2,68 ($\pm$ 1,92)	5,51 ($\pm$ 4,36)

Tabelle 4

Mikro-Haftfestigkeiten in MPa der **Titan**-Wurzelstifte der 3 Hauptgruppen bzgl. ihrer Region im Wurzelkanal mit **Rely X Unicem**

Hauptgruppe	I	II	III
Wurzelsegment	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)
koronal	7,7 ($\pm$ 5,59)	5,93 ($\pm$ 3,13)	10,99 ($\pm$ 6,38)
Mitte	4,8 ($\pm$ 2,44)	4,88 ($\pm$ 2,86)	9,08 ($\pm$ 7,5)
Apikal	6,9 ($\pm$ 4,33)	7,2 ($\pm$ 3,72)	7,99 ($\pm$ 6,84)

FRC-Stifte (Glasfaserverstärkter Composite)

Tabelle 5

Mikro-Haftfestigkeiten in MPa der **FRC**-Wurzelstifte der 3 Hauptgruppen bzgl. ihrer Region im Wurzelkanal mit **Dentin Build Evo**

Hauptgruppe	I	II	III
Wurzelsegment	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)
koronal	10,77 ($\pm$ 3,12)	7,31 ($\pm$ 3,85)	11,75 ($\pm$ 7,45)
Mitte	8,84 ($\pm$ 2,91)	6,25 ($\pm$ 4,42)	9,20 ($\pm$ 5,65)
Apikal	8,86 ($\pm$ 3,44)	4,53 ($\pm$ 3,73)	6,39 ($\pm$ 5,85)

Table 6

Mikro-Haftfestigkeiten in MPa der **FRC**-Wurzelstifte der 3 Hauptgruppen bzgl. ihrer Region im Wurzelkanal mit **Rely X Unicem**

Hauptgruppe	I	II	III
Wurzelsegment	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)	Mean ($\pm$ SD)
koronal	10,01 ($\pm$ 6,02)	6,94 ($\pm$ 4,74)	8,62 ($\pm$ 3,44)
Mitte	9,03 ($\pm$ 3,37)	5,68 ($\pm$ 4,08)	9,2 ($\pm$ 3,97)
Apikal	6,85 ($\pm$ 3,64)	7,24 ($\pm$ 4,18)	7,12 ($\pm$ 5,19)

4. DISKUSSION

Eine große Herausforderung in der Zahnmedizin ist es nach wie vor, optimale Haftfestigkeitswerte bei der Befestigung dentaler Restaurationen, wie in diesem Fall bei Wurzelstiften, zu erlangen. (De Munck et al. 2005) Das Ziel ist, langfristig eine ausreichende Haftfestigkeit bei größtmöglicher Erhaltung der Zahnhartsubstanz sowie der Vermeidung von einer zusätzlichen Schwächung der Wurzel zu erreichen. (Wandscher et al 2014)

Der Verbund zwischen Wurzelstiften und dem Befestigungsmaterial zum Wurzeldentin ist durch den Einfluss der Vorbehandlung, wie frühere Füllungen, Resten von Sealer, Eugenol- Einfluss und variierende Qualität des Wurzeldentins sehr techniksensitiv. (Ferreira et al 2015, Scotti et al 2014, Schmager et al 2003, Bohrer et al 2018)

Die getesteten Materialien in dieser Studie waren industriell vorbeschichtete Wurzelstifte aus Titan und aus glasfaserverstärktem Composite (FRC) des Erlanger Wurzelstift-Systems. Sie sind mit 6 mm kürzer als die herkömmlichen Stifte des Systems, weshalb es den Effekt der reduzierten Länge zu untersuchen galt. Die Beschichtung erfolgte nach dem tribochemischen Verfahren. Hierbei handelt es sich um eine Silanisierung mit anschließender Silikatisierung der Stiftoberfläche und einer finalen Ummantelung durch eine Polymerschicht. Diese soll als Haftvermittler zwischen dem Stiftmaterial und den Carboxyl-Gruppen des Befestigungscomposites fungieren. (Radthke et al 2014, Valandro et al 2006, Magni et al 2007, Goracci et al 2005)

Die tribochemische (TBC) Beschichtung hatte sich bereits in vorangegangenen Studien für eine Optimierung des Haftverbundes bewährt. (Proano et al 1998, Schmager et al 2003, Schmager et al 2012a, Edelhoff et al 2000, Schönbrodt et al 2003, Sen et al 2005,)

Ziel ist es, letztlich einen besseren Verbund zum Befestigungs-Composite zu ermöglichen und fehlerbehaftete Konditionierungen Chair-side zu ersparen (Radthke et al 2014). Eine maschinelle Vorbereitung der Stiftoberfläche durch eine Ummantelung spart zudem Zeit in der Praxis und soll möglichst reproduzierbar gute Haftfestigkeitswerte liefern.

Ein wesentliches Ergebnis der Studie war, dass die Erwartungen an den Effekt der Konditionierung erfüllt wurden. Das weitere wichtige Ergebnis war, dass die verkürzten gegenüber den konventionellen Stiften vergleichbare Haftfestigkeitswerte erzielten und damit die Nullhypothese bestätigt werden konnte.

Der mechanische Test, der in dieser Studie angewendet wurde, war der μ -Push-Out-Test. Dieses Test-Verfahren ermöglicht es, Haftwerte aus unterschiedlichen Wurzelregionen zu erhalten und damit auch regionale Unterschiede in Hinsicht auf die Haftfestigkeit zu erfassen. (Pereira et al 2013) Lange Zeit wurde der Pull-Out-Test angewandt, der jedoch die unterschiedlich starken Haftfestigkeiten in den verschiedenen Regionen des Wurzelkanals durch das Abziehen des kompletten Stiftes aus dem Kanal vernachlässigte. Inzwischen ist der μ -Push-Out-Test für abziehende Kräfte oder der μ -shear-bond-strength-test für Scherkraft-Testungen Standard.

Die künstliche Alterung der Proben soll die Übertragbarkeit auf die klinische Situation verbessern (Yun et al 2013) und gehört wie die nach dem Haftfestigkeitstest anschließende Analyse der Bruchmodi zu den mittlerweile anerkannten und geforderten Methoden (Magni et al 2007, Goracci et al 2005). Von Relevanz sind dabei die Anzahl der Zyklen, 5000 Zyklen entsprechen ungefähr einer Alterung von 2 Jahren. Zusätzlich zur thermischen Alterung wäre auch eine mechanische Alterung wünschenswert, die in diesem Fall nicht zusätzlich durchgeführt wurde.

Eine gewisse Standardabweichung der Ergebnisse lässt sich wie folgt erklären:

Die Haftfestigkeit der Befestigungscomposite hängt in hohem Maße von der Qualität des Dentins der Zahnprobe ab. Unterschiedliche Charakteristika des Wurzeldentins, wie Morphologie und Dichte der Dentintubuli können zwischen einzelnen Individuen stark differieren. Je nach Alter des Patienten und damit des Zahnes liegen die Dentinkanälchen mehr oder weniger stark obliteriert vor, bedingt durch die zunehmende Kalzifizierung im Laufe des Lebens. Die adhäsive Hybridschicht ist daher in älteren Zähnen deutlich dünner ausgeprägt. (Lopes et al 2011, Prati et al 1999, Cetingüç et al 2007)

Thermische oder chemische Reizungen durch die unterschiedliche Historie der Zähne führen ebenfalls zu einer Abnahme der Dentintubuli. Durch externe und interne Reizung liegen diese mehr oder weniger stark obliteriert vor. (Kwon et al

2013, Jakubinek et al 2008) Weniger zur Verfügung stehenden Dentintubuli verringern die Ausbildung von Composite-Zapfen, die sog. „Tags“, die der Composite-Dentin-Einheit zusätzliche Retention verleihen (Mjör et al 2001, Akgungor und Akkayan 2006)

Die Adhäsion des Stiftes kann zudem von der Menge an verbleibendem Debris bei der Wurzelkanalpräparation und durch die Qualität des Smearlayers im Kanal beeinflusst werden (Ferreira et al 2015, Scotti et al 2014)

Entscheidend für einen stabilen Verbund zwischen Stift und Wurzeldentin ist die Frequenz und Art der Wurzelspülungen während und nach der Aufbereitung anzusehen. Vor dem Einsetzen des Stiftes kann eine letzte Spülung mit CHX (Chlorhexidin) zu signifikant besseren Haftwerten führen und wurde daher in dieser Studie als finale Spülung verwendet (Toman et al 2014, Martinho et al 2015). Dabei sollte beachtet werden, dass auch andere Spülprotokolle zum Erfolg führen können.

Um eine bessere Penetration des Composites in die Dentinkanälchen zu ermöglichen wird außerdem empfohlen, das Dentin leicht feucht zu halten und nicht zu stark zu trocknen. (Rezende et al 2016). Genutzt wird dabei der Kapillareffekt in den Kanälchen, der eine noch bessere Vernetzung zwischen Wurzeldentin und Composite gewährleistet und Eindringtiefen von 50-200 µm erreicht. (Krämer et al 2000, Frankenberger und Tay 2005) Bei der Vorbereitung der Kanäle wurde das Wurzeldentin entsprechend nach der letzten Spülung vor der Stiftinsertion nicht zu stark mit Papierspitzen getrocknet.

Das Dentin aller Proben wurde mit einem rotierenden Diamant-Instrument manuell aufgeraut, um den Verbund zu verbessern. Die chemisch erzeugte Haftfestigkeit des Befestigungscomposites zum Wurzeldentin wird durch das Anrauen der Kanalwände durch eine mechanische Komponente ergänzt und die Retention des Stiftes zusätzlich gesteigert. (Nergiz et al 2002, Nergiz et al 1997, Bakaus et al 2018).

Betrachtet man die Dichte der Dentintubuli im Wurzelkanal, so lässt sich von koronal nach apikal eine signifikante, natürliche Reduktion an Dentinkanälchen feststellen (Mjör et al 2001). Eine Abnahme der Verbundkraft zwischen Stift und Wurzeldentin in

Richtung der apikalen Anteilen des Wurzelkanals war also zu erwarten (Farina et al 2011, Akungor et al 2006) und konnte auch in dieser Studie bestätigt werden.

Seitdem einige Studien belegen, dass die Stift-Adhäsiv Verbundfläche bei Wurzelstiften im Kanal die größte Fehlerquelle darstellt, (Zicari et al 2012, Machado et al 2015) zeigen die beschichteten Exemplare eine deutliche Verbesserung an dieser sensiblen Schnittstelle. Die Untersuchung auf die Bruchmodalitäten unter dem Mikroskop ergab, dass das Befestigungscomposite nach dem Push-out-Test mehrheitlich noch auf der Tbc-ummantelten Stiftoberfläche verblieben war, während der Verbund zum Dentin versagte (Adhäsives Versagen zwischen Dentin und Composite). Wünschenswert wäre ein cohäsives Bruchverhalten (innerhalb des Stiftes oder des Composites) und damit ein Lösen der Konstruktion aus dem Kanal. Adhäsives Versagen führt hingegen zu einem Mikroleakage entlang des Wurzelentins und dadurch zur bakteriellen Kontamination, wenn die Spaltbildung nicht zum kompletten Versagen führt und unentdeckt bleibt. (Wu et al 1998) Cohäsive Brüche wiederum ermöglichen eine gute Entfernbareit der Konstruktion und eine problemlose Rezementierung nach Säuberung. (Makade et al 20011, Santos et al 2018)

Schwankende Werte in der Haftfestigkeit können auch dem Auftreten von Nanoleakage entlang der Composite-Dentin-Grenze geschuldet sein. Nanoleakage ist als einer der Faktoren bekannt, die zur Herabsetzung des Klebeverbundes zum Dentin führen. Es tritt seitlich (mit einer Dicke von bis zu 20-100nm) an der Basis der Hybridschicht auf, welche nicht mit Adhäsiv ausgefüllt wurde. (Xiong et al 2019, Bakaus et al 2018) Diese demineralisierte und nicht vollständig hybridisierte Dentinschicht kann als weiterer Schwachpunkt des Adhäsions-Mechanismus gesehen werden (Soundar et al 2014, Turker et al 2016) und ist vor allem abhängig vom verwendeten Adhäsiv, sowie von dessen Verarbeitung und Anwendung.

Betrachtet man die beiden Composite in dieser Studie, Rely X Unicem und Dentin Build Evo, so handelt es sich bei beiden um dualhärtende, selbstadhäsive, fließfähige Compositesysteme. Die Befestigungsmaterialien sollten sich gut an die Wurzelstiftoberfläche adaptieren lassen und den Stift möglichst beim Auftragen und Einbringen in den Kanal homogen benetzen. Idealerweise entsteht eine dünne

Zementfuge von 50 µm. Aufgrund der geringen Viskosität, erreichen fließfähige Composite bei richtiger Anwendung, solch eine herausragende Benetzung der Oberfläche. Beide Materialien sind dafür geeignet ausgewählt worden.

Trotzdem haben fließfähige Composite eine geringere Füllstoffmenge als andere Aufbau-Composite. (Monticelli et al 2004, Monticelli et al 2006) Die Belastbarkeit des gesamten Stift-Stumpf-Aufbaus ist damit limitiert.

Die mechanischen Eigenschaften und Werte von fließfähigen Compositen entsprechen oft 60% - 90% denen von konventionellen Compositen. Die Schrumpfung aufgrund ihrer geringen Füllkörperanteile kann zu Stress in einigen Regionen der Klebefuge führen. (Bayne et al 1998, Miyasaka und Okamura 2009, Salerno et al 2011)

Der hohe C-Faktor* in geschlossenen Kavitäten wie dem Wurzelkanal (dieser liegt nahe 200) ist ein Indikator für eine starke Polymerisationsschrumpfung, die zu hohem Stress in der Klebefuge und zur Spaltbildung entlang der Stift-Adhäsiv Schnittfläche führen kann, was die Qualität des Verbundes deutlich vermindert. (Bouillaguet et al 2003)

Das Dentin Build Evo ist ein Befestigungscomposite, für dessen chemischen Verbund ein zusätzliches Bonding der Dentinoberfläche erforderlich ist. Das einheitliche Auftragen der Bonding Flüssigkeit (Dentin Bond Evo A+B) auf die Dentinwände mit einem Microbrush im engen Wurzelkanal ist fehleranfällig und kann den Verbund des Composites zum Wurzeldentin und damit den Halt des Wurzelstiftes negativ beeinflussen. Zusätzlich könnten sich Überschüsse des Bondings am Kavitätenboden sammeln und beim Aushärten die Stiftpassung beeinträchtigen. (Das et al 2015, Soares et al 2012, Schmage et al 2011) Bei der Vorbehandlung der Zahnproben mit dem Adhäsiv wurden Überschüsse mit Paperpoints entfernt und die Bonding-Schicht durch einen leichten Luftstrom verblasen. So wurde versucht eine möglichst homogene Schicht zu erhalten. Ungenauigkeiten und Schwankungen in der Reproduzierbarkeit lassen sich dabei nicht ausschließen.

* Der C Faktor beschreibt das Verhältnis zwischen gebundener und ungebundener Fläche in der Zahnmedizin. Bei einem hohen C-Faktor stehen weniger ungebundene Flächen zur Verfügung, von denen Composite nachfließen kann wodurch es zu Spannungen im Verbund kommt

In dieser Studie wurden diesbezüglich jedoch keine signifikanten Unterschiede zum selbstadhäsiven Compositesystem Rely X Unicem festgestellt. Weitere Untersuchungen mit anderen Befestigungs-Compositen sollten zur Überprüfung der universalen Einsetzbarkeit der beschichteten Stifte durchgeführt werden. Das konventionelle ER-System wurde bereits mit vielen Compositen getestet. (Schmage et al 2009b, Schmage et al 2011, Sen et al 2005)

Die Hauptursache für das Versagen von Wurzelstiften ist ein Retentionsverlust. Bei Titanstiften könnte dieser auch durch eine limitierte Lichtintensität entlang der Wurzelkanalwand begünstigt werden, der ein vollständiges Polymerisieren des Composites im Kanal verhindert. (Faria e Silva et al 2007, Reginato et al 2013, Stylianou et al 2017, Galhano et al 2008) Durch die Beschichtung der kurzen 6 mm Stifte kommt es ebenfalls zu einer höheren Opazität im Vergleich zu den unbeschichteten Posts und einer vermutlich geringeren Lichtleitung, die eine vollständige Aushärtung des Befestigungswerkstoffes im Kanal verhindern kann. (Cekic-Nagas et al 2016) Aufgrund der verwendeten dualhärtenden Composite spielt dieser Effekt keine Rolle, da der Composite immer erhärtet.

Einen wesentlichen Faktor für die Haftfestigkeit des Wurzelstiftes stellt die präzise Stiftbettpräparation dar. Eine möglichst genaue Stiftpassung und damit geringe Klebspaltbreite ist eine Grundvoraussetzung für gute Retention, (D'arcangelo et al 2007) die neben dem chemischen Verbund durch den Composite auch auf einer mechanischen Retention beruht. Die Zementfugenbreite beträgt ungefähr 50 µm im ER-System. Sie wird durch entsprechend präzise gefertigte formkongruente Präparationsinstrumente erreicht. (Schmage et al 2009a, Dietschi et al 1997, Holmes et al 1996)

Durch die manuelle Aufbereitung des Kanals kann es jedoch zur Aufweitung des koronalen Kanalanteils bei der Zugangspräparation für eine endodontische Maßnahme oder durch den größeren Durchmesser der genutzten Endodontie-Instrumente z. B. bei der Crown-Down Technik kommen – dem sog. Flaring Effekt. Im koronalen Segment entstehen dadurch Inhomogenitäten zwischen Wurzelkanalquerschnitt und Stift.

Eine daraus resultierende dickere Zement-Fuge beim Einsetzen des Stiftes setzt die retentive Wirkung herab. (Schmage et al 2009a, Pulido et al 2016, Holmes et al 1996) Zusätzlich besteht bei einer größeren Diskrepanz zwischen Stift- und präpariertem Kanaldurchmesser ein höheres Risiko für die Entstehung von Rissen und Luftblasen im Zementspalt, welche die Haftfestigkeit der Stifte wiederum reduzieren können. (Belli et al 2016, Marcos et al 2016)

Betrachtet man die Ergebnisse dieser Studie, wurde auf eine gute Passung des Stiftes koronal geachtet und es kommt zu keiner vergrößerten Zementfuge in diesem Bereich. Die koronalen Stiftscheiben erzielten bessere Haftfestigkeiten gegen ausstoßende Kräfte als die Stiftscheiben in den apikalen Regionen. (Rodrigues et al 2017)

Auch die Morphologie des Wurzelkanals spielt eine Rolle hinsichtlich der Wandpassung für die konfektionierten Stifte. Kleine Höhlen und akzessorische Kanäle sowie hantelförmige Kanäle könnten eine gleichmäßige Klebefuge und damit ebenfalls einen optimalen Verbund verhindern. (Hanson und Caputo 1974, Da Silva et al 2015, Webber et al 2018)

In dem hier dargelegten Versuchdesign wurde entschieden, keine Wurzelfüllung mit Sealer und Guttapercha vor dem Setzen der Stifte vorzunehmen. Reste von Sealer in den Dentinkanälchen oder Guttapercha an der Wurzelkanalwand können zusätzliche Fehlerquellen darstellen und bei unzureichender Entfernung die Haftwerte verfälschen. (Cecchin et al 2011, Scotti et al 2014, Schmäge et al 2003)

Andererseits stellt das Fehlen der Wurzelfüllung einen relevanten Unterschied zur klinischen Situation dar. Weitere Untersuchungen müssen den Einfluss der Stifthaftfestigkeit in Kombination mit einem Sealer ermitteln und die Übertragbarkeit der Ergebnisse beweisen.

Um eine gleichmäßige Composite-Verbundschicht zu erzielen, werden die Stifte jeweils mit dem Composite beschickt und unter Fingerdruck in den Kanal eingebracht. (Dal Piva et al 2018, Caceres et al 2018) Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen, wurde der Stift unter einer rotierenden Bewegung inseriert und dem überschüssigen Composite ermöglicht heraus zu quellen. Die herausquellenden Überschüsse stellen eine ausreichende Verteilung des Composites im Kanal sicher. Wird dagegen der Zement zuerst in den Kanal eingebracht, kann die überschüssige

Masse vor dem Erhärten nicht an den Rändern heraus quellen und eine zu große Zementfuge mit reduzierten mechanischen Eigenschaften resultiert. Zudem kann ein zu hoher Druck, der zum Herauspressen angewandt wird, Infrakturen der Zahnwurzel induzieren.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

1. Vergleichbare Haftfestigkeiten der ER Post X 6 mm zu herkömmlichen 9 mm Stiften wurden bestätigt.
2. Es wurden keine Unterschiede bezüglich der Haftfestigkeiten in Abhängigkeit vom Stiftmaterial gefunden (Titan/FRC)
3. Beide Befestigungscomposites erreichten vergleichbare Haftfestigkeiten und waren zur Befestigung der Stifte mit Tbc-Oberflächenkonditionierung grundsätzlich geeignet.
4. Die tribochemische Oberflächenbeschichtung zeigte einen guten Haftverbund und bestätigte vorteilhafte Bruchmodalitäten.
5. Die Abnahme der Haftfestigkeit von Wurzelstiften zervikal nach apikal im Wurzelkanal wurde bestätigt.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war, die μ -Haftfestigkeiten und die Bruchmodalitäten von titan- und glasfaserverstärkten Composite (FRC)-Wurzelstiften mit Retentionskopf mit einer verkürzten Länge von 6 mm und einer Oberflächenbeschichtung (Tbc-Konditionierung der Stiftoberfläche) im Vergleich zu den herkömmlichen, unbeschichteten Wurzelstiften mit 9 mm Länge, die nur 6 mm tief eingesetzt wurden, unter dem Einfluss von zwei Befestigungscompositen zu prüfen.

Insgesamt wurden 120 extrahierte menschliche, einwurzelige Prämolaren mit einem Wurzelkanal mit rundem Querschnitt in 3 Gruppen á 40 Zähne unterteilt. ER-Wurzelstifte mit Retentionskopf der Firma Kommet (Lemgo) aus FRC und Titan der ISO Größe 090 wurden in je 3 verschiedenen Ausführungen verwendet und in die auf 6 mm Länge formkongruent aufbereiteten Wurzelkanäle inseriert.

Bei den getesteten Stiften handelte es sich um die 9 mm langen, unbeschichteten Stifte (Kontrollgruppe), neue, längenreduzierte Wurzelstifte mit Tbc-Beschichtung, sowie einem Prototyp dieser 6 mm kurzen Wurzelstifte ohne die Beschichtung, welcher in der Fabrik vor dem Beschichtungsprozess abgefangen wurde. Für jeden Stifttyp standen formkongruente Präparationsinstrumente zur Verfügung, womit die zuvor endodontisch aufbereiteten Zahnwurzeln jeweils auf 6 mm Tiefe präpariert wurden.

In Gruppen zu je N=10 wurden die Stifte jeden Typs und jeden Materials jeweils mit den beiden Befestigungsmaterialien Dentin Build Evo (DB) und Relx X Unicem (RX) 6 mm tief in die vorbereitete Zahnwurzel eingesetzt, wodurch 12 Testgruppen entstanden.

Nach Stiftinsertion und Aushärtung der beiden Compositezemente wurden die 120 Zahnwurzeln 24 Stunden in Wasser gelagert und anschließend einer künstlichen thermischen Alterung unterzogen. (Thermocycling 5°-55°C, 5000 Zyklen, 30 sec Abtropfzeit) Die Proben wurden in 2 mm dicke, horizontale Scheiben gesägt und mittels μ -Push-Out-Test die Ausstoßkräfte gemessen. Die Frakturflächen wurden im Auflichtmikroskop inspiziert und die Bruchmodalitäten ausgewertet. Die μ -Haftfestigkeiten wurden mit der individuellen Mantelfläche der einzelnen

Stiftscheiben berechnet und die Ergebnisse auf ihre statistische Signifikanz überprüft. (ANOVA, $\alpha=0,05$)

Die höchsten Haftfestigkeiten besaßen die koronalen Segmente der tribochemisch beschichteten ER-Stifte, unabhängig vom Befestigungscomposite und vom Stiftmaterial. Die beschichteten 6 mm kurzen ER- Post X mit Dentin Build Evo inserierten Proben aus Titan erreichten dabei im koronalen Segment im Durchschnitt die höchsten Haftfestigkeiten von 13,65 MPa ($\pm 7,92$ MPa), gefolgt von den 6 mm FRC-Stiften, eingesetzt mit Dentin Build Evo (11,75 MPa $\pm 7,45$ MPa) und den mit Rely X Unicem eingesetzten 6 mm Titan Stiften (10,99 MPa $\pm 6,38$ MPa). Zwischen den Testgruppen bestand bei der Prüfung der einzelnen variablen Stifttyp, Stiftmaterial, Befestigungsmaterial und Wurzelregion keine statistisch signifikante Differenz ($p>0,05$).

Bei der Betrachtung des Bruchverhaltens wurden bei den beschichteten Stiften mehrheitlich adhäsive Brüche zwischen Composite und Wurzelentin festgestellt und vorwiegend Reste des jeweiligen Composites auf der beschichteten Stiftoberfläche gefunden. Der Verbund zum Stift schien über die Tbc-Beschichtung entsprechend stärker ausgebildet worden zu sein als in der Kontrollgruppe bzw. dem gleichen Stifttyp ohne die Tbc-Schicht. Bei den beiden unbeschichteten 6 mm und 9 mm Stiften waren die Bruchmodi vorwiegend kohäsiv oder adhäsiv zwischen Stift und Composite.

Daher wurde die tribochemische Beschichtung von FRC- und Titan- Wurzelstiften positiv auf den Verbund zwischen Befestigungscomposite und Stiftmaterial bewertet. Demzufolge konnte nachgewiesen werden, dass die Haftfestigkeiten der längenreduzierten Wurzelstifte den herkömmlichen gleichwertig waren und gerade im koronalen Wurzelanteil hohe Werte erzielt wurden.

Beide angebotenen Stiftmaterialien und beide genutzten Befestigungscomposite erschienen gleichermaßen geeignet. Der Nutzen der Beschichtung konnte zur Intensivierung des Haftverbundes bestätigt werden.

6.1 Englische Zusammenfassung (Abstract)

Microtensile Bond Strengths of Short Root Posts.

Short root posts were developed in order to preserve sound root substance and a good apical seal. The aim of this study was to investigate the effects of a reduced length of root posts regarding their microtensile bond strengths (μ TBS) and their failure modes. Additionally a tribochemical coating was applied on the short posts.

In the present in vitro-study, 6 mm short, coated titanium and FRC-root posts were tested regarding their microtensile bond strengths to root dentin and compared to uncoated 6 mm posts as well as to conventional 9 mm posts for control.

Short root posts with or without Tbc-coating of 6 mm length and 9 mm conventional posts with a slightly reduced diameter, inserted as well 6 mm deep, were investigated. 120 extracted human premolars were treated endodontically and sectioned into three groups according to 3 post types ($n=40$). The roots were prepared for the respective post types. Posts of 2 materials (titanium and FRC (fiber reinforced composite)) were inserted into the roots using 2 dual curing resin cements (Rely X Unicem and Dentin Build Evo). Altogether 12 test groups ($n=10$) were formed. After cementation all samples were stored in distilled water for 24 h and were submitted to artificial aging (5,000 thermocycles of 5°C to 55°C, 30 sec). Then the roots were cut perpendicular into 2 mm slices and underwent microtensile bond strength testing. Failure modes were assessed microscopically. Statistical analysis was performed using ANOVA / Bonferroni correction ($\alpha=0.05$).

Microtensile bond strengths did not differ significantly between the respective groups compared to each other (1-way ANOVA, $p>0.05$). Yet, the parameter region of the root showed a statistically significant influence (4-way ANOVA, $p<0.05$), whereas the other parameter post type, cement and post material did not. However, the short, coated posts revealed at least similar μ TBS than the conventional posts ranging between 6 and 13 MPa. The short, coated posts performed better at the post/ cement interface for both post materials and luting agents. Failure modes were found predominantly combined cohesively and adhesively at the dentine/resin interface. μ TBS determined to be highest coronally and decreased to the apical region for most

groups using Dentin Build Evo. For RelyX Unicem μ TBS were proven to be more homogenous regarding the regions.

Comparable results were confirmed for the short, coated root posts with the control groups regardless of post material and luting agent.

7. LITERATUR

1. **Adanir N, Belli S (2008)**
Evaluation of Different Post Lengths' Effect on Fracture Resistance of a Glass Fiber Post System.
Eur J Dent. 2(1):23-8
2. **Akgungor G, Akkayan B (2006)**
Influence of Dentin bonding agents and polymerization modes on the bond strength between translucent fiber posts and three dentin regions within a post space.
J Prosthet Dent. 95(5):368-78
3. **Amin RA, Mandour MH, Abd El-Ghany OS (2014)**
Fracture strength and nanoleakage of weakened roots reconstructed using relined glass fiber-reinforced dowels combined with a novel prefabricated core system.
J Prosthodont. 23(14):484-94
4. **Ausiello P, Ciaramella S, Martorelli M, Lanzotti A, Zarone F, Watts DC, Gloria A (2017)**
Mechanical behavior of endodontically restored canine teeth: Effects of ferrule, post material and shape.
Dent Mater. 33(12):1466-72
5. **Bakaus TE, Gruber YL, Reis A, Gomes JC, Gomes GM (2019)**
Bonding properties of universal adhesives to root canals prepared with different rotary instruments.
J Prosthet Dent. 121(2):298-305
6. **Barker BCW (1963)**
Restoration on non-vital teeth with crowns.
Aust dent J. 8(3):191-200
7. **Bayne SC, Thompson JY, Swift EJ Jr, Stamatiades P, Wilkerson M (1998)**
A characterization of first-generation flowable composites.
J Am Dent Assoc. 129(5):567-77
8. **Belli S, Eraslan O, Eskitascioglu G (2016)**
Effect of Root Filling on Stress Distribution in Premolars with Endodontic-Periodontal Lesion: A Finite Elemental Analysis Study.
J Endod. 42(1):150-5
9. **Bitter K, Noetzel J, Neumann K, Kielbassa AM (2007)**
Effect of silanization on bond strengths of fiber posts to various resin cements.
Quintessence Int. 38(2):121-8
10. **Bitter K, Polster L, Askar H, Von Stein-Lausnitz M, Sterzenbach G. (2017)**
Effect of Final Irrigation Protocol and Etching Mode on Bond Strength of a Multimode Adhesive in the Root Canal.
J Adhes Dent. 8:245-52.
11. **Blankenstein F (2002)**
Überlebenswahrscheinlichkeit endodontisch behandelter Zähne – Vorschlag zur klinischen Erfassung des Erhaltungsgrades.
Dtsch. Zahnärztl. Z.57:558 – 61

12. **Bohrer TC, Fontana PE, Wandesch VF, Morari VHC, Valandro LF, Kaize OB (2018)**
Endodontic Sealers Affect the Bond Strength of Fiber Posts and the Degree of Conversion of Two Resin Cements.
J Adhes Dent. 20(2):165-72
13. **Boschian PL, Cavalli G, Bertani P, Gagliani M (2002)**
Adhesive post-endodontic restorations with fiber posts: push-out tests and SEM observations.
Dent Mater. 18(8):596-602
14. **Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH (2003)** Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin.
Dent Mater. 19:199-205
15. **Caceres EA, Samapao CS, Atria PJ, Moura H, Giannini M, Coelho PG, Hirata R (2018)**
Void and gap evaluation using microcomputed tomography of different fiber post cementation techniques.
J Prosthet Dent. 119(1):103-7
16. **Cagidiaco MC, Goracci C, Garcia-Godoy F, Ferrari M (2008)**
Clinical studies of fiber posts: a literature review.
Int J Prosthodont. 21(4):328-36
17. **Caputo A.A und Stanlee J.P (1976)**
Pins and Posts, why when and how.
Dent Clin North Am 20(2):299-311
18. **Cecchin D, Farina AP, Souza MA, Carlini-Júnior B, Ferraz CC (2011)**
Effect of root canal sealer on bond strength of fiberglass posts cemented with self-adhesive resin cements.
Int Endod J. 44(4):314-20
19. **Cekic-Nagas I, Ergun G, Egilmez F (2016)**
Light transmittance of fiber posts following various surface treatments: A preliminary study.
Eur J Dent. 10(2):230-3
20. **Cetingüç A, Olmez S, Vural N (2007)**
HEMA diffusion from dentin bonding agents in young and old primary molars in vitro.
Dent Mater. 23(3):302-7
21. **Coelho CS, Biffi JC, Silva GR, Abrahão A, Campos RE, Soares CJ (2009)**
Finite element analysis of weakened roots restored with composite resin and posts.
Dent Mater J. 28(6):671-8
22. **Culhaoglu AK, Özcan E, Kilicarslan MA, Seker E (2017)**
Effect of Boric Acid Versus Conventional Irrigation Solutions on the Bond Strength Between Fiber Post and Root Dentin.
J Adhes Dent. 19(2):137-46.
23. **D`arcangelo C, Cinelli M, De Angelis F, D`Amario M (2007)**
Effect of resin cement film thickness on pullout strength of a fiber-reinforced post system.
J Prosthet Dent. 98(3):193-8

24. **Da Silva NR, Aguiar GC, Rodrigues Mde P, Bicalho AA, Soares PB, Vermíssimo C, Soares CJ (2015)**
Effect of Resin cement porosity on retention of Glass fiber posts to root dentin: An experimental and finite element analysis.
Braz Dent J. 26(6):630-6
25. **Da Silveira-Pedrosa DM, Martins LR, Sinhoreti MA, Correr-Sobrinho L, Sousa-Neto MD, Costa ED Junior, de F Pedrosa-Filho C, de Carvalho JR Junior (2016)**
Push-out Bond Strength of Glass Fiber Posts Cemented in Weakened Roots with Different Luting Agents.
J Contemp Dent Pract. 17(2):119-24
26. **Dal Piva AMO, Tribst JPM, Borges ALS, Bottino MA, Souza ROA (2018)**
Do mechanical advantages exist in relining fiber posts with composite prior to its cementation.
J Adhes Dent. 20(6):511-8
27. **Das AK, Muddugangadhar BC, Amarnath GS, Garg A, Kumar U, Rao TR (2015)**
Comparative evaluation of push out bond strength of a fiber post system using four different resin cements: An In-vitro study.
J Int Oral Health. 7(1):62-7
28. **De Cleen MJH (1994)**
Richtlinien zur Restauration wurzelbehandelter Zähne.
Endodontie 4:289-97
29. **De Munck J, Van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, Van Meerbeek B (2005)**
A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue. Methods and results.
J Dent Res. 84(2):118-32
30. **De Souza NC, Marcondes ML, da Silva D, Borges GA, Júnior LB, Spohr AM (2016)**
Relined Fiberglass Post: Effect of Luting Length, Resin Cement, and Cyclic Loading on the Bond to Weakened Root Dentin.
Oper Dent. 41(6):e174-82.
31. **DGZMK Stellungnahme (2003)**
Aufbau endodontisch behandelter Zähne.
Dtsch. Zahnärztl. Z. 58(4): 199-201
32. **Dietschi D, Romelli M, Goretti A (1997)**
Adaption of adhesive posts and cores to dentin after fatigue testing.
Int J Prosthodont. 10(6):498-507
33. **Edelhoff D, Heidemann D, Kern M, Weigl P (2000)**
Klinische Erfahrungen mit konfektionierten Wurzelstiften und individuellen Stumpfaufbauten aus Keramik.
Dtsch. Zahnärztl. Z. 55:746-50
34. **Faria e Silva AL, Arias VG, Soares LE, Martin AA, Martins LR (2007)**
Influence of fiber post translucency on the degree of conversion of dual cured resin cement.
J Endod. 33(3):303-5

35. **Farina AP, Cecchin D, Garcia Lda F, Naves LZ, Sobrinho LC, Pires-de-Souza Fde C (2011)**
Bond strength of fiber posts in different root thirds using resin cement.
J Adhes Dent. 13(2):179-86
36. **Ferrari M, Vichi A, García-Godoy F (2000)**
Clinical evaluation of fiber reinforced epoxy posts and cast post and cores.
Am J Dent. 13(Spec No):15B-8
37. **Ferreira R, Prado M, de Jesus Soares A, Zaia AA, de Souza-Filho FJ (2015)**
Influence of using clinical microscope as auxiliary to perform mechanical cleaning of post space: A Bond Strength Analysis.
J Endod 41(8):1311-6
38. **Frankenberger R, Tay FR (2005)**
Self-etch vs etch-and-rinse adhesives: effect of thermo-mechanical fatigue loading on marginal quality of bonded resin composite restorations.
Dent Mater 21(5):397-412
39. **Fredrickson M, Astbäck J, Pamenius M, Arvidson K (1998)**
A retrospective Study of 236 patients with teeth restored by carbon fiber reinforced epoxy resin posts.
J Prosthet Dent. 80(2): 151-7
40. **Galhano GA, de Melo RM, Barbosa SH, Zamboni SC, Bottina MA, Scotti R (2008)**
Evaluation of light transmission through translucent and opaque posts.
Oper Dent. 33(3):321-4
41. **Gomes GM, Rezende EC, Gomes OM, Gomes JC, Loguercio AD, Reis A (2014a)**
Influence of the resin cement thickness on bond strength and gap formation of fiber posts bonded to root dentin.
J Adhes Dent. 16(1):71-8
42. **Gomes GM, Gomes OM, Gomes JC, Loguercio AD, Calixto AL, Reis A. (2014b)**
Evaluation of different restorative techniques for filling flared root canals: fracture resistance and bond strength after mechanical fatigue.
J Adhes Dent. 16(3):267-76
43. **Goracci C, Raffaelli O, Monticelli F, Balleri B, Bertelli E, Ferrari M (2005)**
The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization.
Dent Mater. 21(5):437-44
44. **Gutman (1977)**
Preparation of endodontically treated teeth to receive a post-core restoration.
J Prosthet Dent. 38(4):413-9
45. **Hanson EC und Caputo AA (1974)**
Cementing mediums and retentive characteristics of dowels.
J Prosthet Dent. 32(5):551-7

46. **Hatta M, Shinya A, Vallittu PK, Shinya A, Lassila LV (2011)**
High volume individual fibre post versus low volume fibre post: the fracture load of the restored tooth.
J Dent. 39(1):65-71
47. **Heydecke G, Peters MC (2002)**
The restoration of endodontically treated single rooted teeth with cast or direct posts and cores: A systematic review.
J Prosthet Dent. 87(4):380-6
48. **Holmes DC, Diaz-Arnold AM, Leary JM (1996)**
Influence of post dimension on stress distribution in dentin.
J Prosthet Dent. 75:140-7
49. **Isidor F, Odman P, Brøndum K (1996)**
Intermittent loading of teeth restored using prefabricated carbon fiber posts.
Int J Prothodont. 9(2):131-6
50. **Jakubinek MB, O'Neill C, Felix C, Price RB, White MA (2008)**
Temperature excursions at the pulp-dentin junction during the curing of light-activated dental restorations.
Dent Mater. 24(11):1468-76
51. **Johnson J.k, Schwartz NL, Blackwell R.T (1976)**
Evaluation and restoration of endodontically treated posterior teeth.
J Am Dent Assoc. 93(3):597-605
52. **Johnson JK und Sakumura JS (1978)**
Dowel form and tensile force.
J Prosthet Dent. 40(6):645-9
53. **Junqueira RB, de Carvalho RF, Marinho CC, Valera MC, Carvalho CAT (2017)**
Influence of glass fiber post length and remaining dentine thickness on the fracture resistance of root filled teeth.
Int Endod J. 50, 569-77
54. **Kaur N, Kumar M, Khosla A, Batra R, Katoch S (2018)**
Effect of various surface treatments on push out bond strength of Glass fiber posts an in vitro study.
Dent J adv stud. 6:28-30
55. **Kayser AF (1996)**
Prosthodontic aspects of endodontics
J Prosthet Dent. 21(6):645-9
56. **Keul C, Köhler P, Hampe R, Roos M, Stawarczyk B (2016)**
Glass Fiber Post/Composite Core Systems Bonded to Human Dentin: Analysis of Tensile Load vs Calculated Tensile Strength of Various Systems Using Pull-out Tests.
J adhes Dent. 18(3):247-56
57. **Khan AA, Al Kheraif AA, Syed J, Divakar DD, Matinlinna JP (2017)**
Enhanced resin titanium adhesion with silane primers using tribochemical silica-coating.
Dent mater J. 36(1):111-6
58. **Krämer N, Lohbauer U, Frankenberger R (2000)**
Adhesive luting of indirect restorations.
Am J Dent. 13(Spec No):60D-76D

59. **Krupp JD, Caputo AA, Trabert KC, Standlee JP (1979)**
Dowel retention with glass ionomer cement.
J Prosthet Dent. 41(2):163-6
60. **Kwon SJ, Park YJ, Jun SH, Ahn JS, Lee IB, Cho BH, Son HH, Seo DG (2013)**
Thermal irritation of teeth during dental treatment procedures.
Restor Dent Endod. 38(3):105-12
61. **Lazari PC, de Carvalho MA, Del Bel Cury AA, Magne P (2018)**
Survival of extensively damaged endodontically treated incisors restored with different types of posts-and-core foundation restoration material.
J Prosthet Dent. 119(5) 769-76
62. **Lazari PC, Oliveira RC, Anchieta RB, Almeida EO, Freitas Junior AC, Kina S, Rocha EP (2013)**
Stress distribution on dentin-cement-post interface varying root canal and glass fiber post diameters. A three-dimensional finite element analysis based on micro-CT data.
J Appl Oral Sci. 21(6):511-7
63. **Lema AA, Pinho LA, de Gonçalves L, Correr-Sobrinho L, Sinhoreti MA (2013)**
Effects of silane application on luting fiber posts using self-adhesive resin cement.
J Adhes Dent. 15(3):269-74
64. **Lin J, Matinlinna JP, Shinya A, Botelho MG, Zheng Z (2018)**
Effect of fiber post length and abutment height on fracture resistance of endodontically treated premolars prepared for zirconia crowns.
Odontol.106(2):215-22
65. **Liu R, Kaiwar A, Shemesh H, Wesselink PR, Hou B, Wu MK (2013)**
Incidence of apical root cracks and apical dentinal detachments after canal preparation with hand and rotary files at different instrumentation length.
J Endod. 39(1):129-32
66. **Lopes GC, Vieira LC, Araújo E, Bruggmann T, Zucco J, Oliveira G (2011)**
Effect of dentin age and acid etching time on dentin bonding.
J Adhes Dent.13(2):139-45.
67. **Machado FW, Bossardi M, Ramos Tdos S, Valente LL, Münchow EA, Piva E (2015)**
Application of resin adhesive on surface of a silanized glass fiber reinforced post and its effect on the retention to root dentin.
J Endod. 41(1):106-10
68. **Magni E, Mazzitelli C, Papacchini F, Radovic I, Goracci C, Coniglio I, Ferrari M (2007)**
Adhesion between fiber posts and resin luting agents a microtensile bondstrength test and an SEM investigation following different treatments of the post surface.
J Adhes Dent. 9(2):195-202
69. **Makade CS, Meshram GK, Warhadpande M, Patil PG (2011)**
A comparative evaluation of fracture resistance of endodontically treated teeth restored with different post core systems - an in-vitro study.
J Adv Prosthodont. 3:90-5

70. **Mannocci F, Ferrari M, Watson TF (2001)**
Microleakage of endodontically treated teeth restored with fiber posts and composite cores after cyclic loading, A confocal microscopic study. J Prothet Dent. 85(3):284-91
71. **Mannocci F, Innocenti M, Ferrari M, Watson TF (1999)**
Confocal and scanning electron microscopic study of teeth restored with fiber posts, metal posts and composite resins. J Endod. 25(12):789-94
72. **Marcos RM, Kinder GR, Alfredo E, Quaranta T, Correr GM, Cunha LF, Gonzaga CC (2016)**
Influence of the Resin Cement Thickness on the Push-Out Bond Strength of Glass Fiber Posts. Braz Dent J. 27(5):592-8
73. **Martinho FC, Carvalho CA, Oliveira LD, de Lacerda AJ, Xavier AC, Augusto MG, Zanatta RF, Pucci CR (2015)**
Comparison of different dentin pretreatment protocols on the bond strength of glass fiber post using self-etching adhesive. J Endod. 41(1):83-7
74. **McLean A (1998)**
Criteria for the predictably restorable endodontically treated tooth. J Can Dent Assoc 64(9):652-6
75. **Mezzomo E, Massa F, Libera SD (2003)**
Fracture resistance of teeth restored with two different post-and-core designs cemented with two different cements: an in vitro study. Part I. Quintessence Int. 34(4):301-6
76. **Miyasaka T und Okamura H (2009)**
Dimensional change measurements of conventional and flowable composite resins using a laser displacement sensor. Dent Mater J. 28(5):544-51
77. **Mjör IA, Smith MR, Ferrari M, Mannocci F (2001)**
The Structure of Dentine in the apical Regions of human teeth. Int Endod J. 34(5):346-53
78. **Monticelli F, Gorracci C, Ferrari M (2004)**
Micromorphologie of the fiber post-resin core unit: a scanning electron microscopy evaluation. Dent Mater 20(2):176- 83
79. **Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Cury AH, Goracci C, Ferrari M (2006)**
Post surface conditioning improves interfacial adhesion in post/core restorations. Dent Mater. 22(7):602-9
80. **Morgano SM (1996)**
Restoration of pulpless teeth, application of traditional principles in present and future context. J Prosthet Dent. 75(4):375-80
81. **Mou YB, Chen YM, Smales RJ, Yip KH (2009)**
Optimum post diameters for a cast post-core system. Am J Dent. 22(5):311-4
82. **Naumann, Michael (2003)**
Wann Wurzelstifte indiziert sind – Klassifikation und Therapiekonzept. Quintessenz 54: 931-8

83. **Nergiz I und Schmage P (2004)**
Wurzelstifte im Wandel der Zeit.
Endodontie Journal 1:10-7
84. **Nergiz I, Schmage P, Özcan M, Platzer U (2002)**
Effect of length and diameter of tapered posts on the retention.
J Oral Rehabil. 29(1):28-34.
85. **Nergiz I, Schmage P, Platzer U, McMullan-Vogel CG (1997)**
Effect of different surface textures on retentive strength of tapered posts.
J Prosthet Dent. 78(5):451-7
86. **Nokar S, Bahrami M, Mostafavi AS (2018)**
Comparative evaluation of the effect of different post and core materials on stress distribution in radicular dentin by Three Dimensional Finite element analysis.
J Dent (Tehran, Iran) 15(2):69-78
87. **Özcan M, Pfeiffer P, Nergiz I. (1998)**
A brief history and current status of metal- and ceramic surface-conditioning concepts for resin bonding in dentistry.
Quintessence Int. 29(11):713-24
88. **Özcan M, Vallittu PK (2005)**
Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cement to ceramics.
Dent. Mater. 19(8):725-31
89. **Panitiwat P und Salimee P (2017)**
Effect of different composite core materials on fracture resistance of endodontically treated teeth restored with FRC posts.
J appl oral Sci. 25(2): 203–10
90. **Pereira JR, Lins do Valle A, Ghizoni JS, Lorenzoni FC, Ramos MB, Dos Reis Só MV (2013)**
Push-out bond strengths of different dental cements used to cement glass fiber posts.
J. Prosthet. Dent. 110(2):134-40
91. **Pfeiffer P, Schulz A, Nergiz I, Schmage P (2006)**
Yield strength of zirconia and glass fiber reinforced posts.
J Oral Rehabil 33(1):70-4
92. **Pickard HM (1964)**
Variants of the post crown.
Brit Dent J 117:517-26
93. **Pinto CL, Behring CLB, de Oliveira GR, Maroli A, Reginato VF, Caldas RA, Bacchi A (2019)**
The Influence of Post System Design and Material on the Biomechanical Behavior of Teeth with Little Remaining Coronal Structure.
J Prosthodont. 28(1):e350-6
94. **Plotino G, Grande NM, Bedini R, Pameijer CH, Somma F (2007)**
Flexural properties of endodontic posts and human root dentin.
Dent Mater. 23(9):1129-35
95. **Prado M, Marques JN, Pereira GD, da Silva EM, Simão RA (2017)**
Evaluation of different surface treatments on fiber post cemented with a self-adhesive system.
Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 77:257-62

96. **Prati C, Chersoni S, Mongiorgi R, Montanari G, Pashley DH (1999)**
Thickness and morphology of resin-infiltrated dentin layer in young, old, and sclerotic dentin.
Oper Dent. 24(2):66-72.
97. **Proano P, Pfeiffer P, Nergiz I, Niedermeier W (1998)**
Shear bond strength of repair resin using an intraoral tribochemical coating on ceramometal, ceramic, and resin surfaces.
J Adh Sci And Tec 12(10):1121-35
98. **Publido CA, de Oliveira Franco AP, Gomes GM, Bittencourt BF, Kalinowski HJ, Gomes JC, Gomes OM (2016)**
An in Situ evaluation of the polymerization shrinkage, degree of conversion and bond strength of resin cements used for luting fiber posts.
J Prosthet Dent. 116(4):570-6
99. **Rathke A, Frehse H, Muche R, Haller B (2014)**
Durability of fiber post-to-composite bonds achieved by physical vapor deposition and tribochemical silica coating.
J Adhes Dent. 16(6):559-65
100. **Reginato CF, Oliveira AS, Kaizer MR, Jardim PS, Moraes RR (2013)**
Polymerization efficiency through translucent and opaque fiber posts and bonding to root dentin.
J Prosthodont Res. 57(1):20-3
101. **Rezende EC, Gomes GM, Szesz AL, da Silveira Bueno CE, Reis A, Loguercio AD (2016)**
Effects of Dentin Moisture on Cementation of Fiber Posts to Root Canals.
J Adhes Dent. 18(1):29-33
102. **Rodrigues RV, Sampaio CS, Pacheco RR, Pascon FM, Puppini-Rontani RM, Giannini M (2017)**
Influence of adhesive cementation systems on the bond strength of relined fiber posts to root dentin.
J Prosthet Dent. 118(4):493-9
103. **Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K (2003)**
Bond strength of resin cement to dentin and to surface treated posts to titanium alloy, glass fiber and zirconia.
J Adhes Dent. 5(2):153-62
104. **Salerno M, Derchi G, Thorat S, Ceseracciu L, Ruffilli R, Barone AC (2011)**
Surface morphology and mechanical properties of new-generation flowable resin composites for dental restoration.
Dent Mater. 27(12):1221-8
105. **Santos AF, Meira JB, Tanaka CB, Xavier TA, Ballester RY, Lima RG, Pfeifer CS, Versluis A (2010)**
Can Fiber Posts increase root stresses and reduce fracture?
J Dent Res. 89(6):587-91
106. **Santos Pantaleón D, Morrow BR, Cagna DR, Pameijer CH, Garcia-Godoy F (2018)**
Influence of remaining coronal tooth structure on fracture resistance and failure mode of restored endodontically treated maxillary incisors.
J Prosthet Dent. 119(3):390-6

107. **Sapone J, Lorencki SF (1981)**
An endodontic-prosthodontic approach to internal tooth reinforcement.
J Prosthet Dent. 45(2):164-74
108. **Schmage P, Nergiz I, Platzer U (1992)**
Messungen der Zementfuge bei Wurzelstiften mit verschiedenen
Oberflächen.
Dtsch. Zahnärztl. Z. 47:785-788
109. **Schmage P, Nergiz I, Czajkowska A, Platzer U (2003)**
Retentive strength of root posts influenced by endodontic treatment.
J Dent Res 82:B-53 Nr 0327
110. **Schmage P, Sohn J, Nergiz I, Özcan M (2004)**
Various conditioning methods for root canals influencing the tensile
strength of titanium posts.
J Oral Rehabil. 31(9):890-4
111. **Schmage P, Sohn J, Özcan M, Nergiz I (2006)**
Effect of surface treatment of titanium posts on tensile bond strength.
Dent Mater. 22(2):189-94
112. **Schmage P, Pfeiffer P, Pinto E, Platzer U, Nergiz I (2009a)**
Influence of oversized dowel space preparation on the bond strengths of
FRC posts.
Oper Dent. 34(1):93-101
113. **Schmage P, Cakir FY, Nergiz I, Pfeiffer P (2009b)**
Effect of surface conditioning on the retentive bond strength of
fiberreinforced composite posts.
J Prosthet Dent. 102(6):368-77
114. **Schmage P, Yalcin Cakir F, Nergiz I, Selcuk F, Pfeiffer P (2011)**
Retentive Force of FRC Posts Inserted with Core Build-up Composites
and Resin Cements.
J adhes Sci and Tec 25(16):2023-38
115. **Schmage P, Nergiz I, Markopoulou S, Pfeiffer P (2012a)**
Resistance against pull-out force of prefabricated coated FRC posts.
J Adhes Dent. 14(2):175-82
116. **Schmage P, Nergiz I, Sito F, Rosentritt M (2012b)**
Preparation time and surface roughness of core foundation resins and
dentin.
J Prosthet Dent. 108(4):244-9
117. **Schönbrodt M, Schmage P, Nergiz I, Platzer U (2003)**
Haftfestigkeit zahnfarbener Wurzelstifte in Abhängigkeit von der
Oberflächenbehandlung und dem Befestigungs.
Dsch. Zahnärztl. Z. 58:55-9
118. **Scotti N, Coero Borga FA, Alovise M, Bergantin E, Marchionni S,
Pasqualini D, Berutti E (2014)**
Fiber post bond strength in canals obturated with a cross-linked gutta
percha core obturator.
Eur J Oral Sci. 122(2):168-73
119. **Sen H, Schmage P, Platzer U, Nergiz I (2005)**
Retentive bond strength of conventional and radiopaque FRC posts.
J. Dental Research 84a:IADR Abstr 0667

120. **Serafino C, Gallina G, Cumbo E, Ferrari M (2004)**
Surface debris of canal walls after post space preparation in endodontically treated teeth: A scanning electron microscopic study. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Endod. 97(3):381-7
121. **Shillingburg HT Jr, Fisher DW, Dewhirst RB (1970)**
Restoration of endodontically treated posterior teeth. J Prosthet Dent 24(4):401-9
122. **Smith CT, Schuman N (1997)**
Restoration of endodontically treated teeth: A guidance for the restorative dentist. Quintessenz Int. 28(7):457-62
123. **Soares CJ, Pereira JC, Valdivia AD, Novais VR, Meneses MS (2012)**
Influence of resin cement and post configuration on bond strength to root dentine. Int Endod J. 45(2):136-45
124. **Sorensen JA, Martinoff JT**
Clinically significant factors in dowel design. J prosthet Dent. 52(1): 28-35
125. **Soundar SI, Suneetha TJ, Angelo MC, Kovoov LC (2014)**
Analysis of Fracture Resistance of Endodontically Treated Teeth Restored with Different Post and Core System of Variable Diameters: An In Vitro Study. J Indian Prosthodont Soc. 14(2):144-50
126. **Stewardson DA, Shortall AC, Marquis PM, Lumley PJ (2010)**
The flexural properties of endodontic post materials. Dent Mater. 26(8):730-6
127. **Stylianou A, Burgess JO, Liu PR, Givan DA, Lawson NC (2017)**
Light-transmitting fiber optic posts: An in vitro evaluation. J Prosthet Dent. 117(1):116-23
128. **Toman M, Toksavul S, Tamaç E, Sarikanat M, Karagözoğlu I (2014)**
Effect of chlorhexidine on bond strength between glass-fiber post and root canal dentine after six month of water storage. Eur J Prosthodont Restor Dent. 22(1):29-34
129. **Turker SB, Alkumru HN, Akalin B (2016)**
Fracture resistance of endodontically treated canines restored with different sizes of fiber post and all-ceramic crowns. J Adv Prosthodont. 8(2):158-66
130. **Valandro LF, Yoshiga S, de Melo RM, Galhano GA, Mallmann A, Marinho CP, Bottino MA (2006)**
Microtensile bond strength between a quartz fiber post and a resin cement: effect of post surface conditioning. J adhesiv Dent. 8(2):151-7
131. **Vichi A, Grandini S, Davidson DL, Ferrari M (2002)**
An SEM evaluation of several adhesive systems used for bonding fiber posts under clinical conditions. Dent Mater. 18(7):495-502.
132. **Waliszewski KJ, Sabala CL (1978)**
Combined endodontic and restorative treatment considerations. J Prosth Dent. 40(2):152-6

133. **Wandscher VF, Bergoli CD, Limberger IF, Ardenghi TM, Valandro LF (2014)**
Preliminary Results of the Survival and Fracture Load of Roots Restored With Intracanal Posts: Weakened vs Nonweakened Roots.
Oper Dent. 39(5):541-55
134. **Webber MBF, Bernardon P, França FMG, Amaral FLB, Basting RT, Turssi CP (2018)**
Oval Versus Circular-Shaped Root Canals: Bond Strength Reached with Varying Post Techniques.
Braz Dent J. 29(4):335-41
135. **Weine FS, Wax AH, Wenckus CS (1991)**
Retrospective study of tapered, smooth post systems in place for 10 years and more.
J Endod. 17(6):293-7
136. **Wu MK, Pehlivan Y, Kontakiotis EG, Wesselink PR (1998)**
Microleakage along apical root fillings and cemented posts.
J Prosthet Dent. 79(3):264-9
137. **Xie H, Li Q, Zhang F, Lu Y, Tay FR, Qian M, Chen C (2016)**
Comparison of resin bonding improvements to zirconia between one-bottle universal adhesives and tribochemical silica coating, which is better?
Dent Mater 32(3):403-11
138. **Xiong J, Shen L, Jiang Q, Luo B (2019)**
Bonding Quality of Etch-and-Rinse Adhesives in Root Canals upon Different Pretreatments.
J Adhes Dent. 21(1):27-36
139. **Yun X, Li W, Ling C, Fok A (2013)**
Effect of artificial aging on the bond durability of fissure sealants.
J Adhes Dent. 15(3):251-8
140. **Zandgiglari T, Davids H, Schäfer E (2006)**
Influence of instrument taper on the resistance to fracture of endodontically treated roots.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 101(1):126-31
141. **Zicari F, De Munck J, Scotti R, Naert I, Van Meerbeek B (2012)**
Factors affecting the cement–post interface.
Dent Mater. 28(3):287-97
142. **Zogheib LV, Saavedra Gde S, Cardoso PE, Valera MC, Araújo MA (2011)**
Resistance to compression of weakened roots subjected to different root reconstruction protocols.
J Appl Sci. 19(6):648-54

8. DANKSAGUNG

Für die Anregung und Überlassung des Themas sowie die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei Frau **Prof. Dr. Petra Schmage** bedanken.

Auch **Prof. Dr. Ibrahim Nergiz** danke ich für die Unterstützung.

Prof. Dr. Peter Pfeiffer gilt mein Dank für die Hilfe bei der statistischen Auswertung.

Herrn Frank Fischer (chemisch-technischer Assistent) danke ich ebenfalls für die freundliche Unterstützung während der Promotion.

Der Firma **Komet**, Lemgo danke ich für die Überlassung der Materialien.

9. Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den verwendeten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: