

Aus dem  
Charité Centrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Institut für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre

DISSERTATION

**Die postendodontische Rekonstruktion mit  
gebündelten faserverstärkten Aufbaustiften – Einfluss des  
Insertionsverfahrens und der Stifteanzahl auf den  
Haftverbund und Inhomogenitäten im Wurzelkanal**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von Luis Felipe Läser (geb. Falcon)  
aus Lima, Peru

Datum der Promotion: 18.09.2020

# INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	0
ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS.....	5
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	8
ABSTRACT (English).....	9
ABSTRACT (Deutsch) .....	11
1 EINFÜHRUNG .....	13
1.1 Rückblick zur Entwicklung der Stiftsysteme.....	13
Herstellungsart (Methoden und Verfahren) .....	13
Funktionalität und Formgestaltung .....	13
Material .....	14
1.2 Auswahl des Stiftsystems sowie Voraussetzungen zum Stiftaufbau ....	18
Ferrule – Zwei-Millimeter-Dentinmanschette.....	19
1.3 Einflussfaktoren auf den Haftverbund zwischen Aufbaustift und Wurzelkanalentin.....	21
Art des Sealers.....	21
Spülprotokoll .....	21
Adhäsive Techniken .....	22
Vorbehandlung des Aufbaustiftes .....	23
1.4 Restaurationskonzepte zum postendodontischen Aufbau und Vorhandensein von Inhomogenitäten .....	25
Multimode Adhäsive .....	25
Komposit .....	26
Inhomogenitäten .....	27
1.5 Konzepte zu gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften.....	28
2 ZIEL DER UNTERSUCHUNG.....	29
Nullhypothesen .....	30

3	MATERIAL UND METHODIK .....	31
3.1	Material .....	31
3.1.1	Zahnproben .....	31
3.1.1	Stiftsysteme .....	31
	Gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte aus Methacrylat-Basis (Rebilda Post GT, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven) .....	31
	Solitärer Kompositstift aus Methacrylat-Basis (Rebilda Post, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven) – erste Kontrollgruppe .....	34
	Solitärer Glasfaserstift aus Epoxidharzbasis (ER Dentin Post, Komet®, Deutschland, Lemgo) – zweite Kontrollgruppe .....	35
3.1.3	Verbundsysteme .....	36
	Haftvermittler (Ceramic Bond, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven) .....	36
	Multimode Adhäsiv (Futura Bond U, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven) .....	36
	Befestigungskomposit (Rebilda DC, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven) .....	36
3.2	Durchführung der Untersuchung .....	37
3.2.1	Probenvorbereitung .....	37
3.2.2	Versuchsaufbau .....	38
3.2.3	Insertion der Stifte .....	40
	Insertionsverfahren – direkt .....	43
	Insertionsverfahren – Spreader .....	44
	Insertionsverfahren – Ultraschall .....	45
3.2.4	Probenherstellung (Dentinscheiben) .....	46
	Einbetten der Zahnproben .....	47
	Sägen der Zahnproben und Beschriftung der Dentinscheiben .....	48
3.3	Ermittlung der Haftkraft .....	49
3.3.1	Kalkulation der Haftfläche .....	49

3.3.2 Ausstoßversuche, thermische Belastung mit Thermocycling und .... Lagerung .....	51
3.4 Optische Auswertung der Homogenität der Verbundschicht.....	53
3.4.1 Art der Inhomogenitäten .....	53
Blasenbildung.....	53
Spaltbildung .....	53
Adhäsiv-Überschuss .....	54
Sealer- und Guttapercharestes .....	54
3.4.2 Größe der Inhomogenitäten.....	55
3.4.3 Unterteilung der Inhomogenitäten .....	57
3.5 Optische Analyse der Frakturmuster .....	59
Kompromiss des Dentins .....	59
3.6 Statistische Auswertung.....	60
4 ERGEBNISSE .....	61
4.1 Haftkraft anhand des Stiftsystems, des Insertionsverfahrens und der Lagerung .....	61
4.2 Homogenität der Verbundschicht.....	64
Inhomogenitäten nach Stiftsystem und Insertionsverfahren.....	64
4.3 Haftkraft anhand der Lage im Wurzelkanal und Einfluss der thermischen Belastung .....	72
4.4 Ergebnisse zum Frakturmuster .....	73
Adhäsives Frakturmuster .....	73
Kohäsives Frakturmuster .....	75
Gemischtes Frakturmuster .....	76
5 DISKUSSION .....	78
5.1 Diskussion der Methodik.....	78
Probensammlung und Lagerung .....	78
Vorbehandlung der Proben .....	79

Insertionsverfahren.....	81
Probenherstellung und thermische Belastung .....	81
Ausstoßversuche .....	83
5.2 Diskussion der Ergebnisse .....	84
Einfluss des Stiftsystems.....	84
Einfluss der Insertionsverfahren und der Stiftanzahl .....	86
Einfluss des Vorhandenseins von Inhomogenitäten.....	87
Frakturmuster, thermische Belastung und Lagerung .....	88
6 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK .....	89
7 LITERATURNACHWEISE .....	90
8 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....	99
Anteilerklärung an etwaigen erfolgten Publikationen .....	99
9 LEBENSLAUF .....	102
10 DANKSAGUNGEN.....	104

# ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

## Abbildungen

Abbildung 1: Makroskopische (klinische) Darstellung – Rebuilda Post GT .....	33
Abbildung 2: Radiologische Darstellung – Rebuilda Post GT .....	33
Abbildung 3: Dekapitieren der Proben und Fixierung in Silikonbasis .....	38
Abbildung 4: Standard-Stiftbettpräparationen von 8 mm.....	38
Abbildung 5: Trockenlegung mit Papierspitzen .....	40
Abbildung 6: Silanisierung des Stifts .....	41
Abbildung 7: Keine Einprobe der Stifte .....	41
Abbildung 8: Konditionierung des koronalen Dentins.....	42
Abbildung 9: Konditionierung des Wurzelzementins .....	42
Abbildung 10: Applikation des Befestigungskomposits .....	43
Abbildung 11: Direktes Insertionsverfahren von Rebuilda Post GT .....	44
Abbildung 12: Insertionsverfahren mit Spreader – Rebuilda Post GT .....	45
Abbildung 13: Insertionsverfahren mit Ultraschall – Rebuilda Post GT .....	46
Abbildung 14: Einbetten der Dentinproben .....	47
Abbildung 15: Fixierung der Dentinproben nach der Einbettung .....	47
Abbildung 16: Sägen der Dentinproben .....	48
Abbildung 17: Beschriftung jeder einzelnen Dentinscheibe .....	48
Abbildung 18: Kalkulation der Haftfläche .....	49
Abbildung 19: Mikroskopische Darstellung – Rebuilda Post GT .....	50
Abbildung 20: Messung des Durchmessers unter dem Mikroskop <b>R1–R2</b> ....	50
Abbildung 21: Messung der Höhe jeder Dentinscheibe – <b>h</b> .....	50
Abbildung 22: Simulation der Ausstoßversuche.....	52
Abbildung 23: Blasenbildung.....	53
Abbildung 24: Spaltbildung .....	54
Abbildung 25: Adhäsiv-Überschuss .....	54
Abbildung 26: Sealer-Reste .....	54
Abbildung 27: Guttapercharesten .....	55
Abbildung 28: Keine Inhomogenität (Gleichmäßigkeit) .....	55
Abbildung 29: Sehr klein (in diesem Bild: Blasenbildung) .....	55
Abbildung 30: Klein (in diesem Bild: Blasenbildung) .....	56
Abbildung 31: Mittel (in diesem Bild: Spaltbildung) .....	56

Abbildung 32: Groß (in diesem Bild: Spaltbildung).....	56
Abbildung 33: Sehr groß (in diesem Bild: Spaltbildung) .....	57
Abbildung 34: Inhomogenitäten im Wurzelkanal bei Rebilda Post GT 6 .....	65
Abbildung 35: Inhomogenitäten im Wurzelkanal bei Rebilda Post GT 12 .....	66
Abbildung 36: Homogene Probe (Rebilda Post GT 6).....	66
Abbildung 37: Homogene Probe (Rebilda Post GT 6).....	67
Abbildung 38: Homogene Probe (Rebilda Post GT 12).....	67
Abbildung 39: Homogene Probe (Rebilda Post GT 12).....	67
Abbildung 40: Homogene Probe (Rebilda Post) .....	68
Abbildung 41: Homogene Probe (Dentin Post) .....	68
Abbildung 42: Leicht inhomogene Probe (Rebilda Post GT 6).....	68
Abbildung 43: Leicht inhomogene Probe (Rebilda Post GT 12).....	69
Abbildung 44: Leicht inhomogene Probe (Rebilda Post).....	69
Abbildung 45: Leicht inhomogene Probe (Dentin Post).....	69
Abbildung 46: Inhomogene Probe (Rebilda Post GT 6) .....	70
Abbildung 47: Inhomogene Probe (Rebilda Post GT 12) .....	70
Abbildung 48: Inhomogene Probe (Rebilda Post) .....	70
Abbildung 49: Inhomogene Probe (Dentin Post).....	71
Abbildung 50: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 6).....	74
Abbildung 51: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post).....	74
Abbildung 52: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 6).....	74
Abbildung 53: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 6).....	75
Abbildung 54: Kohäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 12).....	76
Abbildung 55: Kohäsives Frakturmuster (Rebilda Post).....	76
Abbildung 56: Gemischtes Frakturmuster (Rebilda Post GT 6) .....	77
Abbildung 57: Gemischtes Frakturmuster (Rebilda Post GT 6) .....	77

## **Tabellen**

Tabelle 1: Vor- und Nachteile verschiedener Stiftsysteme.....	18
Tabelle 2: Produktpräsentationen Rebilda Post GT nach Herstellerangaben	32
Tabelle 3: Materialdaten zu Rebilda Post GT nach Herstellerangaben.....	33
Tabelle 4: Produktpräsentationen Rebilda Post nach Herstellerangaben .....	34
Tabelle 5: Materialdaten zu Rebilda Post nach Herstellerangaben.....	35

Tabelle 6: Materialdaten zu ER Dentin Post nach Herstellerangaben.....	35
Tabelle 7: Studiendesign.....	40
Tabelle 8: Kriterien zur Auswertung der Homogenität.....	58
Tabelle 9: Inhomogenitäten nach Stiftsystem und Insertionsverfahren .....	65
Tabelle 10: Adhäsives Frakturmuster je Stiftsystem .....	73
Tabelle 11: Kohäsives Frakturmuster je Stiftsystem .....	75
Tabelle 12: Gemischtes Frakturmuster je Stiftsystem .....	77

### **Grafiken**

Grafik 1: Haftwerte nach Stiftsystem .....	61
Grafik 2: Haftwerte nach Insertionsverfahren.....	62
Grafik 3: Haftwerte nach thermischer Belastung und Lagerung.....	62
Grafik 4: Box Splot – Zusammenfassung der Ergebnisse.....	63
Grafik 5: Haftwerte je Wurzelregion .....	72



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

GPa	Gigapascal
E-Modul	Elastizitätsmodul
C-Faktor	Verhältnis gebundener zu ungebundener Oberfläche
F.max	maximale erreichte Kraft
ErYAG	(Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ) Erbium-Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
°C	Grad Celcius

## **ABSTRACT (English)**

### ***Objectives:***

The aim of this study was to evaluate the bond strengths inside the root canal and the homogeneity of the luting resin according to the application mode and number of posts by adhesively luted glass-fiber bundles compared with a conventional glass-fiber post.

### ***Materials and method:***

104 upper human incisors were randomly divided into eight groups (n = 13), endodontically prepared (Wave-One-Gold, Dentsply-Maillefer; Ballaigues, Switzerland) and filled using the warm vertical compaction technique. The post space preparations of 8 mm were performed with a Ø 1.5 mm drill (RebildaPost, VOCO; Cuxhaven, Germany). Fiber bundles of 6 and 12 glass-fibers, respectively, were inserted using a multimode adhesive (Futurabond-U; VOCO) and a dual-curing composite (Rebilda-DC, VOCO) with the following application methods:

1. direct insertion using tweezers
2. spacing out the posts using a spreader
3. application of ultrasound after inserting the posts

Two conventional glass-fiber posts were inserted as control groups (RebildaPost, VOCO; and DentinPost, Komet, Lemgo, Germany). The roots were sectioned into six 1 mm thick serial slices and measured via microscopic analysis (Keyence-VHX5000, Keyence; Neu-Isenburg, Germany). Push-out testing was performed (Zwick, Roell; Ulm, Germany) to determinate the bond strengths within the root canal; for each specimen, three slices within the first 48 hours and the remaining three after thermocycling (6,000 cycles, 5–55°C) and six months of storage (in 0.9% NaCl at 37°C). Homogeneity and failure mode were analyzed using a multi-focus microscope (Keyence-VHX5000; Keyence).

**Results:**

Mean push-out bond strengths (MPa) were influenced by neither application mode ( $p = 0.544$ ) nor thermocycling/storage ( $p = 0.098$ ). However, these were significantly affected by the post system ( $p < 0.0005$ ) and location inside the root canal ( $p = 0.004$ ; repeated measurement-ANOVA). The bond strengths of fiber bundles consisting of 6 ( $13.2 \pm 4.7$ ) and 12 fibers ( $14.5 \pm 4.3$ ) demonstrated no considerable differences compared with Rebuilda Post ( $13.67 \pm 3.2$ ) but significantly higher values than that of Dentin Post ( $8.7 \pm 3.02$ ). A significant effect of post type was observed regarding the formation of inhomogeneities. These were detected among 35.5% to 43.1% of the fiber bundle samples, irrespective of the number of fibers and application mode, and among 24.4% to 27.3% of the solid posts ( $p = 0.010$ ; chi-squared test).

**Conclusion:**

Bundled glass-fiber posts showed bond strengths similar to those of conventional glass-fiber posts without considerable influence regarding the application mode. Regardless of the post system and the number of posts, various inhomogeneities were noticed within the luting resin.

## **ABSTRACT (Deutsch)**

### ***Ziel:***

Das Ziel dieser Studie besteht darin, die Haftkraft im Wurzelkanal sowie die Homogenität der Kompositfuge in Abhängigkeit vom Insertionsverfahren und der Stiftanzahl bei gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften im Vergleich zu konventionellen solitären Stiften zu untersuchen.

### ***Material und Methodik:***

Insgesamt wurden 104 obere humane Incisivi nach dem Zufallsprinzip in acht Gruppen aufgeteilt (n = 13), endodontisch behandelt (Wave One Gold, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) und mit der warmen vertikalen Kondensationstechnik gefüllt. Die Stiftbettpräparationen von 8 mm wurden mit einem Bohrer (Ø 1,5 mm) (Rebilda Post, VOCO, Cuxhaven, Deutschland) durchgeführt. Gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte aus sechs bzw. zwölf Glasfasern wurden mit einem *multimode* Adhäsiv (Futurabond U; VOCO) und einem dualhärtenden Befestigungskomposit (Rebilda DC, VOCO) mit folgenden Insertionsverfahren eingesetzt:

1. direkte Insertion mit einer Pinzette
2. Aufspreizung der Stifte mit Spreader
3. Anwendung von Ultraschall nach Insertion

Zwei konventionelle, solitäre glasfaserverstärkte Stiftsysteme wurden als Kontrollgruppe eingeführt (Rebilda Post, VOCO, sowie Dentin Post, Komet, Lemgo, Deutschland). Die Wurzeln wurden in sechs 1 mm dicke Scheiben geschnitten und durch mikroskopische Analyse (Keyence VHX5000, Keyence; Neu-Isenburg, Deutschland) gemessen. Es wurden Ausstoßversuche aller Dentin-Scheiben vorgenommen (Universalprüfmaschine Zwick, Roell, Ulm, Deutschland). Um die Haftkraft im Wurzelkanal zu bestimmen, wurden von jeder Probe drei Dentin-Scheiben innerhalb der ersten 48 Stunden und die anderen drei Scheiben nach Thermocycling (6.000 Zyklen, 5–55 °C) und sechsmonatiger Lagerung (in 0,9 % NaCl bei 37 °C) getestet. Die Homogenität und das Frakturmuster jeder Scheibe wurden unter Verwendung eines Mikroskops (Keyence VHX5000; Keyence) analysiert.

### ***Ergebnisse:***

Die Haftwerte (MPa) wurden weder durch das Insertionsverfahren ( $p = 0,544$ ) noch durch das Thermocycling/Lagerung ( $p = 0,098$ ) beeinflusst. Es bestand indes ein signifikanter Einfluss durch das Stiftsystem ( $p < 0,0005$ ) und die Lage im Wurzelkanal ( $p = 0,004$ , wiederholte Messung der ANOVA). Die Haftwerte der gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte aus sechs ( $13,2 \pm 4,7$ ) und zwölf Stiften ( $14,5 \pm 4,3$ ) zeigten im Vergleich zu Rebuilda Post ( $13,67 \pm 3,2$ ) keine wesentlichen Unterschiede, indes signifikant höhere Haftwerte als die von Dentin Post ( $8,7 \pm 3,02$ ). Ein signifikanter Effekt des Stiftsystems wurde auf die Bildung von Inhomogenitäten beobachtet. Diese wurden bei 35,5 % bis 43,1 % der gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte, unabhängig von der Stiftanzahl oder Insertionsverfahren, sowie bei 24,4 % bis 27,3 % der solitären Stifte nachgewiesen ( $p = 0,010$ ; Chi-Quadrat-Test).

### ***Zusammenfassung:***

Gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte offenbarten ähnliche Haftwerte wie konventionelle solitäre Stiftsysteme ohne wesentlichen Einfluss des Insertionsverfahrens. Unabhängig vom Stiftsystem und der Stiftanzahl wurden verschiedene Inhomogenitäten innerhalb des Befestigungskomposits festgestellt.

# 1 EINFÜHRUNG

## 1.1 Rückblick zur Entwicklung der Stiftsysteme

Die Restauration endodontisch behandelter Zähne mit Aufbaustiften befindet sich seit ihrem Ursprung in einer permanenten Entwicklung (Qualtrough & Mannocci, 2003). In der Literatur wird eine Vielzahl unterschiedlicher Stiftsysteme beschrieben (Fernandes, Shetty, & Coutinho, 2003).

Die Klassifizierung der Aufbaustifte kann in Abhängigkeit von der Herstellungsart, der Funktionalität und Formgestaltung sowie vom Stiftmaterial erfolgen (Edelhoff & Spiekermann, 2003).

### ***Herstellungsart (Methoden und Verfahren)***

Die Herstellungsmethoden beziehen sich auf die Vorgehensweise des Behandlers. Bei einem direkten Stiftaufbau wird die Mitarbeit des Zahntechnikers nicht benötigt, während bei einem indirekten Stiftaufbau der Stift nach Maßgabe des Zahnarztes im Labor individuell angefertigt wird (Edelhoff, Spiekermann, & Yildirim, 2000).

Je nach Herstellungsverfahren sind Aufbaustifte nicht konfektioniert, wenn sie im Labor angefertigt werden. Sie sind konfektioniert, wenn sie industriell bereits vorgefertigt sind und in der gleichen Sitzung eingesetzt werden können (Heydecke, Butz, Hussein, & Strub, 2002).

### ***Funktionalität und Formgestaltung***

Als besonders relevante Aspekte sind Funktionalität und Formgestaltung des Aufbaustiftes zu berücksichtigen; diesbezüglich kann eine Unterteilung in aktive und passive Stifte erfolgen (Edelhoff & Spiekermann, 2003). Aktive Stifte sind grundsätzlich Gewindestifte und können durch übermäßigen Substanzverlust ein hohes Frakturrisiko zur Folge haben (Edelhoff & Spiekermann, 2003). Im Rahmen einer fünf Jahre dauernden *In-vivo*-Studie konnte festgestellt werden, dass Gewindestifte im Vergleich zu Glasfaserstiften häufiger zu Komplikationen neigen, beispielsweise bei

Wurzelfrakturen, die Zahnextraktionen zur Folge hatten (Schmitter, Hamadi, & Rammelsberg, 2011).

Passive Stifte unterteilen sich in konische, zylindrische und konisch-zylindrische. Konische Aufbaustifte bieten eine geringere Retention als zylindrische Aufbaustifte (Edelhoff & Spiekermann, 2003). Zylindrische Aufbaustifte zeigen indes einen erhöhten apikalen Substanzverlust im Vergleich zu den konischen Aufbaustiften; darüber hinaus besteht die Gefahr einer ungünstigen Modifizierung der intraradikulären Geometrie (Lang, Korkmaz, Schneider, & Raab, 2006).

Konisch-zylindrische Aufbaustifte kombinieren pauschal formuliert die Eigenschaften der beiden vorgenannten und weisen eine gute Retention mit geringerem apikalen Substanzverlust auf. Gleichwohl sollte dabei eine ungleichmäßige Spannungsverteilung entstehen (Edelhoff et al., 2003; Janssen et al., 2003).

Mittels einer *In-vitro*-Studie wurde eruiert, dass das Frakturrisiko proportional zur Menge der verlorenen Substanz zunahm (Tang, Wu, & Smales, 2010). Zudem sollten weiterhin beispielsweise die Position des Zahnes oder der Grad koronaler Zerstörung als Einflussfaktoren berücksichtigt werden (Schmitter et al., 2011). Darüber hinaus deuten diverse Studien darauf hin, dass stark invasive Techniken und nichtkongruente Stiftbettpräparationen zu klinischen Misserfolgen führen können (Kishen, Kumar, & Chen, 2004; Lang et al., 2006).

## **Material**

Hinsichtlich der Materialien kann auf Metall, Keramik und Komposit zurückgegriffen werden. Für die Auswahl sind biomechanische Kriterien zu beachten, wobei auch der ästhetische Aspekt nicht vernachlässigt werden darf (Nergiz & Schmage, 2004).

Metallische Aufbaustifte aus Edelmetall, Nichtedelmetall oder Titanlegierungen sind jahrelang unter gewissen Bedingungen, beispielsweise Krone-Stift-Relation oder eine präzise Passung im Wurzelkanal, verwendet worden (Qualtrough & Mannocci, 2003). Zu den Vorteilen zählen eine große Angebotsvielfalt, klinische Langzeiterfahrung sowie eine hohe Opazität in Röntgenaufnahmen (Edelhoff &

Spiekermann, 2003). Nichtsdestotrotz weisen metallische Aufbaustifte ein höheres Elastizitätsmodul als Dentin auf (Galhano, Valandro, de Melo, Scotti, & Bottino, 2005). Ungünstige Frakturstellen im apikalen Bereich verhindern die Erhaltung eines Zahnes und haben dessen Verlust zur Folge (Galhano et al., 2005).

Durch gelegentlich zahntechnisch nicht kaschierbare Farbveränderungen war oftmals die Ästhetik, vor allem im Frontzahnbereich, eingeschränkt. In diesem Kontext wurden alternativ keramische Stifte angeboten, die den ästhetischen Anforderungen entsprechen sollten (Janssen & Hülsmann, 2003). Keramische Aufbaustifte bestehen grundsätzlich aus Zirkoniumdioxid-Keramik, besitzen gute optische Eigenschaften und zeichnen sich durch Korrosionsbeständigkeit aus (Edelhoff & Kern, 2003). Ungeachtet dessen stellte eine *In-vitro*-Studie keinen Unterschied hinsichtlich der Frakturresistenz keramischer Aufbaustifte im Vergleich zu Titanstiften fest (Butz, Lennon, Heydecke, & Strub, 2001). Ferner konnte später im Rahmen einer *In-vitro*-Studie herausgefunden werden, dass die Anwendung rigider Wurzelkanalstifte mit geringerem Elastizitätsmodul Spannungsstellen im zervikalen Bereich verursacht, was den Verbund mit Wurzelkanaldentin in negativer Form beeinflusst (Bottino, Baldissara, Valandro, Galhano, & Scotti, 2007). Außerdem wurde bei der gleichen *In-vitro*-Studie der Haftverbund bei Zirkonoxid-Aufbaustiften signifikant durch Ermüdung und periodische Belastung benachteiligt (Bottino et al., 2007). Im Rahmen einer *In-vivo*-Studie konnten weder Retentionsverluste noch Frakturen bei Zirkonoxid-Aufbaustiften registriert werden, allerdings bei einer reduzierten Beobachtungszeit von durchschnittlich 29 Monaten (Nothdurft & Pospiech, 2006). Eine spätere klinische Studie gelangte nach zehn Jahren zu dem Ergebnis, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit für Zähne mit Zirkonoxid-Aufbaustiften 81,3 % betrug. Jedoch zeigte diese Studie eine hohe Ausstiegsquote von Teilnehmern (Bateli, Kern, Wolkewitz, Strub, & Att, 2014).

Bei der Suche nach neuen Materialien, deren Eigenschaften mit der komplexen Biodynamik der Zähne kompatibel sind, entstanden die sog. faserverstärkten Aufbaustifte (Bateman, Ricketts, & Saunders, 2003). Ein großer Vorteil gegenüber Metall- und Zirkonoxid-Stiftsystemen besteht darin, dass der E-Modul der faserverstärkten Wurzelkanalstifte [20-40 GPa] nicht erheblich vom E-Modul des Dentins [18 GPa] abweicht (Galhano et al., 2005). In einer *In-vitro*-Studie aus dem Jahr 2005 konnte nachgewiesen werden, dass aufgrund dieser biomechanischen



Ähnlichkeiten die Anzahl der fatalen Wurzelfrakturen signifikant geringer war (Asmussen, Peutzfeldt, & Sahafi, 2005).

Faserverstärkte Aufbaustifte besitzen eine Matrix aus Epoxidharz oder Methacrylat und unterscheiden sich hauptsächlich im Material ihrer Faserverstärkung (Ehrenstein, 2006). Im Rahmen einer klinischen, ein Jahr dauernden Studie wurde herausgefunden, dass glasfaserverstärkte Aufbaustifte mit Kompositaufbau beim postendodontischen Aufbau einwurzeliger oberer Frontzähne eine höhere Erfolgsrate im Vergleich zu karbonfaserverstärkten Aufbaustiften erzielten (Preethi & Kala, 2008). Zudem zeigte eine spätere *In-vitro*-Studie, dass glasfaserverstärkte Aufbaustifte in allen Wurzel Dritteln eine signifikant höhere Retention als karbonfaserverstärkte Aufbaustifte erreichen können (Topcu et al., 2010). Dessen ungeachtet können die Fasern karbonfaserverstärkter Aufbaustifte aufgrund ihrer dunklen Farbe in Bereichen von ästhetischer Bedeutung optisch unbefriedigend wirken (Glazer, 2000; Vichi, Ferrari, & Davidson, 2000). Hinsichtlich der Entstehung von Mikrospalten zwischen den Grenzschichten – *Microleakage* – wurde im Rahmen einer *In-vitro*-Studie festgestellt, dass nichtmetallische Aufbaustifte weniger *Microleakage* im Vergleich zu einem präfabrizierten metallischen Aufbaustift aufwiesen (Jung et al., 2007).

Aus allen vorgenannten Gründen sind glasfaserverstärkte Kompositstifte häufiger das Material der Wahl. Grundsätzlich ist für diese Stiftsysteme das *Chairside*-Verfahren mit adhäsiver Technik vorgesehen, womit auch ein vergleichsweise geringer Arbeitsaufwand verbunden ist (Naumann & Blankenstein, 2002). Abgesehen von den dentinähnlichen biomechanischen Eigenschaften bildet die leichte Entfernbareit der glasfaserverstärkten Kompositstifte einen weiteren positiven Aspekt (Ferrari, Vichi, & Garcia-Godoy, 2000).

Aus der vorteilhaften Biegefestigkeit resultiert allerdings gleichzeitig hinsichtlich der Biodynamik eine geringere Ermüdungsbeständigkeit, was häufiger zu Stifftrakturen führt (Naumann, Blankenstein, & Dietrich, 2005). Es besteht die Annahme, dass die geringe Wärmeresistenz und -leitfähigkeit des Materials zur Folge haben könnte, dass bei Temperaturschwankungen innere Spannungen entstehen, was Stifftrakturen bedingen würde (Ehrenstein, 2006). Zusätzlich konnte anhand einer *In-vitro*-Studie Folgendes nachgewiesen werden: Umso höher die Mikropermeabilität des Adhäsivs ist, desto höher ist das Risiko von Defekten an der Grenzfläche zwischen Dentin und

Komposit. Diese Defekte könnten einen hydrolytischen und enzymatischen Abbau vom Verbund im Laufe der Zeit bewirken (Sauro et al., 2008)

Aufgrund der lange währenden Entwicklung finden sich auf dem Markt diverse Stiftsysteme, die im idealen theoretischen Fall die Eigenschaften von Dentin imitieren und eine adhäsive Befestigung ermöglichen (Chieruzzi et al., 2012).

Mittels einer *In-vitro*-Studie konnte gezeigt werden, dass Aufbaustifte mit dentinähnlichem E-Modul ein signifikant geringeres Risiko für Wurzelfrakturen als diejenigen mit einem höheren E-Modul aufweisen (Figueiredo, Martins-Filho, & Faria, 2015). Gleichwohl offenbarte eine sieben Jahre dauernde klinische Studie bei Zähnen mit hohem Zerstörungsgrad eine vergleichbare Überlebenszeit sowohl für ein metallisches Stiftsystem aus Titan als auch für ein glasfaserverstärktes Stiftsystem (Sterzenbach, Franke, & Naumann, 2012). Ungeachtet dessen konnte in späteren klinischen Studien nicht nachgewiesen werden, dass sich metallische Wurzelstifte im Vergleich zu glasfaserverstärkten Kompositstiften durch eine höhere Inzidenz der Wurzelfrakturen auszeichnen (Figueiredo et al., 2015).

## 1.2 Auswahl des Stiftsystems sowie Voraussetzungen zum Stiftaufbau

Die Auswahl einer geeigneten postendodontischen Therapie ergibt sich aus der Beurteilung relevanter klinischer Aspekte. So ist stets abzuwägen, inwieweit das Prinzip der minimalen Invasivität eingehalten werden kann oder wann eine Indikation für den Stiftaufbau besteht (Naumann, 2003)

Erfordert die klinische Situation einen Stiftaufbau, erweist sich eine Abwägung der Vor- und Nachteile jedes Stiftsystems für eine individuelle Therapiewahl als sinnvoll (Edelhoff & Spiekermann, 2003).

	<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
<i>Metall</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ <i>umfangreiches Systemangebot</i></li> <li>+ <i>klinische Langzeiterfahrung</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Korrosionsproblematik</i></li> <li>- <i>ungünstige optische Eigenschaften</i></li> <li>- <i>schwierig zu entfernen</i></li> <li>- <i>hoher E-Modul</i></li> </ul>
<i>Faserverstärktes Komposit</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ <i>günstige Biomechanik</i></li> <li>+ <i>Biokompatibilität</i></li> <li>+ <i>Entfernbarkeit</i></li> <li>+ <i>optische Eigenschaften</i></li> <li>+ <i>klinische Langzeiterfahrung</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>anisotropes Verhalten</i></li> <li>- <i>Hydrolyse im Wasser</i></li> <li>- <i>komplexer Haftverbund</i></li> </ul>
<i>Zirkonoxid-Keramik</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ <i>weiße Farbe</i></li> <li>+ <i>Biokompatibilität</i></li> <li>+ <i>hohe Festigkeit</i></li> <li>+ <i>klinische Langzeiterfahrung</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>geringe Scherfestigkeit</i></li> <li>- <i>schwierig zu entfernen</i></li> <li>- <i>hoher E-Modul</i></li> </ul>

Tabelle 1: Vor- und Nachteile verschiedener Stiftsysteme, modifiziert nach Edelhoff (Edelhoff, 2003)

Aus einem *Review* älteren Jahrgangs geht hervor, dass die meisten Studien zu glasfaserverstärkten Kompositstiften im Labor durchgeführt wurden und zum Teil widersprüchlich waren, sodass ihre klinische Relevanz begrenzt war. Die wenigen klinischen Studien zeigten damals, dass glasfaserverstärkte Kompositstifte für den Aufbau endodontisch behandelter Zähne am besten geeignet waren. (Bateman et al., 2003). Es bestand die Annahme, dass der höhere E-Modul metallischer Aufbaustifte im Zusammenspiel mit anderen Faktoren häufiger zu Wurzelfrakturen führen sollte (Galhano et al., 2005). Gleichwohl zeigte ein aktuelleres *Review* keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit von Wurzelfrakturen zwischen metallischen und glasfaserverstärkten Kompositstiften (Figueiredo et al., 2015). Eine andere aktuelle Studie konnte, sowohl in der Gruppe der verschiedenen metallischen Stiftsysteme als auch zwischen metallischen und glasfaserverstärkten Kompositstiften, keine unterschiedliche Überlebensrate ermitteln (Marchionatti, Wandscher, Rippe, Kaizer, & Valandro, 2017).

### ***Ferrule – Zwei-Millimeter-Dentinmanschette***

Heute gilt die *Ferrule*-Präparation als entscheidend. Glasfaserverstärkte Kompositstifte fallen als Favoriten auf, wobei je nach Art der endgültigen Restauration noch unterschiedliche Systeme verwendet werden (Naumann, Neuhaus, Kolpin, & Seemann, 2016).

Metallische Aufbaustifte und glasfaserverstärkte Kompositstifte wiesen bei kurz- bis mittelfristigem *Follow-up* ein ähnliches klinisches Verhalten auf. Die Menge an verbleibender Zahnstruktur und ausreichendem *Ferrule* erhöht das Überleben restaurierter devitaler Zähne (Marchionatti et al., 2017). Eine andere aktuelle *In-vivo*-Studie gelangte zu dem Schluss, dass glasfaserverstärkte Kompositstifte eine höhere Gesamtüberlebensrate (drei bis sieben Jahre) aufwiesen als metallische Aufbaustifte, wenn es sich um die Restauration endodontisch behandelter Zähne mit nicht mehr als zwei verbliebenen koronalen Wänden handelte (Wang et al., 2019).

Bei der Therapieplanung sollten relevante Faktoren wie Zahntyp und Anzahl der verbliebenen Wände berücksichtigt werden (Naumann, Koelpin, Beuer, & Meyer-Lueckel, 2012). Naumann klassifizierte die Zähne nach ihrem Zerstörungsgrad in fünf Kategorien, abhängig von der Anzahl der verbliebenen Dentinwände, ihrer Höhe und Stärke. Ebenso wurden sie nach ihrer anatomischen Lage in Frontzähne, Prämolaren

und Molaren unterteilt, da die morphologische Struktur und die Belastungsfunktionalität unterschiedlich sind (Naumann, 2003). Es ist von besonderer Bedeutung, den Umfang der Zerstörung zu beurteilen, um sich auf dieser Grundlage für eine konservierende Behandlungsmaßnahme oder eine prothetische Versorgung entscheiden zu können (Naumann, 2003).

Eine Studie konnte nachweisen, dass die verbliebene Dentinhöhe, die Anzahl der Wände und der *Ferrule* die Lebensdauer des Zahnes beeinflussten (Marchionatti et al., 2017).

Die Stabilität des Aufbaus ist anhand der verbliebenen Zahnstruktur gegeben. Die Schaffung eines angemessenen *Ferrule*, idealerweise zwei Millimeter umlaufend, minimiert die schädigenden Auswirkungen durch Scher- und Rotationskräfte (Trushkowsky, 2014). Während eine *In-vitro*-Studie aufzeigen konnte, dass die Bruchfestigkeit mit der Länge des *Ferrule* proportional zunimmt (Kar, Tripathi, & Trivedi, 2017), kam eine andere *In-vitro*-Studie zu dem Ergebnis, dass das Fehlen des *Ferrule* durch glasfaserverstärkte Kompositstifte nicht kompensiert werden kann (Magne, Lazari, Carvalho, Johnson, & Del Bel Cury, 2017).

Im Rahmen der Entwicklung von Techniken für einen postendodontischen Aufbau wird eine minimale Invasivität angestrebt. Infolgedessen wird die Indikation für Wurzelkanalstifte in mehreren Fällen nicht mehr gegeben sein (Naumann, 2003).

Aus einer in Deutschland im Jahr 2003 durchgeführten Umfrage ging hervor, dass gegossene metallische Stiftstumpfaufbauten über viele Jahre als Standardversorgung für den postendodontischen Aufbau wahrgenommen wurden (Naumann & Lange, 2003). Eine aktuellere Umfrage in Deutschland zeigte, dass adhäsive Aufbaukomposite mit und ohne glasfaserverstärkte Kompositstifte den vorherrschenden Behandlungsansatz für endodontisch behandelte Zähne bildete. Es bestand weitgehende Übereinstimmung hinsichtlich des *Ferrule*-Effekts als entscheidender Erfolgsfaktor für indirekte Restaurationen (Naumann et al., 2016).

Sind die zuvor genannten Voraussetzungen nicht vorhanden, stellt sich die Frage, ob die Extraktion als einzige Therapiemöglichkeit verbleibt oder ob weitere Alternativen vorhanden sind (Stavridakis, Brokos, & Krejci, 2018).

### **1.3 Einflussfaktoren auf den Haftverbund zwischen Aufbaustift und Wurzelkanalentin**

Die größte Problematik bei passiven, nichtmetallischen Aufbaustiften verkörpert der Verlust von Retention zwischen Wurzelkanalentin und Aufbaustift (Rasimick, Wan, Musikant, & Deutsch, 2010). Zudem stellt *Microleakage* ein weiteres Problem in Bezug auf das adhäsive Versagen dar (Jung et al., 2007).

Die komplexe Geometrie der Stiftbettkavität erzeugt ausreichende Schrumpfspannungen, um das Befestigungsmaterial vom Wurzelkanalentin zu lösen, wodurch die Retention verringert und *Microleakage* erhöht wird (Tay, Loushine, Lambrechts, Weller, & Pashley, 2005). Zudem ist noch nicht geklärt, ob die Bildung von Inhomogenitäten innerhalb des Befestigungskomposits und in der Kompositfuge einen Einfluss auf die Haftwerte nimmt (Perdigao, Gomes, & Augusto, 2007).

#### ***Art des Sealers***

Diverse Studien konnten belegen, dass die Art des Sealers bei der endodontischen Behandlung die spätere Haftkraft beeinflusst. Die Verwendung eines Sealers auf Eugenol-Basis wurde auf der einen Seite nicht empfohlen, da dieser den Haftverbund zwischen Wurzeldentin und glasfaserverstärkten Kompositstiften vermindert (Al-Dwairi, Aleisa, & Lynch, 2015; Altmann, Leitune, & Collares, 2015). Auf der anderen Seite zeigten Sealer auf Epoxidharzbasis und eine Stiftbettpräparation nach 24 Stunden in einer *In-vitro*-Studie bessere Werte für die Haftkraft (Bohrer et al., 2018). Die Kanalaufbereitung eine Woche nach Wurzelfüllung wies im Rahmen einer anderen *In-vitro*-Studie bedeutend mehr Undichtigkeiten als bei frühzeitigerer Durchführung auf (Kim, Kim, & Kwon, 2017).

#### ***Spülprotokoll***

In Bezug auf das Spülprotokoll existieren unterschiedliche Theorien, die auf den bisher durchgeführten Studien basieren (Oliveira et al., 2018). Eine aktuelle *In-vitro*-Studie wies darauf hin, dass die bei Ausstoßversuchen gemessene Haftkraft signifikant durch das adhäsive System beeinflusst wird, nicht jedoch durch das Spülprotokoll (Bitter, Polster, Askar, von Stein-Lausnitz, & Sterzenbach, 2017). Ebenfalls wurden in anderen Studien mit verschiedenen Befestigungskompositen und

unterschiedlichen Spülprotokollen keine bedeutenden Unterschiede bezüglich des Haftverbunds festgestellt (Carvalho et al., 2017; Moura et al., 2017).

### ***Adhäsive Techniken***

Nach der Stiftbettpräparation entsteht eine Kavität mit einem extrem hohen C-Faktor (Tay et al., 2005). Zusätzlich stellt der eingeschränkte Kavitätszugang eine Schwierigkeit zur Kontrolle des residualen Wassers dar. Dies kann allgemein die Hydrolyse der Polymermatrix bewirken (Van Landuyt et al., 2007) und verursacht eine unvollständige Monomerinfiltration, was eine signifikante Reduktion des Haftverbunds bei simulierter Ermüdungsbelastung zur Folge zu haben scheint (Breschi et al., 2008).

Die Konditionierung des Dentins zielt auf die Infiltration des Befestigungskomposits in die Dentintubuli zur Bildung der sog. Hybridlayer ab (Mazzoni et al., 2015). Grundsätzlich sind drei Strategien vorhanden, die danach streben, den Haftverbund zu erreichen (Perdigao, 2010). Die *Etch-and-rinse*-Technik funktioniert durch die Applikation einer Säure und das anschließende Spülen. Der Zweck dieses Verfahrens besteht darin, die Dentintubuli zu öffnen und die Infiltration des Monomers zu ermöglichen, um Kunststoffverzäpfungen zu erzeugen (Pashley et al., 2011). Allerdings kann bei diesem Verfahren residuales Wasser nicht ausgeschlossen werden (Breschi et al., 2008). Eine Alternative hierzu bildet die *Self-etch*-Technik. Dieses Verfahren erfolgt ohne Säureätzung. Stattdessen wird die Schmierschicht durch saure Monomere im Adhäsiv aufgelockert (Van Meerbeek et al., 2011). *Self-etch*-Adhäsive unterteilen sich je nach pH-Wert in ultramilde (pH > 2,5) und milde (pH ≈ 2). Bei einem pH-Wert < 2 handelt es sich um intermediär starke und starke *Self-etch*-Adhäsive (Van Meerbeek et al., 2011). Eine aktuelle *In-vitro*-Studie ergab keinen Unterschied zwischen diesen beiden Techniken, als sie mit vier verschiedenen Befestigungskompositen verwendet wurden (Cruz et al., 2019). Eine dritte Strategie verkörpert die Applikation von *Self-adhesive*-Befestigungskompositen. Diese benötigen keine Vorbehandlung des Dentins, weshalb keine infiltrierte Dentintubuli oder Hybridlayer beobachtet werden (Bitter, Paris, Pfuertner, Neumann, & Kielbassa, 2009). Eine *In-vitro*-Studie konnte im koronalen Dentin ähnliche Haftwerte für *Self-adhesive*-Befestigungskomposite im Vergleich zu den anderen zwei Techniken feststellen (Hikita et al., 2007).

## **Vorbehandlung des Aufbaustiftes**

Zur Vorbehandlung der Oberflächen von glasfaserverstärkten Aufbaustiften findet sich eine Vielzahl an Literatur. Beim postendodontischen Aufbau ist ein langanhaltender Verbund zwischen Befestigungskomposit und Aufbaustift für eine erfolgreiche Therapie relevant (Monticelli, Goracci, Grandini, Garcia-Godoy, & Ferrari, 2005). In Hinblick auf den mechanischen Verbund existieren verschiedene Modifikationen von Stiften, zum Beispiel Retentionsrillen oder fein bearbeitete Verbundflächen, die die makro- und mikromechanische Retention erhöhen sollen (Monticelli, Ferrari, & Toledano, 2008). Ein chemischer Verbund ist nur dann gewährleistet, wenn die Benetzbarkeit der Stiftoberfläche gegeben ist. Diese kann beispielsweise durch die Vorbehandlung mit Alkohol gesteigert werden (Balbosh & Kern, 2006)

Das nichtmakroretentive Design glasfaserverstärkter Aufbaustifte widerspricht vorwiegend dem Grundsätzen der mechanischen Retention (Monticelli et al., 2008). Die Zusammensetzung einiger konfektionierter Stifte lässt zudem die Wechselwirkung mit freien Radikalen nicht zu, woraus eine Minderung der chemischen Verbundfähigkeit resultiert (Lastumaki, Kallio, & Vallittu, 2002).

Es sind verschiedene Techniken entwickelt worden, um den Haftverbund zwischen glasfaserverstärkten Kompositstiften und Befestigungskomposit zu verbessern (Goracci & Ferrari, 2011). Eine chemomechanische Vorbehandlung der Stiftoberflächen wird zum Beispiel durch das Bestrahlen mit Aluminiumpartikeln bei definiertem Zeitraum, Abstand und Druck erreicht, um eine aufgeraute Oberfläche zu erhalten, ohne die Stifte zu beschädigen (Balbosh & Kern, 2006). Ebenfalls soll die Nutzung eines Er-YAG( $Y_3Al_5O_{12}$ )-Lasers an den Dentinwänden im Vergleich zu konventionellen Techniken die Haftkraftwerte verbessern (Uzun, Keskin, Ozsu, Guler, & Aydemir, 2016).

Die Verwendung von Silan und seine Vorteile sind umstritten. Experimentelle Silan-Primer waren Teil einer *In-vitro*-Studie, bei der unterschiedliche Prozentsätze an Hydroxyethylmethacrylat zugegeben wurden, um ihre Wirksamkeit zu demonstrieren. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen beeinflussten die Verbundschicht und ihre jeweilige Retention (Mustafa, Matinlinna, Saidin, & Kadir, 2014). In einer späteren *In-vitro*-Studie wurde festgestellt, dass durch Silanisierung die Retention im mittleren und unteren Wurzel Drittel gesteigert werden konnte (Machado et al., 2015). Die Wirkung von Silan auf den glasfaserverstärkten Kompositstift soll zusätzlich durch die



Anwendung von Wärme verstärkt werden (Monticelli et al., 2005). Im Vergleich zu einer reinen mechanischen Vorbehandlung durch Sandstrahlung oder überhaupt nicht erfolgreicher Vorbehandlung zeigte die Vorbehandlung mit Silan in einer *In-vitro*-Studie signifikant höhere Werte für die Haftkraft (Magni et al., 2007). Die Silanisierung des Aufbaustiftes sei laut einiger Untersuchungen die effektivste Maßnahme, um den Haftverbund zu optimieren (Goracci & Ferrari, 2011). Nichtsdestotrotz finden sich andere Studien, die darauf hindeuten, dass der Einfluss von Silan eher gering sei und die Haftwerte sich dadurch nicht unbedingt erhöhen (Perdigao, Gomes, & Lee, 2006; Sahafi, Peutzfeldt, Asmussen, & Gotfredsen, 2003). *In-vitro*-Studien gelangten darüber hinaus zu dem Schluss, dass die Verwendung von Silan unbedeutend war (Bitter, Noetzel, Neumann, & Kielbassa, 2007; Rathke, Haj-Omer, Muche, & Haller, 2009). Es könnte sich jedoch dessen Anwendung günstig auf den Verbund zwischen Komposit und Aufbaustift auswirken (Rathke et al., 2009).

## 1.4 Restaurationskonzepte zum postendodontischen Aufbau und Vorhandensein von Inhomogenitäten

Die Definition vom *Monoblock* erklärt den postendodontischen Aufbau als strukturelle Einheit, die aus drei dauerhaft adhäsiv verbundenen Substraten besteht: Aufbaustift, Befestigungskomposit und Wurzelentin (Tay & Pashley, 2007). Die Erzielung eines homogenen *Monoblocks* wird als nachzustrebende Theorie postuliert. Dies ist aufgrund verschiedener Faktoren in der Praxis indes nicht leicht umzusetzen (Tay & Pashley, 2007). Zum einen stellt bei intraradikulären Therapien die vielfältige Struktur in der apikalen Region menschlicher Zähne eine Herausforderung dar (Mjor, Smith, Ferrari, & Mannocci, 2001). Zum anderen steigern sich die Spannungen innerhalb der Wurzeln mit einer höheren Anzahl adhäsiver Schichten (Belli, Eraslan, Eskitascioglu, & Karbhari, 2011).

Der Verbund mit der Zahnschubstanz wird durch die *Etch-and-rinse*-, *Self-etch*- oder *Self-adhesive*-Technik angestrebt (Van Meerbeek et al., 2003).

### **Multimode Adhäsive**

Die Einführung von *multimode* oder auch sog. *universal* Adhäsiven stellt eine neue Generation von Adhäsiven dar. Diese arbeiten sowohl mit der *Etch-and-rinse*- als auch mit der *Self-etch*-Technik. Zusätzlich entsteht daraus die alternative selektive Schmelzätztechnik (Perdigao & Loguercio, 2014). Die *multimode* Adhäsive verfolgen das Ziel, eine zeiteffektivere und zuverlässige Befestigung sicherzustellen (Zecin-Deren et al., 2019). Ihnen lassen sich gute Zukunftsaussichten prophezeien. Wenn nämlich Adhäsive nicht unbedingt eine *Etch-and-rinse*-Technik erfordern, können Insertionszeit und Fehlbarkeit bei dieser Technik wesentlich verringert werden (Van Meerbeek et al., 2011).

Einem systematischen *Review* ist zu entnehmen, dass *multimode* Adhäsive eine bedeutende Haftkraft zum Zahndentin – unabhängig von *Etch-and-rinse*- oder *Self-etch*-Technik – erreichen können (Elkaffas, Hamama, & Mahmoud, 2018). Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung selbst ätzender und universeller Adhäsive ist das genaue Auftragsprotokoll produktabhängig (Zecin-Deren et al., 2019)

## **Komposit**

Bei einem Komposit handelt es sich um ein Material, das aus einer Kunststoffmatrix besteht. Diese Kunststoffmatrix setzt sich aus einem organischen Teil (Monomere), einem anorganischen Teil (Füllkörper) sowie einer Verbundphase (Silan) zusammen (Zimmerli, Strub, Jeger, Stadler, & Lussi, 2010). Sowohl die Konsistenz als auch andere Materialeigenschaften variieren je nach Menge des Füllkörpers (Berger, Paliolol, Cavalli, & Giannini, 2009). Niedrigviskose Komposite sind häufig das Material der Wahl für Stiftinsertion im Wurzelkanal.

Polymerisation kann chemisch (selbsthärtend) oder durch eine Lichtquelle (lichthärtend) eingeleitet werden (Berger et al., 2009). Eine *In-vitro*-Studie stellte fest, dass lichthärtende Befestigungskomposite bei der Polymerisation bessere mechanische Eigenschaften im Vergleich zu selbsthärtenden Befestigungskompositen erreichen konnten (Akiba et al., 2019). Eine andere *In-vitro*-Studie deutete sogar darauf hin, dass lichthärtende Befestigungskomposite höhere Werte für die Haftkraft als selbsthärtende Befestigungskomposite leisteten (Luhrs, De Munck, Geurtsen, & Van Meerbeek, 2014). Dual-härtende Befestigungskomposite kombinieren die Eigenschaften der Auto- und Lichtpolymerisation. Dies ermöglicht die Aushärtung an Stellen, an denen die Lichtquelle nicht zugänglich ist, und stellt sich als geeignetes Material für die Befestigung im Wurzelkanal dar (Zimmerli et al., 2010).

Die *Etch-and-rinse*-, *Self-etch*- und *Self-adhesive*-Technik haben das Ziel, einen möglichst maximalen Verbund zwischen Befestigungskomposit und Dentin zu erreichen (Perdigao, 2010), wobei alle drei Techniken nach einem korrekten Applikationsverfahren gleichermaßen effektiv auf Schmelz und Dentin sind (Hikita et al., 2007). Allerdings haben bereits diverse *In-vitro*-Studien eine Kombination zwischen diesen drei Techniken untersucht. Eine dieser Studien gelangte zu dem Ergebnis, dass *Self-adhesive*-Befestigungskomposit in Kombination mit der *Etch-and-rinse*-Technik signifikant höhere Werte als konventionelle *Core-and-post*-Materialien aufwiesen (Sterzenbach, Karajouli, Naumann, Peroz, & Bitter, 2012). Zudem stellte eine aktuellere *In-vitro*-Studie heraus, dass *Self-adhesive*-Befestigungskomposite in Kombination mit einem *Self-etch*-Adhäsiv zuverlässige Werte für die Haftkraft demonstrieren (Bitter, Maletic, et al., 2017). Hierzu bestanden auch signifikant höhere Werte im Vergleich zur Anwendung ohne *Self-etch*-Adhäsiv (Amiri, Balouch, & Atri, 2017).

Hinsichtlich des postendodontischen Aufbaus ist die Verwendung von Amalgam als obsolet zu betrachten – nicht nur wegen seiner Neigung zu Korrosion und dunkler Farbe, sondern auch wegen seines geringen Verbunds zum Zahndentin (Stober & Rammelsberg, 2005). In gleicher Weise sind Glasionomerezemente nicht mit Kompositen vergleichbar, da sie geringere Haftwerte aufweisen und nicht die gleiche Langzeitstabilität besitzen (Van Meerbeek et al., 2003). Eine *In-vitro*-Studie stellte fest, dass zwei selbstadhäsive Befestigungskomposite eine bessere Leistung im Vergleich zu einem Glasionomerezement erreichten, weshalb diese Komposite auch als Aufbaumaterial empfohlen werden können (Stober & Rammelsberg, 2005). Die Befestigungskomposite bieten sich zudem aufgrund ihrer Fließfähigkeit und guten optischen Eigenschaften häufig als geeignetes Material an.

### ***Inhomogenitäten***

Trotz der Anpassungsfähigkeit des Befestigungskomposits besteht die Annahme, dass das Vorhandensein von Inhomogenitäten (Blasen und Spalten) ein Problem darstellen könnte (Elbishari, Silikas, & Satterthwaite, 2012; Purk, Dusevich, Glaros, & Eick, 2007).

Obwohl die fließfähigeren Komposite weniger Blasenbildung zeigen, deutete eine *In-vitro*-Studie darauf hin, dass dies die Haftwerte nicht ändert. Vielmehr ist Gegenteiliges der Fall: Ein sehr fließfähiges Komposit kann während der Polymerisationsphase stärkere Schrumpfungen erfahren, was den Haftverbund schwächen kann (Sadek et al., 2007). Eine *In-vitro*-Studie stellte außerdem fest, dass die Haftwerte von Stiftsystem und Wurzelregion beeinflusst werden, allerdings nicht von den vorhandenen Inhomogenitäten (Matsumoto et al., 2017).

## 1.5 Konzepte zu gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften

Ein deutlicher Unterschied zwischen der Form eines glasfaserverstärkten Aufbaustiftes und derjenigen des Vorbohrers (auch sog. Reamer, Erweiterer) kann sich bei der Insertion negativ auswirken, da die Haftkraft aufgrund einer größeren Schrumpfung während der Polymerisation abnimmt und die Existenz von Inhomogenitäten kritische C-Faktor-Spannungen hervorrufen könnte (Portigliatti, Tumini, Bertoldi Hepburn, Aromando, & Olmos, 2017).

Im Grunde sollten weiterhin neue Alternativen zu den aktuellen Stiftsystemen untersucht werden, zum Beispiel flexiblere Wurzelkanalstifte und Aufbaumaterialien aus fließfähigem Komposit, die während der Funktion eine größere Toleranz gegenüber lateralen Kräften erreichen (Stavridakis et al., 2018). Eine Ähnlichkeit der Elastizitätsmodule des postendodontischen Aufbaumaterials und des Dentins soll außerdem eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte ermöglichen, sodass diese Kräfte von allen Komponenten des *Monoblocks* getragen werden (Tay & Pashley, 2007).

Aufgrund der geschilderten Herausforderungen für die adhäsive Verankerung von Aufbaustiften im Wurzelkanal wurde ein experimentelles Verfahren eines gebündelten glasfaserverstärkten Stiftsystems untersucht. Dieses Stiftsystem ist nach der hier zusammengefassten Literaturübersicht wie folgt einzuordnen: Zum einen liegt hinsichtlich seiner Herstellung ein direktes und konfektioniertes System vor, da es im Rahmen eines *Chairside*-Verfahrens eingesetzt werden kann und keine labortechnische Leistung erforderlich ist. Zum anderen bietet es sich bezüglich seiner Funktionalität, Formgestaltung und Materialbeschaffenheit als passives und zylindrisches Stiftsystem an, begleitet von der Besonderheit, dass es sich nicht um einen einzelnen solitären Stift handelt, sondern um mehrere im Durchmesser von ca. 0,3 mm gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte. Die Anzahl der Stifte variiert je nach Kanalkonfiguration, wobei sich diese in der intraradikulären Kanalgeometrie verteilen und anpassen sollen.

Es werden Techniken gesucht, die nach dem Prinzip der minimalen Invasivität streben und dabei die Kanalgeometrie berücksichtigen (Naumann, 2003). Dies sollte mit gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften gegeben sein.

## 2 ZIEL DER UNTERSUCHUNG

Aufbaustifte aus glasfaserverstärktem Komposit sowie eine ausreichende *Ferrule*-Präparation zählen heutzutage zum Standard des postendodontischen Aufbaus. Gleichwohl können durch die Vielzahl von Herstellern sowie durch die permanente Entwicklung der Werkstoffe und der adhäsiven Techniken keine allgemeingültigen Insertionsprotokolle festgeschrieben werden.

Die Herausforderung neuer Materialien besteht darin, mit der bereits bekannten Problematik umzugehen. Primär sollte die maximale Zahnhartsubstanzschonung erzielt werden. Mit der Anwendung von Befestigungs- und Stiftsystemen, die besser für die intraradikuläre Anatomie geeignet sind, sollte dies gewährleistet werden können. Außerdem sollten Insertionsverfahren etabliert werden, die die Anzahl an Inhomogenitäten innerhalb des Befestigungskomposits sowie in der Kompositfuge verringern.

Die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte stellen auf dem Dentalmarkt ein relativ neues Produkt dar. Anders als die langjährig verwendeten solitären Stiftsysteme, besteht das neue System aus wahlweise vier, sechs, neun oder zwölf gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften. Aufgrund der einzelnen Stifte ist durch die individuell zu wählende Anzahl eine optimale Anpassung an alle Kanalverläufe und Kanalgeometrien möglich. Dennoch werfen die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte und deren Anwendung diverse Fragestellungen auf. So stellt sich für den Behandler beispielsweise die Frage nach dem geeigneten Insertionsverfahren und nach der Auswahl der geeigneten Stiftanzahl.

Das Ziel dieser *In-vitro*-Studie war es mithin, den Einfluss des Insertionsverfahrens und der Stiftanzahl bei gebündelten glasfaserverstärkten Stiften auf dem adhäsiven Verbund im Wurzelkanal festzustellen sowie die Homogenität der Kompositfuge und die Frakturmuster zu vergleichen.

## **Nullhypothesen**

Folgende **Nullhypothesen** werden der vorliegenden Untersuchung zugrunde gelegt:

- Die Haftkraft im Wurzelkanal wird nicht durch das Stiftsystem beeinflusst.
- Die Haftkraft im Wurzelkanal wird nicht durch das Insertionsverfahren beeinflusst.
- Die Haftkraft im Wurzelkanal wird nicht durch Lagerung oder thermische Belastung beeinflusst.
- Das Auftreten von Inhomogenitäten ist nicht abhängig vom Stiftssystem.  
Solitäre Stifte vs. gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte.
- Die Frakturmuster sind nicht abhängig vom Stiftsystem.

## 3 MATERIAL UND METHODIK

### 3.1 Material

#### 3.1.1 Zahnproben

Auf Grundlage des allgemeinen Votums der Ethikprüfungskommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin für den Umgang mit extrahierten Zähnen nach Protokoll EA4 / 102/14 wurden im Kontext dieser zahnmedizinischen Studie humane extrahierte Oberkiefer-Frontzähne der zweiten Dentition (12, 11, 21, 22) mit einer Wurzellänge von mindestens 15 mm verwendet. Die Zeit von den Zahnextraktionen bis zur Sammlung der Proben betrug nicht länger als ein Jahr; währenddessen wurden die Zähne in einer Chloramin-T-Lösung (0,5 %) bei Raumtemperatur konserviert.

Makroskopisch betrachtet wiesen die ausgewählten Zähne weder kariöse Läsionen noch Traumata oder zahnmedizinische Vorbehandlungen auf. Die Eckzähne (13, 23), Zähne mit komplexer Anatomie sowie Zähne mit Wurzelkaries wurden im Vorfeld ausgeschlossen. Während und nach der Sammlungsphase blieben die Zähne weiter in einer Chloramin-T-Lösung (0,5 %) bei Raumtemperatur gelagert.

Jede Zahnprobe wurde 24 Stunden vor Beginn der Versuchsuntersuchung in destilliertes Wasser gelegt. Anschließend wurden die Zahnproben bis zur Schmelz-Zement-Grenze dekapitiert und zu diesem Zeitpunkt ein zweiter Auswahlvorgang durchgeführt. Zahnproben mit stark obliterierten Kanälen oder mit komplexer Kanal Anatomie wurden aussortiert. Am Ende dieser beiden Selektionsphasen wurden insgesamt **104 Zähne** eingesammelt.

#### 3.1.2 Stiftsysteme

##### ***Gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte aus Methacrylat-Basis (Rebilda Post GT, VOCO®, Deutschland, Cuxhaven)***

Die Stifte des Rebilda-Post-GT-Systems sind konfektioniert und benötigen je nach Bedarf eine Vorbohrung. Die Bündel besitzen eine unterschiedliche Anzahl einzelner dünner Stifte (ca.  $\varnothing$  0,2–0,3 mm), die durch eine Manschette zusammengehalten werden. Bei der Insertion verteilen sich die einzelnen Stifte in der Kanalgeometrie. Die Inhaltsstoffe sind den Herstellerangaben entsprechend in Tabelle 3 aufgeführt. Im Rahmen dieser Vergleichsuntersuchung wurden die Bündel



mit idealisierten Durchmessern von ~1,0 mm (rot) sowie ~1,4 mm (schwarz) verwendet.

<i>Größe</i>	<i>Blau</i>	<i>Rot</i>	<i>Grün</i>	<i>Schwarz</i>
<i>Anzahl der Einzelstifte</i>	4	6	9	12
<i>Länge (ohne Manschette)</i>	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm
<i>Idealisierter (runder) Durchmesser</i>	0,8 mm	1,0 mm	1,2 mm	1,4 mm

*Tabelle 2: Produktpräsentationen Rebuilda Post GT nach Herstellerangaben*

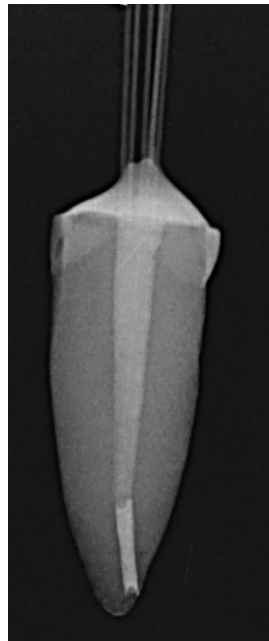
<i>Material</i>	<i>Gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte</i>
<i>LOT Nummer</i>	1604234 (6), 1604236 (12)
<i>Komposition</i>	Matrix: Dimethacrylat ca. 70 % Glasfasern ca. 10 % Füllstoffe (> hohe Röntgenopazität von 408 %Al)
<i>Stiftanzahl</i>	6 und 12
<i>Stiftdurchmesser</i>	Annähernd ca. Ø 0,2 mm bis 0,3 mm  In dieser Untersuchung: Rot mit idealisiertem Durchmesser ~1,0 mm und Schwarz mit idealisiertem Durchmesser ~1,4 mm
<i>Stiftdesign</i>	Zylindrisch
<i>Biegebruchfestigkeit</i>	1040 MPa
<i>Elastizitätsmodul</i>	31,5 GPa

<i>Transluzent</i>	<i>Ja</i>
<i>Röntgenopazität</i>	<i>Ja</i>

*Tabelle 3: Materialdaten zu Rebuilda Post GT nach Herstellerangaben*



*Abbildung 1: Makroskopische (klinische) Darstellung des gebündelten glasfaserverstärkten Stiftsystems*



*Abbildung 2: Radiologische Darstellung des gebündelten glasfaserverstärkten Stiftsystems*

**Solitärer Kompositstift aus Methacrylat-Basis (Rebilda Post, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven) – erste Kontrollgruppe**

Der Stift des Rebilda-Post-System ist konfektioniert und verfügt über eine zylindrisch-konische Form. Für dessen Insertion ist ein *Chairside*-Verfahren vorgesehen. Es existieren vier Varianten mit unterschiedlichen Durchmessern, die jeweils eine Vorbohrung benötigen. Für das System ist ein Aufbereitungs-Set für die jeweiligen Durchmesser beabsichtigt. Die Inhaltsstoffe sind den Herstellerangaben entsprechend Tabelle 5 zu entnehmen. Im Rahmen dieser Vergleichsuntersuchung wurde der Stift mit einem koronalen Durchmesser von 1,5 mm (schwarz) verwendet.

Größe	10 (rot)	12 (grün)	15 (schwarz)	20 (gelb)
Länge	19 mm	19 mm	19 mm	19 mm
Koronaler Durchmesser	1,0 mm	1,2 mm	1,5 mm	2,0 mm
Apikaler Durchmesser	0,50 mm	0,65 mm	0,80 mm	1,00 mm

Tabelle 4: Produktpräsentationen Rebilda Post nach Herstellerangaben

Material	Glasfaserverstärkter Kompositstift
LOT-Nummer	1617002
Komposition	Matrix: Dimethacrylat Ausgehärtetes Komposit aus Glasfasern, Anorganische Füllstoffe
Stiftanzahl	1
Stiftdurchmesser	In dieser Untersuchung: schwarz Ø 1,5
Stiftdesign	Zylindrisch – Konisch
Biegebruchfestigkeit	1240 MPA

<i>Elastizitätsmodul</i>	<i>24 GPa</i>
<i>Transluzent</i>	<i>Ja</i>
<i>Röntgenopazität</i>	<i>Ja</i>

*Tabelle 5: Materialdaten zu Rebuilda Post nach Herstellerangaben*

**Solitärer Glasfaserstift aus Epoxidharzbasis (ER Dentin Post, Komet®, Deutschland, Lemgo) – zweite Kontrollgruppe**

Der Stift des ER-Dentin-Post-Systems ist konfektioniert und hat eine konische Form. Für dessen Insertion ist ein *Chairside*-Verfahren vorgesehen. Es sind vier Varianten mit unterschiedlichen Durchmessern vorhanden, die jeweils eine Vorbohrung benötigen. Für das System ist ein Aufbereitungs-Set für die jeweiligen Durchmesser beabsichtigt.

Die Inhaltsstoffe sind den Herstellerangaben entsprechend in Tabelle 6 aufgeführt.

<i>Material</i>	<i>Glasfaserverstärkter Kompositstift</i>
<i>LOT Nummer</i>	<i>765339</i>
<i>Komposition</i>	<i>- Matrix: Epoxidharz - 60 % Glasfaser</i>
<i>Stiftanzahl</i>	<i>1</i>
<i>Stiftdurchmesser</i>	<i>In dieser Untersuchung: Gelb Ø 1,5</i>
<i>Stiftdesign</i>	<i>Konisch</i>
<i>Biegebruchfestigkeit</i>	<i>550 MPA</i>
<i>Elastizitätsmodul</i>	<i>30 GPa</i>
<i>Transluzent</i>	<i>Ja</i>
<i>Röntgenopazität</i>	<i>Ja</i>

*Tabelle 6: Materialdaten zu ER Dentin Post nach Herstellerangaben*

### **3.1.3 Verbundsysteme**

#### ***Haftvermittler (Ceramic Bond, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven)***

Ceramic Bond wird zur Silanisierung von Aufbaustiften aus einer Dimethacrylat-Matrix verwendet. Dabei wird das Ziel verfolgt, den adhäsiven Verbund zwischen Aufbaustift und Befestigungskomposit zu verstärken. Dieser Haftvermittler enthält organische Säure, 3-Methacryl-Oxypropyltrimethoxysilan und Aceton.

#### ***Multimode Adhäsiv (Futurabond U, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven)***

Futurabond U ist ein *multimode* Adhäsiv zur Verwendung mit Methacrylat-basierenden Füllungs-, Stumpfaufbau- oder Befestigungsmaterialien. Seine Anwendung funktioniert nicht nur für die *Self-etch*-Technik, sondern auch für die *Etch-and-rinse*-Technik (selektive Schmelzätzung oder *Total-etch*-Technik) auf der Zahnhartsubstanz.

#### ***Befestigungskomposit (Rebilda DC, VOCO ®, Deutschland, Cuxhaven)***

Rebilda DC ist ein dualhärtendes, hoch röntgenopakes, fließfähiges Komposit für den Stumpfaufbau. Das Kompositmaterial wird sowohl für den adhäsiven Stumpfaufbau vitaler und devitaler Zähne als auch zur Befestigung glasfaserverstärkter Kompositstifte verwendet.

## 3.2 Durchführung der Untersuchung

### 3.2.1 Probenvorbereitung

Nach den Selektionsphasen und der 24-stündigen Lagerung im destillierten Wasser wurden die gesammelten Zahnproben (**n = 104**) mit Handinstrumenten im Sinne einer Kürettage gereinigt. Anschließend wurde, beginnend mit der Darstellung des Kanaleingangs mittels passender Bohrer (Gates-Glidden-Bohrer, Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz) und der Permeabilisierung des Wurzelkanals mit endodontischen Feilen ISO-Größe 10 bis 15 (Wave One Gold, Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz), bei jeder einzelnen Zahnprobe eine Wurzelkanalbehandlung durchgeführt. Eine erste Spülung (Endoneedle, Vedefar; Dilbeek, Belgien) mit einer 18-prozentigen EDTA-Lösung für ca. eine Minute wurde zur Demineralisierung und zur Entfernung anorganischer Substanzen angewendet, gefolgt von einer reziproken Aufbereitungstechnik bis ISO-Größe 45 (Wave One Gold, Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz). Die Wurzelkanalspülung erfolgte während und nach der Aufbereitungsphase mit einer dreiprozentigen ultraschallaktivierten Natriumhypochlorit-Lösung, um eine bessere Penetration der Spüllösung zu ermöglichen. Für das Prozedere wurde ein getrockneter Kanal mittels Papierspitzen ISO-Größe 45 (Wave One Gold, Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz) sichergestellt. Dabei wurde zunächst die Wurzelfüllung durchgeführt. Der passende Guttaperchastift (Calamus Dual, Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz) wurde bis einen Millimeter vor Erreichen der Arbeitslänge zusammen mit *Sealer* (AH-Plus, Dentsply DeTrey; Konstanz, Deutschland) eingeführt und danach der *Downpack* vorgenommen. Der Guttaperchastift wurde durch Erwärmung plastifiziert, schrittweise gekürzt und mit passenden *Handpluggern* nach apikal vertikal kompaktiert. Anschließend wurden Standard-Stiftbettpräparationen von 8 mm bis zum Durchmesser von 1,5 mm mit einem Vorbohrer – *Reamer* – des Aufbereitungs-Sets des Rebuilda-Post-Stiftsystems *black* (Rebuilda Post, VOCO; Cuxhaven, Deutschland) vorgenommen. Um einen apikalen Verschluss sicherzustellen, wurden apikal mindestens 4 mm Guttapercha apikal belassen und folglich eine optische Kontrolle der Kanalaufbereitung mithilfe eines Mikroskops (Vergrößerung 23 x, OPMI pico, Zeiss; Jena, Deutschland) durchgeführt. Zum Schluss wurden die vorbereiteten 104 Zahnproben in acht Gruppen nach dem Zufallsprinzip aufgeteilt (**n = 13**).



Abbildung 3: Dekapitieren der Proben und Fixierung in Silikonbasis

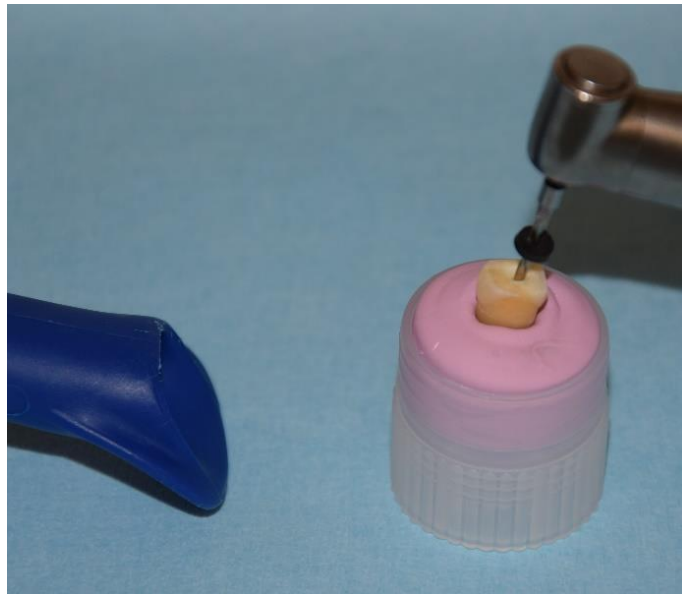


Abbildung 4: Standard-Stiftbettpräparationen von 8 mm mit Vorbohrer  $\varnothing$  1,5 mm (schwarz)

### **3.2.2 Versuchsaufbau**

Die Versuchsgruppen und Testmethoden sind in nachstehender Tabelle dargestellt:

<i>Art des Stifts</i>	<i>Art der Insertion</i>	<i>Anzahl der Stifte</i>	<i>Farbkodierung Durchmesser</i>	<i>Anzahl Proben</i>	<i>Kürzel je Gruppe</i>
<i>System 1 Rebilda Post GT</i>	<i>Direkt</i>	6	<i>Rot</i> <i>(<math>\varnothing \sim 1,0 \text{ mm}</math>)</i>	13	<i>Ma</i> <i>Zähne: I bis XIII</i> <i>Scheiben: 1 bis 6</i>
	<i>Direkt</i>	12	<i>Schwarz</i> <i>(<math>\varnothing \sim 1,4 \text{ mm}</math>)</i>	13	<i>Mb</i> <i>Zähne: I bis XIII</i> <i>Scheiben: 1 bis 6</i>
	<i>Spreader</i>	6	<i>Rot</i> <i>(<math>\varnothing \sim 1,0 \text{ mm}</math>)</i>	13	<i>Sa</i> <i>Zähne: I bis XIII</i> <i>Scheiben: 1 bis 6</i>
	<i>Spreader</i>	12	<i>Schwarz</i> <i>(<math>\varnothing \sim 1,4 \text{ mm}</math>)</i>	13	<i>Sb</i> <i>Zähne: I bis XIII</i> <i>Scheiben: 1 bis 6</i>
	<i>Ultraschall</i>	6	<i>Rot</i> <i>(<math>\varnothing \sim 1,0 \text{ mm}</math>)</i>	13	<i>Ua</i> <i>Zähne: I bis XIII</i> <i>Scheiben: 1 bis 6</i>
	<i>Ultraschall</i>	12	<i>Schwarz</i> <i>(<math>\varnothing \sim 1,4 \text{ mm}</math>)</i>	13	<i>Ub</i> <i>Zähne: I bis XIII</i> <i>Scheiben: 1 bis 6</i>
<i>System 2 Rebilda Post</i>	<i>Direkt</i>	1	<i>Schwarz</i> <i>(<math>\varnothing 1,5 \text{ mm}</math>)</i>	13	<i>R</i> <i>Zähne: I bis XIII</i> <i>Scheiben: 1 bis 6</i>

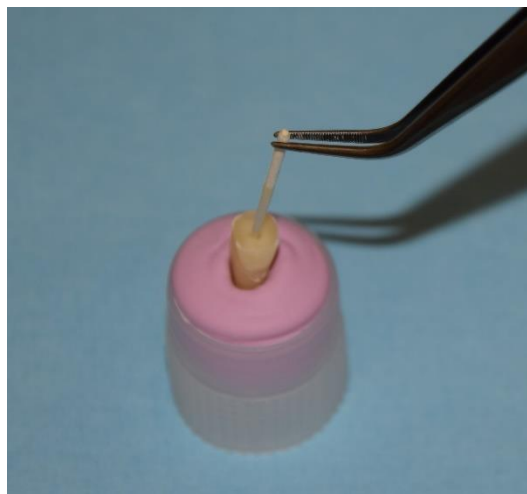


<i>System 3</i>	<i>Direkt</i>	<i>1</i>	<i>Gelb</i>	<i>13</i>	<i>D</i>
<i>ER Dentin</i>			<i>(ø 1,5 mm)</i>		<i>Zähne: I bis XIII</i>
<i>Post</i>					<i>Scheiben: 1 bis 6</i>

*Tabelle 7: Studiendesign*

### **3.2.3 Insertion der Stifte**

Die Stiftbettpräparationen jeder Gruppe wurden mit 2,5 ml einer einprozentigen ultraschallaktivierten (Irri Tip, VDW; München, Deutschland) Natriumhypochlorit-Lösung für zweimal 30 Sekunden mit einer Frequenz von 20kHz (VDW Ultra) gespült. Darauffolgend wurden sie mit jeweils 5 ml Wasser und anschließend 99-prozentigem Ethanol für 60 Sekunden gespült (Endoneedle, Vedefar; Dilbeek, Belgien). Danach wurde die Trockenlegung der Kanäle mit Papierspitzen (Wave One Gold, Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz) vorgenommen. Im Anschluss wurde für die Silanisierung Ceramic Bond (VOCO; Cuxhaven, Deutschland) auf den Stiften mit einer Einwirkzeit von 60 Sekunden und ölfreier Trocknung appliziert. Bei dieser Versuchsuntersuchung erfolgte – entgegen den Herstellerangaben – keine Einprobe der Stifte.



*Abbildung 5: Trockenlegung mit Papierspitzen*



Abbildung 6: Silanisierung des Stifts

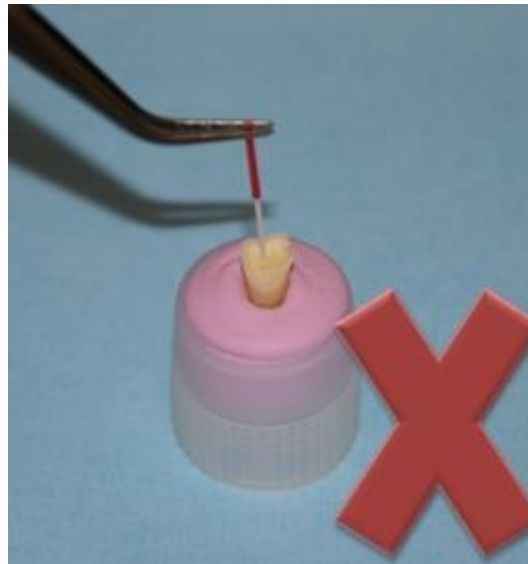


Abbildung 7: Keine Einprobe der Stifte

Dann wurde zur Konditionierung des Zahnstumpfes Futura Bond U (VOCO; Deutschland, Cuxhaven) ohne Ätzelgel auf die zu bondenden Oberflächen aufgetragen und für 20 Sekunden einmassiert. Im Anschluss daran wurde das Adhäsiv noch weitere 20 Sekunden in ölfreiem Luftstrom verblast, aber nicht lichtgehärtet.



Abbildung 8: Konditionierung des koronalen Dentins

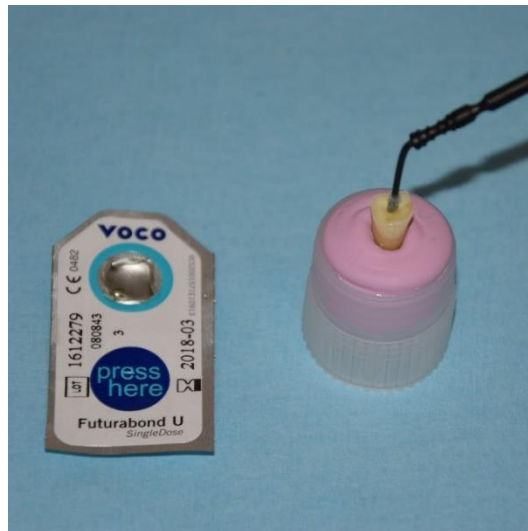


Abbildung 9: Konditionierung des Wurzelzementins

Als Nächstes wurde das Befestigungskomposit Rebilda DC (VOCO, Cuxhaven, Deutschland) von apikal beginnend appliziert, wobei die Kanüle eingetaucht blieb. Ein Lentulo wurde nicht verwendet.



Abbildung 10: Applikation des Befestigungskomposits

Ab dieser Phase des Protokolls unterscheiden sich die letzten Schritte der Insertionsverfahren in drei Arten: **direkt, Spreader und Ultraschall**.

### ***Insertionsverfahren – direkt***

#### *Untersuchungsgruppe*

Bei Rebuilda Post GT (VOCO, Deutschland, Cuxhaven) von sechs und zwölf Stiften wurde die Manschette zuerst mit einer Pinzette leicht, indes nicht vollständig abgezogen. Unmittelbar danach wurden die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte unter Erzielung leichter Überschüsse mit leichtem Fingerdruck (ca. 5 N) inseriert. In dieser Position wurden die Stifte mit einer Pinzette fixiert und die Manschette mit einer weiteren Pinzette vollständig entfernt. Abschließend wurden die Zahnproben zur Fixierung der Wurzelstifte und zur Aushärtung des okklusal aufgetragenen dualhärtenden Adhäsivs für 40 Sekunden lichtgehärtet (LED Curing 1200mW/cm<sup>2</sup>, Elipar Freelight 2; 3M Oral Care). Jede Zahnprobe wurde unmittelbar nach Einsetzen des Aufbaustiftes in einer 0,9-prozentigen NaCl-Lösung bei 37 °C gelagert.

#### *Kontrollgruppen*

Beim Rebuilda Post schwarz ø 1,5 mm (VOCO; Cuxhaven, Deutschland) und beim ER Dentin Post gelb ø 1,5 mm (Komet; Lemgo, Deutschland) wurde ebenfalls die Insertion mit leichtem Fingerdruck (ca. 5 N) unter Erzielung leichter Überschüsse und mit abschließender Lichthärtung für 40 Sekunden durchgeführt (LED Curing

1200 mW/cm<sup>2</sup>, Elipar Freelight 2; 3M Oral Care). Jede Zahnprobe wurde unmittelbar nach Einsetzen des Aufbaustiftes in einer 0,9-prozentigen NaCl-Lösung bei 37 °C gelagert.

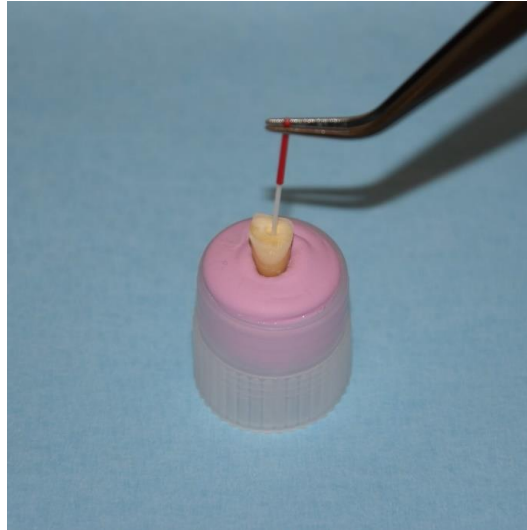


Abbildung 11: Direktes Insertionsverfahren von Rebilda Post GT

### **Insertionsverfahren – Spreader**

Beim Rebilda Post GT (VOCO; Cuxhaven, Deutschland) von sechs und zwölf Stiften wurde die Manschette zuerst mit einer Pinzette leicht, aber nicht vollständig abgezogen. Unmittelbar danach wurden die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte unter Erzielung leichter Überschüsse mit leichtem Fingerdruck (ca. 5 N) inseriert. In dieser Position wurden die Stifte mit einer Pinzette fixiert und die Manschette mit einer weiteren Pinzette vollständig entfernt.

**Im weiteren Fortgang der Insertion wurden die Einzelstifte des Rebilda Post GT mit einem Spreader an die Kanalgeometrie angepasst.**

Abschließend wurden die Zahnproben zur Fixierung der Wurzelstifte sowie zur Aushärtung des okklusal aufgebracht, dualhärtenden Adhäsivs für 40 Sekunden lichtgehärtet (LED Curing 1200 mW/cm<sup>2</sup>, Elipar Freelight 2; 3M Oral Care). Jede Zahnprobe wurde unmittelbar nach Einsetzen des Aufbaustiftes in einer 0,9-prozentigen NaCl-Lösung bei 37 °C gelagert.

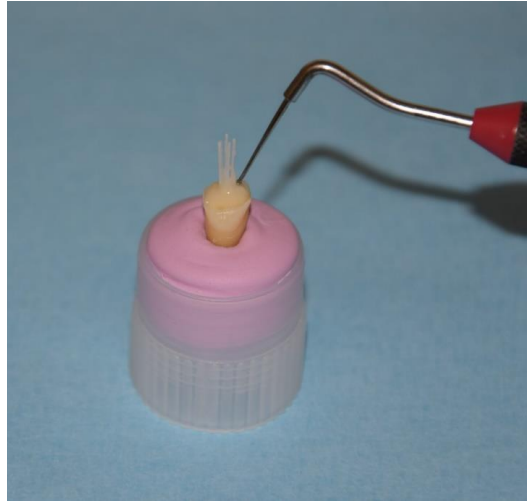


Abbildung 12: Insertionsverfahren mit Spreader – Rebuilda Post GT

### ***Insertionsverfahren – Ultraschall***

Beim Rebuilda Post GT (VOCO, Cuxhaven, Deutschland) mit sechs und zwölf Stiften wurde die Manschette zunächst mit einer Pinzette leicht, aber nicht vollständig abgezogen. Unmittelbar danach wurden die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte unter Erzielung leichter Überschüsse inseriert. In dieser Position wurden die Stifte mit einer Pinzette fixiert und die Manschette mit einer weiteren Pinzette vollständig entfernt.

**Im weiteren Fortgang wurde ein Ultraschallaufsatz mit einer Gummispitze an die Restzahnschubstanz vestibulär und palatinal jeweils drei Sekunden lang gehalten und aktiviert.**

Abschließend wurden die Zahnproben zur Fixierung der Wurzelstifte sowie zur Aushärtung des okklusal aufgetragenen, dualhärtenden Adhäsivs für 40 Sekunden lichtgehärtet (LED Curing 1200 mW/cm<sup>2</sup>, Elipar Freelight 2; 3M Oral Care). Jede Zahnprobe wurde unmittelbar nach Einsetzen des Aufbaustiftes in einer 0,9-prozentigen NaCl-Lösung bei 37 °C gelagert.

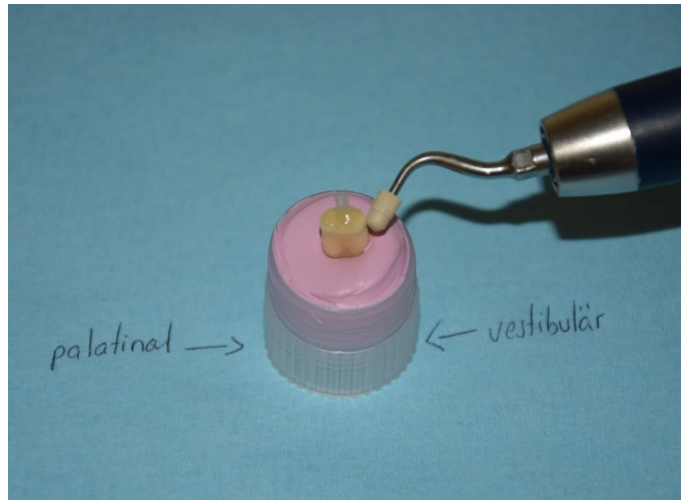


Abbildung 13: Insertionsverfahren mit Ultraschall – Rebuilda Post GT

### **3.2.4 Probenherstellung (Dentinscheiben)**

Die Probenherstellung erfolgt im Rahmen von drei Zeiträumen. Beim ersten Zeitintervall wurden vier Zahnproben je Gruppe behandelt und insgesamt 192 Dentinscheiben hergestellt. Beim zweiten Zeitintervall wurden ebenfalls vier Zahnproben je Gruppe behandelt und weitere 192 Dentinscheiben hergestellt. Beim letzten Zeitintervall wurden fünf Zahnproben je Gruppe behandelt und somit zusätzliche 240 Dentinscheiben hergestellt. In einem Zeitraum von nicht mehr als einer Woche wurden die Zahnproben in sechs jeweils 1 mm dicke Dentinscheiben geschnitten (Säger, Exakt Apparatebau; Norderstedt, Deutschland). An diesen wurden sowohl eine mikroskopische Analyse (Keyence VHX 5000, Keyence; Neu-Isenburg, Deutschland) als auch Mikro-Ausstoßversuche (Universal Test Maschine Zwick, Roell; Ulm, Deutschland) durchgeführt, um die Haftkraft zum Wurzelkanaldentin zu bestimmen.

Jede Dentinscheibe wurde unmittelbar nach der Herstellung in einer 0,9-prozentigen NaCl-Lösung bei 37 °C gelagert. Dabei wurden von jeder Zahnprobe drei Dentinscheiben innerhalb der ersten 48 Stunden wie auch die anderen drei Dentinscheiben in gleicher Weise, allerdings nach 6.000 thermischen Zyklen und sechsmonatiger Lagerung (in einer 0,9-prozentigen NaCl-Lösung und bei 37 °C), getestet.

### **Einbetten der Zahnproben**

Für das Einbetten der zuzuschneidenden Zahnproben wurde ein zylindrischer Hohlraum in einem Kunststoffblock vorbereitet. Dann wurde Technovit 4071® (Heraeus Kulzer; Hanau, Deutschland) gemäß Herstellerangaben angemischt und das Material in den zuvor beschriebenen Hohlraum gefüllt. Mithilfe eines Parallelometers wurden die Zahnproben unter leichten Materialüberschüssen eingebracht und bis zur vollständigen Polymerisation abgewartet.



Abbildung 14: Einbetten der Dentinproben

Anschließend wurden die eingebetteten Zahnproben vorsichtig herausgezogen und auf einem Glas-Objektträger in Gruppen mit jeweils vier Zahnproben mit Sekundenkleber (*Instant Fix*, Henry Schein, Deutschland, Greifswald) fixiert. Jeder Objektträger wurde individuell nach Gruppenname und nach Zahnproben je Gruppe gekennzeichnet (siehe Tabelle 7).

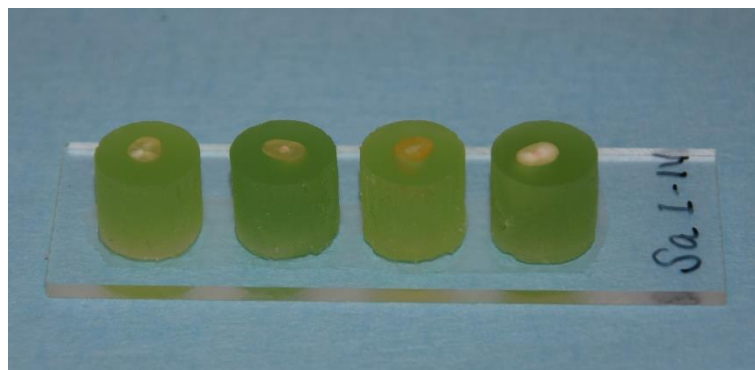


Abbildung 15: Fixierung der Dentinproben nach der Einbettung



### **Sägen der Zahnproben und Beschriftung der Dentinscheiben**

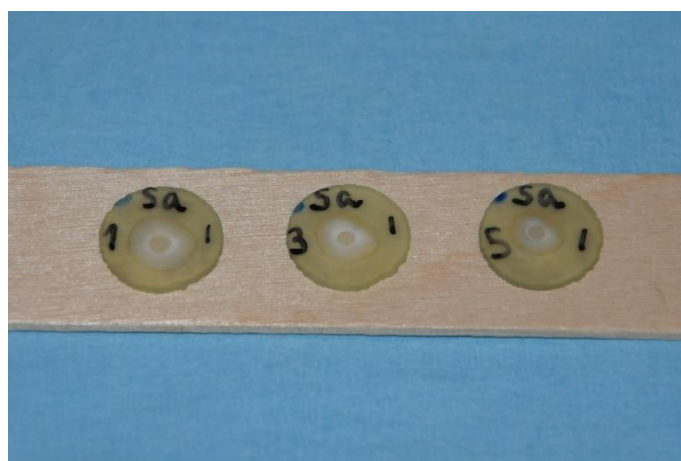
Die eingebetteten Zahnproben wurden mithilfe einer Säge (Exakt Apparatebau; Norderstedt, Deutschland) in je sechs 1 mm dicke Dentinscheiben geschnitten.



*Abbildung 16: Sägen der Dentinproben*

Von den sechs entstandenen Dentinscheiben repräsentieren die ersten beiden das obere (koronale) Wurzel Drittel, die nächsten beiden das mittlere Wurzel Drittel und die letzten beiden die untere (apikale) Wurzelregion.

Für die Beschriftung jeder einzelnen Dentinscheibe wurde eine eigene Bezeichnung gewählt (siehe Tabelle 7).



*Abbildung 17: Beschriftung jeder einzelnen Dentinscheibe*

### 3.3 Ermittlung der Haftkraft

#### 3.3.1 Kalkulation der Haftfläche

Mithilfe des Stereomikroskops Keyence VHX 5000 (Keyence, Neu-Isenburg, Deutschland) erfolgte eine mikroskopische Analyse.

Die intraradikuläre Morphologie zwischen einzelnen Zähnen unterscheidet sich grundsätzlich signifikant voneinander, wobei sie auch innerhalb desselben Zahnes eine Unregelmäßigkeit aufweist (Marceliano-Alves et al., 2018). Dahin gehend kann für eine objektive mikroskopische Vermessung nicht von perfekten Kreisumfängen gesprochen werden. Um jedoch eine Standardmessung durchführen zu können, die allgemein für alle Dentinproben gültig ist, wurden die approximativen Durchmesser der koronalen und der apikalen Seite jeder Scheibe sowie deren Höhe berechnet. Im Anschluss daran wurde für die finale Ermittlung der Haftfläche die mathematische Formel des konischen Kegelstumpfes angewendet.

$$\text{Haftfläche} = \pi (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + h^2} + \pi \cdot R_1^2 + \pi \cdot R_2^2$$

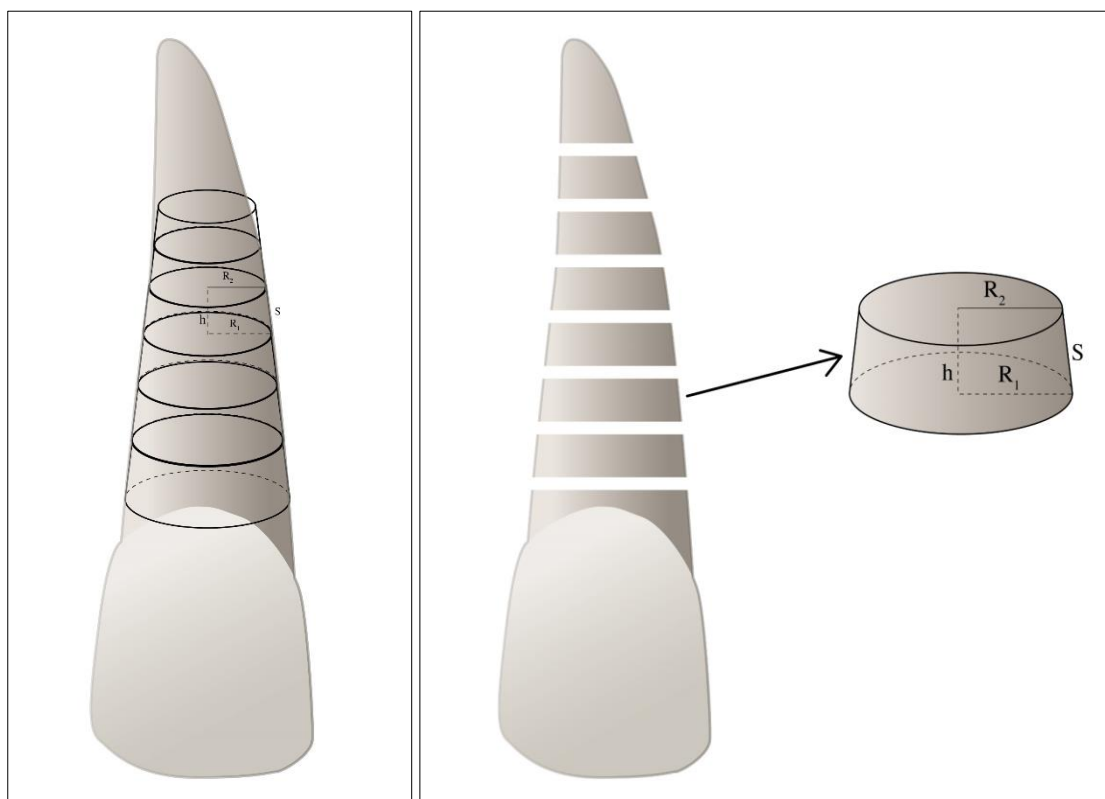


Abbildung 18: Kalkulation der Haftfläche

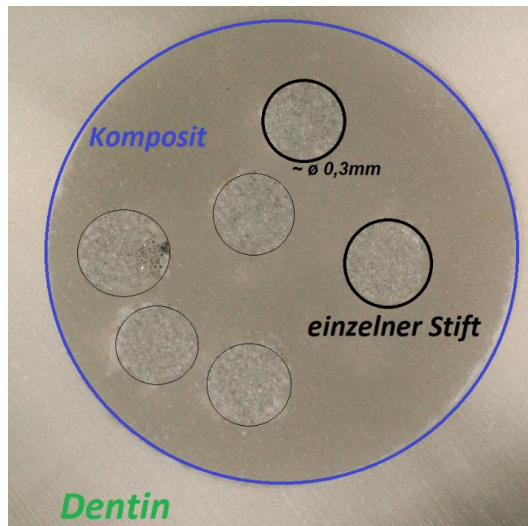


Abbildung 19: Mikroskopische Darstellung des gebündelten glasfaserverstärkten Stiftsystems

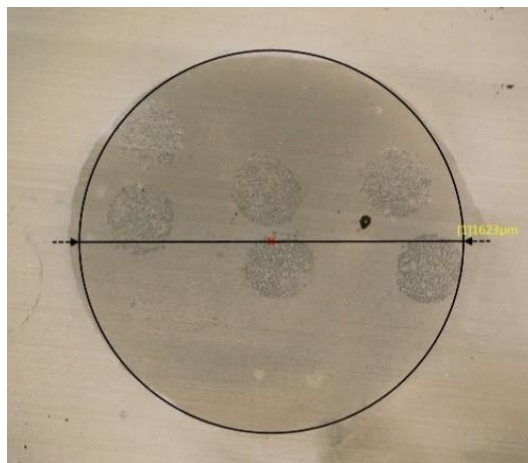


Abbildung 20: Messung des Durchmessers unter dem Mikroskop R1 – koronal / R2 – apikal



Abbildung 21: Messung der Höhe jeder Dentinscheibe – h  
(digitales Abstandsmessgerät, Mitutoyo, Mexiko)

### **3.3.2 Ausstoßversuche, thermische Belastung mit Thermocycling und Lagerung**

Wie bereits in Tabelle 7 dargestellt, wurden sechs Dentinscheiben je Zahnprobe numerisch von eins bis sechs gekennzeichnet. Bei den mit ungeraden Zahlen (1, 3, 5) versehenen Scheiben wurden die Ausstoßversuche innerhalb der ersten 48 Stunden ohne thermische Belastung vorgenommen, während bei den mit geraden Zahlen (2, 4, 6) versehenen Scheiben die zuvor genannten Ausstoßversuche erst nach 6.000 thermischen Zyklen und sechsmonatiger Lagerung erfolgten. Es wurde sichergestellt, dass alle Dentinscheiben bei sämtlichen Arbeitsschritten in einer 0,9-prozentigen NaCl-Lösung feucht gehalten wurden.

Um die maximale Haftkraft zwischen der Verbundschicht und dem Wurzelkanaldentin zu bestimmen ( $F_{max}$ ), wurden Ausstoßversuche mit der Prüfmaschine Zwick Z010 (Zwick Roell; Ulm, Deutschland) vorgenommen. Die Versuche erfolgten mit drei verschiedenen Stahlstempeln (Durchmesser: 0,6 mm, 0,8 mm und 0,95 mm) und wurden wegen der Konizität der Stiftproben innerhalb der Dentinscheiben von apikal getestet. Es wurde stets der größtmögliche Durchmesser ausgewählt, der indes immer kleiner war als der Stift-Komposit-Komplex. Zudem wurde eine metallische Basis mit vier unterschiedlich großen Löchern als Auflagefläche verwendet. Alle Dentinscheiben wurden mit der koronalen Seite nach unten zwischen dem Stahlstempel und der passenden Öffnung der Auflage positioniert. Der Stahlstempel mit Anschluss an eine 2,5-kN-Messdose bewegte sich bei 0,2 N Vorkraft zentral nach unten auf die ausgewählte Öffnung der Auflage. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,5 mm/min, und der Versuch wurde nach Auftreten des Versagens der jeweiligen Dentinprobe beendet. Die obere Kraftgrenze lag bei 500 N. Die Werte für die erreichte Kraft ( $F_{max}$ ) konnten sodann aus dem angeschlossenen Rechner abgelesen und dokumentiert werden. Der Rechner bildete dabei die maximale Ausstoßkraft jeder Stiftprobe in Newton (N) bei einem Kraftabfall von 10 % ab. Dieser Wert wurde mit dem Versagen der Probe zugeordnet.

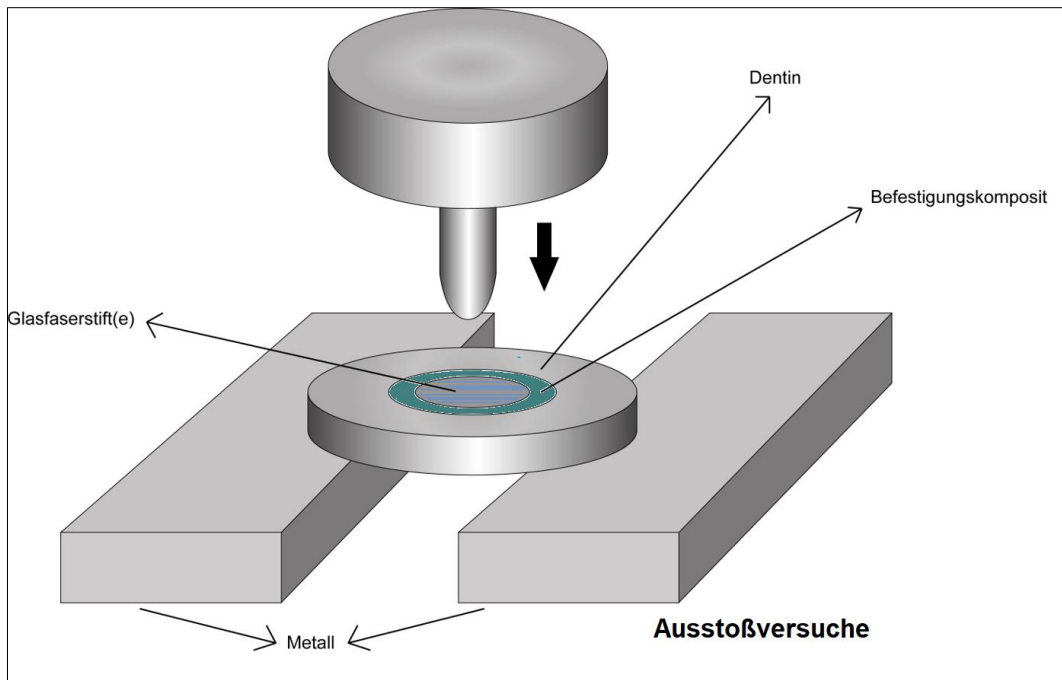


Abbildung 22: Simulation der Ausstoßversuche

### 3.4 Optische Auswertung der Homogenität der Verbundschicht

Bei der mikroskopischen Analyse wurde neben der Vermessung sowohl eine optische Auswertung als auch eine fotografische Dokumentation jeder einzelnen Dentinscheibe durchgeführt.

Ein Ziel dieser Studie bildet die Beurteilung der Homogenität der Verbundschicht. Deshalb war es von besonderer Bedeutung, Parameter festzulegen, um eine objektive Kategorisierung in die Praxis umsetzen zu können. Um eine Abgrenzung dahin gehend vornehmen zu können, welche Dentinscheiben Homogenität aufweisen konnten und in welchem Grad Homogenität vorlag, wurde nach allgemeingültigen Referenzpunkten gesucht.

Obwohl alle Dentinproben unter denselben Qualitäts- und Arbeitsbedingungen von demselben Behandler hergestellt wurden, konnten verschiedene Ungleichmäßigkeiten in der Verbundschicht beobachtet und zusätzlich aufgelistet werden. Dazu zählten unter anderem Blasen verschiedener Größen, Spaltbildungen, Überschüsse von Adhäsiv, Sealer- und Guttapercharesten.

#### 3.4.1 Art der Inhomogenitäten

##### **Blasenbildung**

Irreguläre lichtundurchlässige Stelle innerhalb des Befestigungskomposits

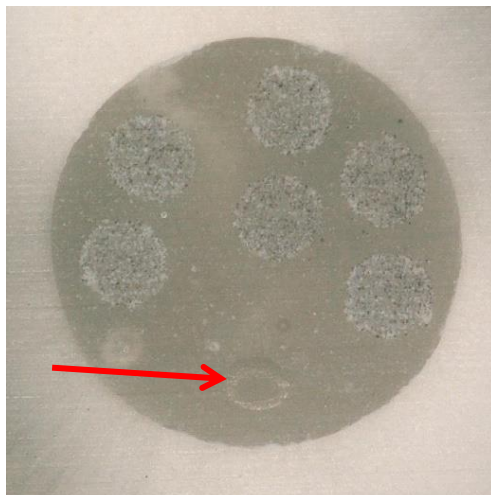


Abbildung 23: Blasenbildung

##### **Spaltbildung**

Irreguläre lichtdurchlässige Stelle innerhalb des Befestigungskomposits

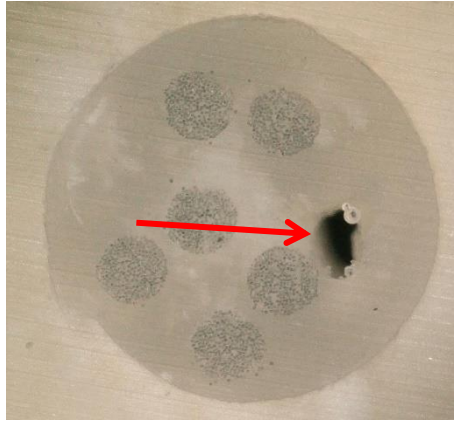


Abbildung 24: Spaltbildung

### **Adhäsiv-Überschuss**

Übermäßige Menge an Adhäsiv (in dieser Studie Futurabond)



Abbildung 25: Adhäsiv-Überschuss

### **Sealer- und Guttaperchareste**

Im Sinne einer unvollständigen Stiftbettpräparation

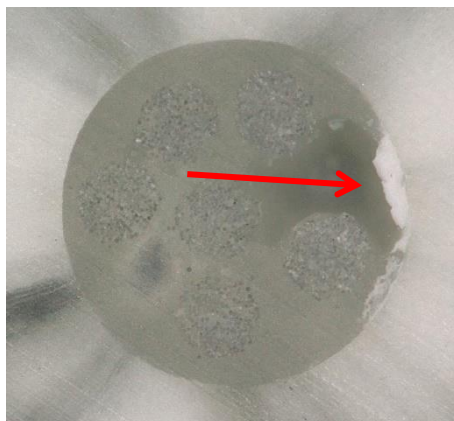


Abbildung 26: Sealer-Reste



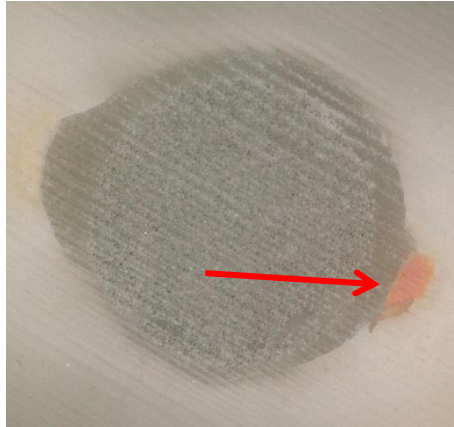


Abbildung 27: Guttaperchareste

### 3.4.2 Größe der Inhomogenitäten

Die Größen der Inhomogenitäten wurden wie folgt kategorisiert: überhaupt keine (Gleichmäßigkeit), sehr klein, klein, mittel, groß, sehr groß

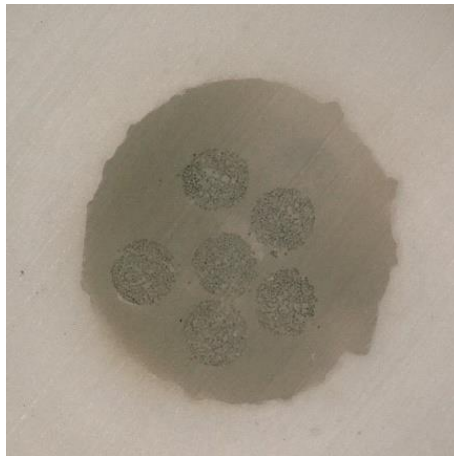


Abbildung 28: Keine Inhomogenität (Gleichmäßigkeit)

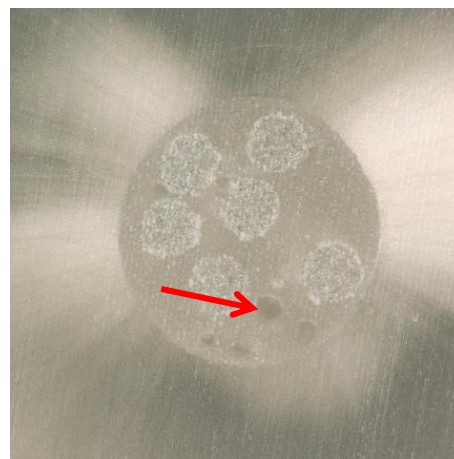


Abbildung 29: Sehr klein (in diesem Bild: Blasenbildung)



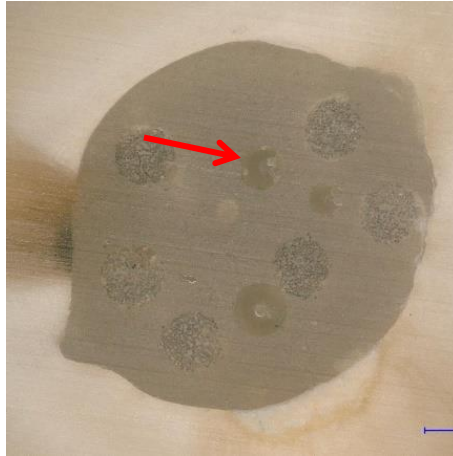


Abbildung 30: Klein (in diesem Bild: Blasenbildung)

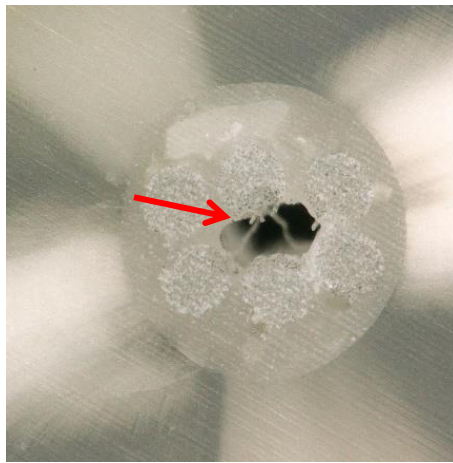


Abbildung 31: Mittel (in diesem Bild: Spaltbildung)

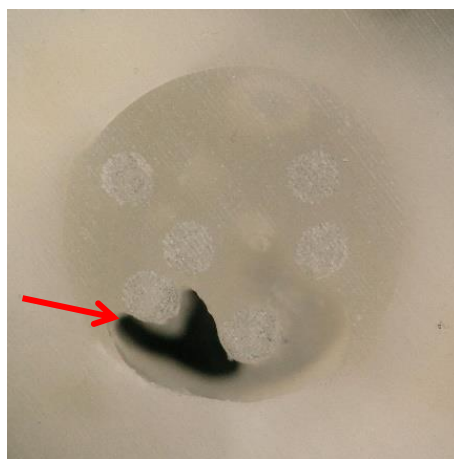


Abbildung 32: Groß (in diesem Bild: Spaltbildung)

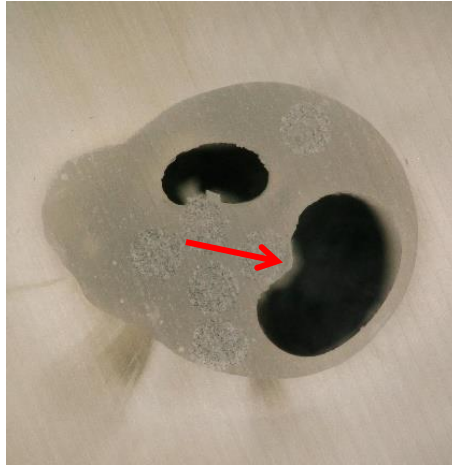


Abbildung 33: Sehr groß (in diesem Bild: Spaltbildung)

### 3.4.3 Unterteilung der Inhomogenitäten

Nachfolgende Tabelle stellt die Kriterien zur Klassifizierung der Dentinscheiben dar. Nach Festlegung der Art und Größe der Inhomogenitäten wurde die Quantifizierung durchgeführt. Dies geschah so objektiv wie möglich und mithilfe des Mikroskops. Dabei beschreibt die Gleichmäßigkeit die homogenen Proben. Dentinscheiben mit *sehr kleinen Blasen und/oder Spalten* werden indes auch als *homogen* angesehen. *Kleine bis mittelgroße Blasen und/oder Spalten* in kleiner Anzahl bleiben ebenfalls homogen, während diese in größerer Anzahl zur Kategorie *leicht inhomogen* werden. *Große Blasen und/oder Spalten* in geringer Anzahl gelten als *leicht inhomogen* und gehen in größerer Anzahl in die Kategorie *inhomogen* über. Zu den *inhomogenen* Dentinproben zählen ebenso *sehr große Defekte*; das Vorhandensein von *Adhäsiv-Überschüssen, Sealer- oder Guttapercharesten* stellt automatisch eine *inhomogene* Dentinscheibe dar, unabhängig davon, wie der Rest der Dentinscheibe aussah.

	<i>Homogen</i>	<i>Leicht Inhomogen</i>	<i>Inhomogen</i>
<i>Gleichmäßigkeit</i>	+		
<i>Blase und/oder Spalte Sehr klein</i>	+		
<i>Blase und/oder Spalte klein bis mittel</i>	+	++	
<i>Blase und/oder Spalte groß</i>		+	++
<i>Blase und/oder Spalte Sehr groß</i>			+
<i>Adhäsiv-Überschuss</i>			+
<i>Sealer-Reste</i>			+
<i>Guttapercharestes</i>			+

*Tabelle 8: Kriterien zur Auswertung der Homogenität*

*+ in geringer Anzahl*

*++ in größerer Anzahl*

### 3.5 Optische Analyse der Frakturmuster

Ein weiteres Ziel dieser Studie bestand darin, eine Auswertung der Frakturmuster, die bei der mikroskopischen Analyse beobachtet wurden, vorzunehmen. Die Unterteilung erfolgte anhand aktueller Literatur:

- Adhäsiv: zwischen zwei verschiedenen Komponenten
- Kohäsiv: innerhalb derselben Komponente
- Gemischt: kombiniertes Muster

Darüber hinaus wurden bei einigen Tests Veränderungen im Dentin festgestellt, die in die zwei folgenden Gruppen eingeteilt wurden:

#### ***Kompromiss des Dentins***

- Dentinfraktur: Eindeutige Risslinie im Wurzelentin erkennbar mit oder ohne Stiftfraktur
- Dentinbeteiligung: Begrenzte Erhebung des Dentins zusammen mit der Grundschicht des Befestigungskomposits

<i>Frakturmuster</i>				
<i>Adhäsiv</i>		<i>Gemischt</i>	<i>Kohäsiv</i>	
<i>Zwischen Komposit und Dentin</i>	<i>Zwischen Komposit und Stift(en)</i>	<i>Mindestens ein Muster von jeder Art erkennbar</i>	<i>Innerhalb des Komposits</i>	<i>Innerhalb des Stifts/der Stifte</i>

*Tabelle: Unterteilung der Frakturmuster*

### **3.6 Statistische Auswertung**

Das allgemeine Signifikanzniveau wurde für alle Tests mit  $\alpha = 0,05$  festgelegt.

Die Varianzanalyse mit wiederholten Messungen (ANOVA) umfasste Post-hoc-Tests (Tukey) mit den Haftwerten der Ausstoßversuche als abhängige Variable. Dieser Test wird verwendet, wenn die Messwerte nicht statistisch unabhängig, sondern wie in diesem Fall am gleichen Zahn zu finden sind. Die interindividuellen Faktoren waren das Stiftsystem und das Insertionsverfahren, während Alterung und Lokalisation die intraindividuellen Faktoren verkörperten.

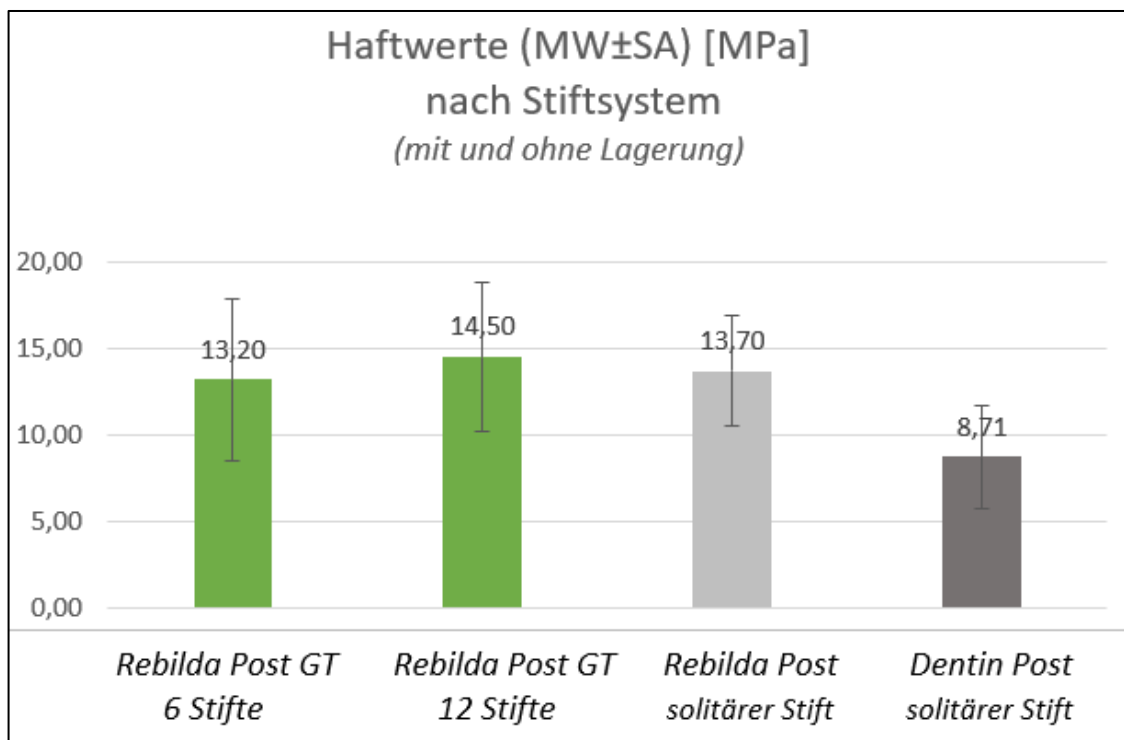
Eine weitere ANOVA wurde entsprechend der Stelle innerhalb des Wurzelkanals durchgeführt (SPSS-Software Version 21.0, Chicago, IL, USA).

Die Analyse der Frakturmodi wurde unter Verwendung von Kreuztabellen und des Chi-Square-Tests vorgenommen.

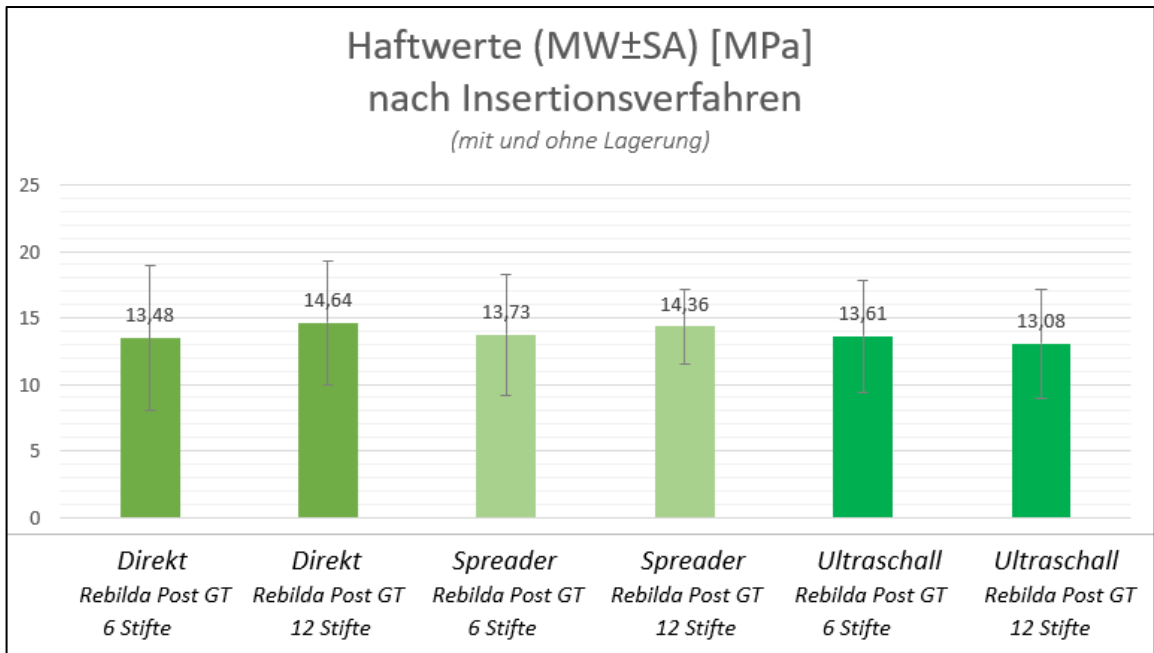
## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 Haftkraft anhand des Stiftsystems, des Insertionsverfahrens und der Lagerung

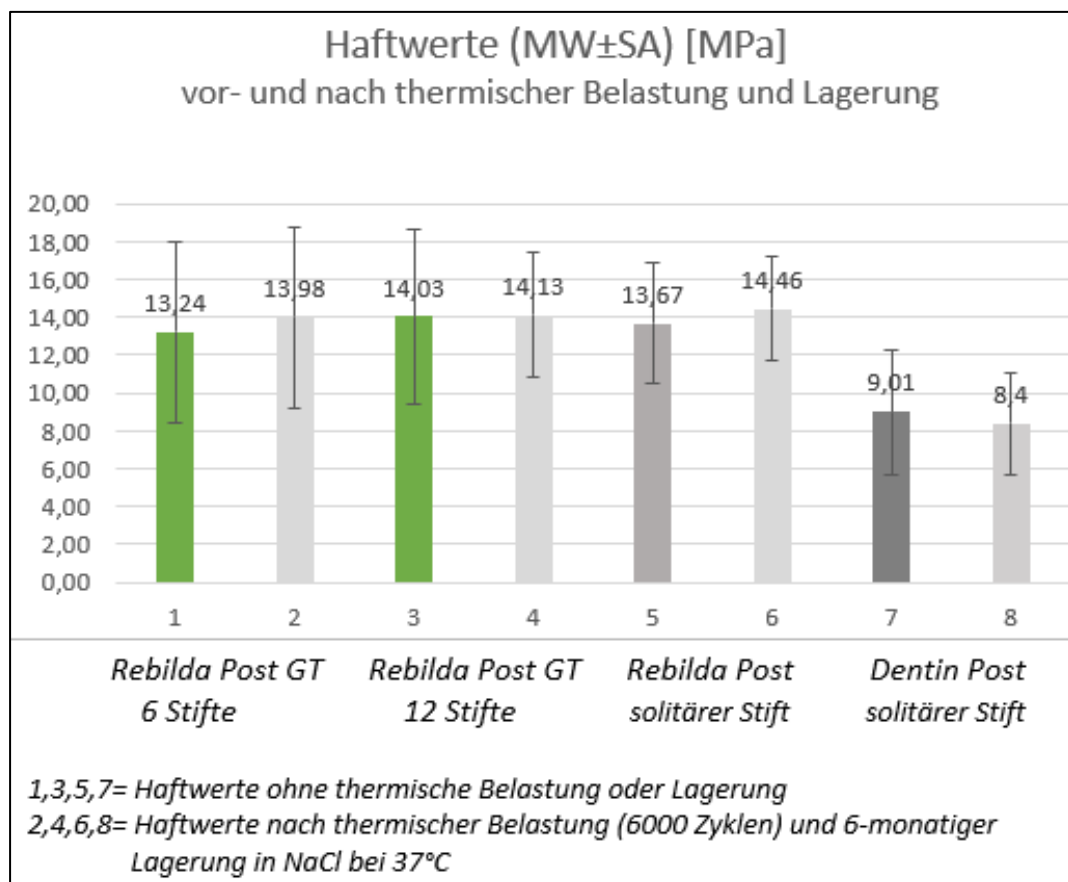
Die nach den Ausstoßversuchen gemessenen Haftwerte ( $MW \pm SA$ ) [MPa] wurden signifikant vom Stiftsystem ( $p < 0,0005$ ) beeinflusst, jedoch nicht von den Insertionsverfahren ( $p = 0,544$ ) oder von der Lagerungszeit ( $p = 0,098$ ; Messwiederholungs-ANOVA). Die Rebuilda Post GT mit sechs ( $13,2 \pm 4,7$ ) oder zwölf gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften ( $14,5 \pm 4,3$ ) zeigten vergleichbare Haftwerte zum solitären Rebuilda-Post-Glasfaserstift ( $13,7 \pm 3,2$ ), indes signifikant höhere Haftwerte im Vergleich zum solitären Dentin-Post-Glasfaserstift ( $8,7 \pm 3,02$ ).



Grafik 1: Haftwerte nach Stiftsystem



Grafik 2: Haftwerte nach Insertionsverfahren



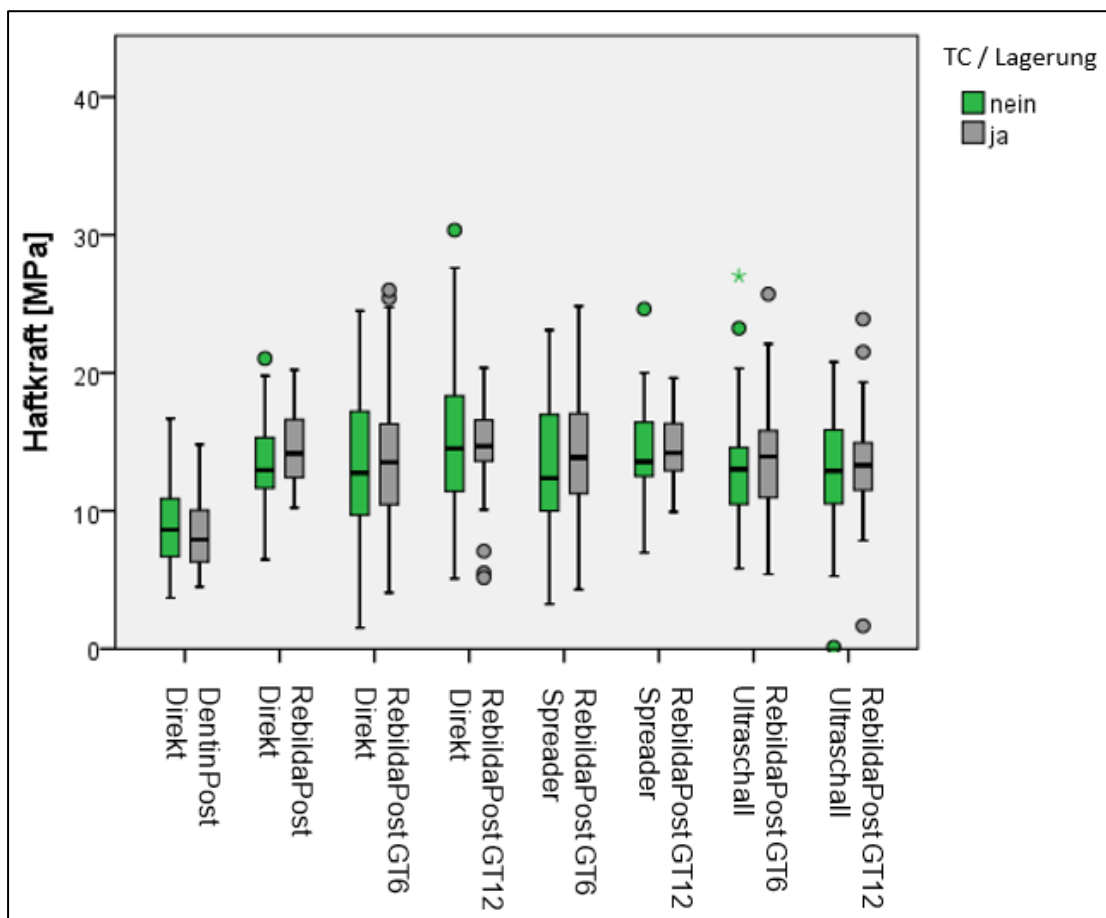
Grafik 3: Haftwerte nach thermischer Belastung und Lagerung

Die Mittelwerte für die Haftkraft sind in Newton (N) pro Quadratmillimeter (mm<sup>2</sup>) ± Standardabweichung (SD) angegeben.

Rebilda Post GT12 (direkte Insertion) ergab die höchsten Messwerte. Der Mittelwert lag bei 14,64 ± 4,65 und der Minimalwert bei 5,09. Der Maximalwert belieft sich auf 30,35 und repräsentiert mithin den höchsten Wert, der in dieser Untersuchung überhaupt erreicht wurde.

Rebilda Post GT12 (Ultraschall Insertion) erreichte einen Mittelwert von 13,08 ± 4,12. Der Minimalwert lag bei 0,12 und der Maximalwert bei 23,90. Der Minimalwert mit 0,12 bildete die niedrigste Messgröße, die in dieser Untersuchung überhaupt erzielt wurde.

ER Dentin Post (direkte Insertion) ergab die niedrigsten Messwerte. Der Mittelwert lag bei 8,71 ± 3,02, der Minimalwert bei 3,70 und der Maximalwert bei 16,70.



Grafik 4: Box Splot – Zusammenfassung der Ergebnisse



## 4.2 Homogenität der Verbundschicht

### *Inhomogenitäten nach Stiftsystem und Insertionsverfahren*

Die Homogenität der Verbundschicht wurde signifikant durch den Stifttyp ( $p = 0.010$ ; Chi-Square-Test) beeinflusst. Die solitären Stifte Rebilda Post und Dentin Post zeigten sich zu 9–10,3 % leicht inhomogen und zu 15,4–17,9 % inhomogen. Dies war – im Vergleich zu den gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften Rebilda Post GT – weniger. Diese gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte waren zu 21,4–22,6 % leicht inhomogen und zu 14,1–20,5 % inhomogen. Die Homogenität der Verbundschicht wurde indes nicht vom Insertionsverfahren beeinflusst ( $p = 0.393$ ; Chi-Square-Test).

Nachstehende Tabelle unterteilt die gesamte Anzahl an Proben jeder Gruppe (78 Dentinscheiben) in ‚homogen‘ ‚leicht inhomogen‘ sowie ‚inhomogen‘. Nach der Unterteilung wurde jeweils der Durchschnitt berechnet. Die Homogenität des Komposits offenbarte keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Haftwerte. Gleichwohl wurden etwas höhere Haftwerte für die homogenen Proben im Vergleich zu den inhomogenen Proben beobachtet.

<i>Inhomogenitäten nach Stiftsystem und Insertionsverfahren</i>		<i>Homogen</i>		<i>Leicht inhomogen</i>		<i>Inhomogen</i>	
		<i>N/cm<sup>2</sup> Haftkraft</i>		<i>N/cm<sup>2</sup> Haftkraft</i>		<i>N/cm<sup>2</sup> Haftkraft</i>	
		<i>Zahl</i>	<i>Durchschnitt</i>	<i>Zahl</i>	<i>Durchschnitt</i>	<i>Zahl</i>	<i>Durchschnitt</i>
<i>GT – direkt</i>	<i>6 Stifte</i>	44	16,77	18	10,61	16	7,67
<i>GT – direkt</i>	<i>12 Stifte</i>	55	15,84	14	12,18	9	11,12
<i>GT – Spreader</i>	<i>6 Stifte</i>	45	15,56	21	10,55	12	12,42
<i>GT – Spreader</i>	<i>12 Stifte</i>	55	15,09	14	12,61	9	12,57
<i>GT – Ultraschall</i>	<i>6 Stifte</i>	47	15,44	11	11,72	20	10,37

<i>GT – Ultraschall</i>	12 Stifte	45	14,94	20	11,77	13	8,57
<i>Rebilda Post</i>	1 Stift	59	14,54	5	14,79	14	11,80
<i>Dentin Post</i>	1 Stift	56	9,33	8	8,05	14	6,59

Tabelle 9: Inhomogenitäten nach Stiftsystem und Insertionsverfahren

Im Rahmen einer weiteren an diese Arbeit anknüpfenden Untersuchung wurden 3D-Bilder erstellt. Dies geschah durch einen Micro-CT-Test (Bruker Micro- CT 12; Kontich, Belgien) bei einer Auflösung von 8 µm. Die Datensätze wurden rekonstruiert (NRecon 1.7, Bruker Micro CT) und anhand eines 3D-Programms abgebildet (CTVox-Software, Bruker).

In den nachfolgenden zwei Abbildungen ist der intrakanaläre Bereich des Komposit-Stiftkomplexes abgebildet. Rebilda Post ist grau longitudinal, die Matrix ist hellgrau und die Inhomogenitäten grün dargestellt. Die Bilder zeigen ein und dieselbe Probe aus drei verschiedenen Perspektiven. Inhomogenitäten wurden in allen Wurzelthirdeln beobachtet, allerdings häufiger zwischen den Stiften als zwischen Komposit und Dentin.

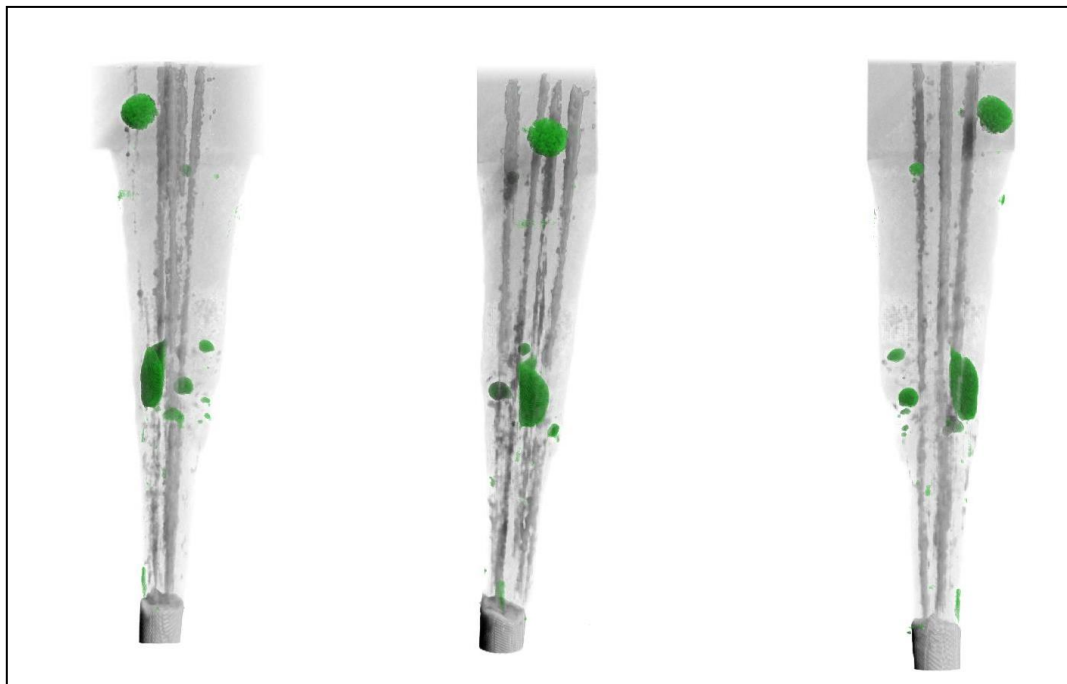


Abbildung 34: Inhomogenitäten im Wurzelkanal bei Rebilda Post GT – sechs Stifte

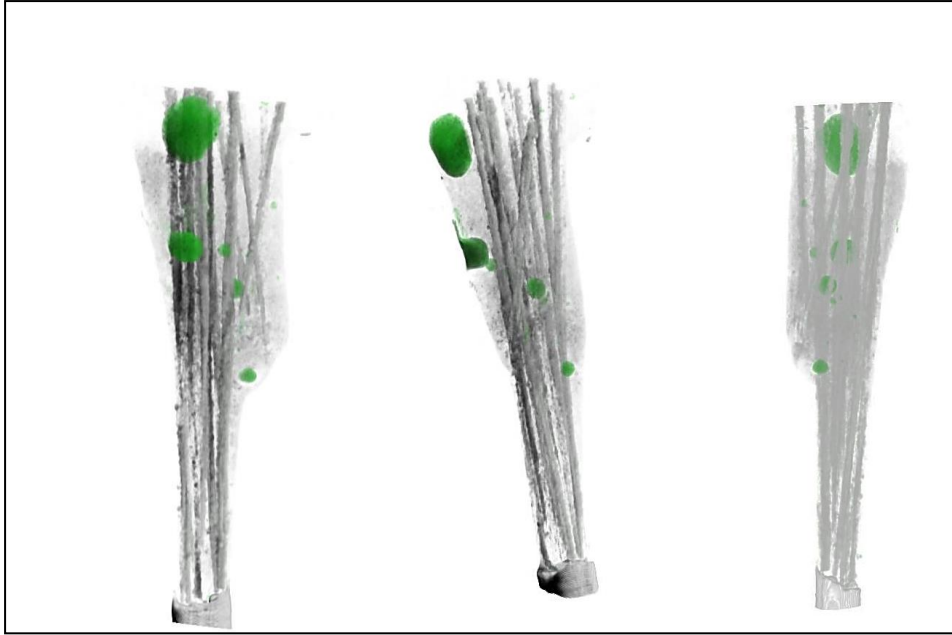


Abbildung 35: Inhomogenitäten im Wurzelkanal bei Rebuilda Post GT – zwölf Stifte

Die folgenden Bilder entstanden während der mikroskopischen Auswertung und zeigen die einzelnen Dentinscheiben. Der helle Rand jeder abgebildeten Probe zeigt das Wurzeldentin; mittig wird jeweils der Komposit-Stiftkomplex veranschaulicht (siehe Abbildung 19).

#### *Homogene Proben*

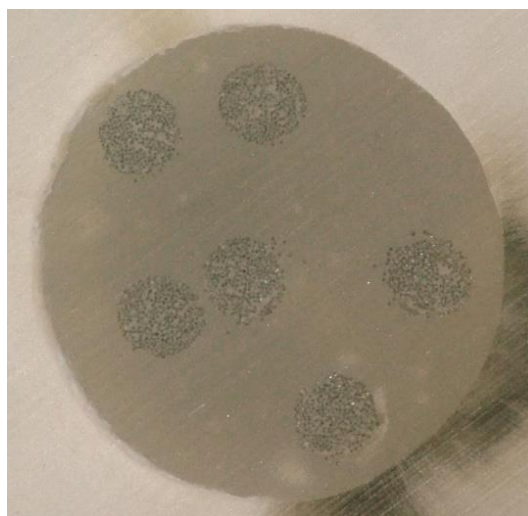
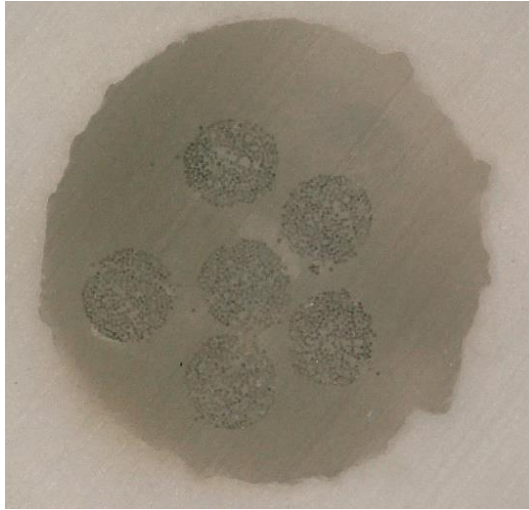
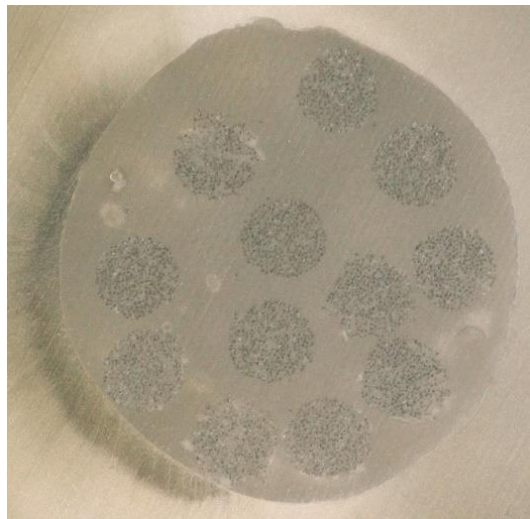


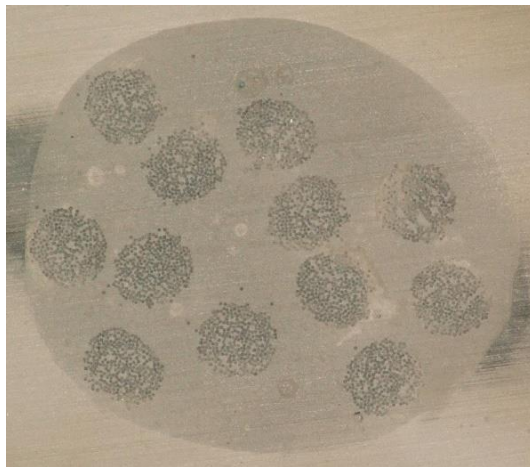
Abbildung 36: Homogene Probe (Rebuilda Post GT 6)



*Abbildung 37: Homogene Probe (Rebilda Post GT 6)*



*Abbildung 38: Homogene Probe (Rebilda Post GT 12)*



*Abbildung 39: Homogene Probe (Rebilda Post GT 12)*



Abbildung 40: Homogene Probe (Rebilda Post)

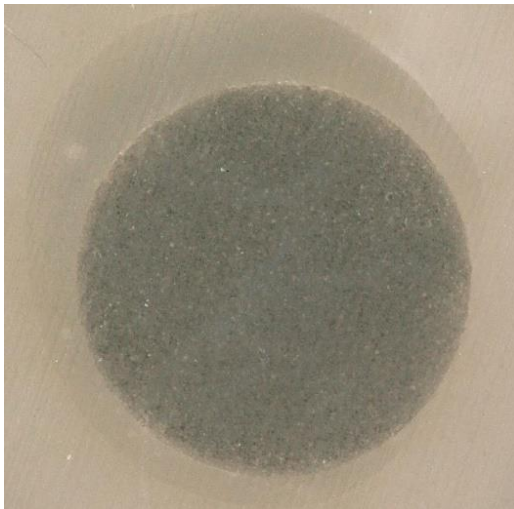


Abbildung 41: Homogene Probe (Dentin Post)

### *Leicht inhomogene Proben*

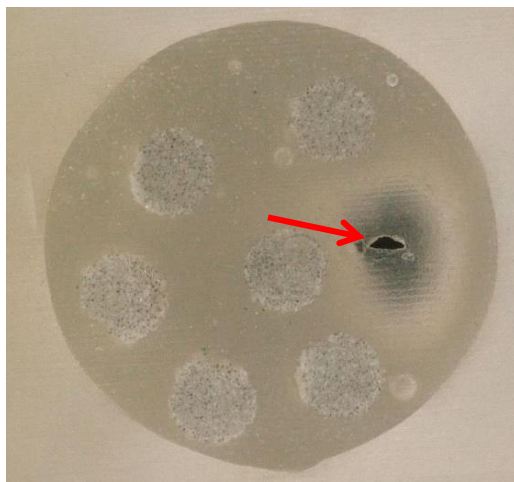


Abbildung 42: Leicht inhomogene Probe (Rebilda Post GT 6) – Spaltbildung (klein bis mittel)



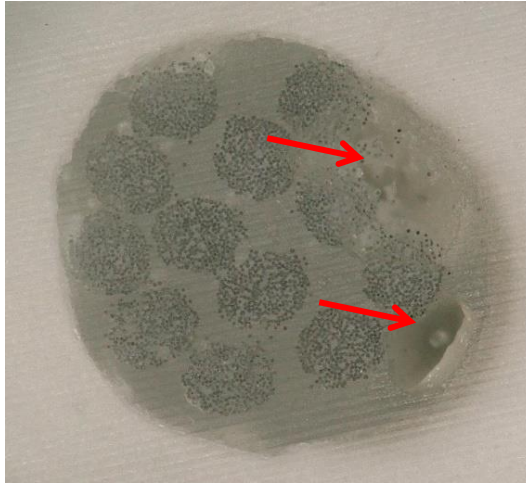


Abbildung 43: Leicht inhomogene Probe (Rebilda Post GT 12) – Blasenbildung (klein bis mittel)

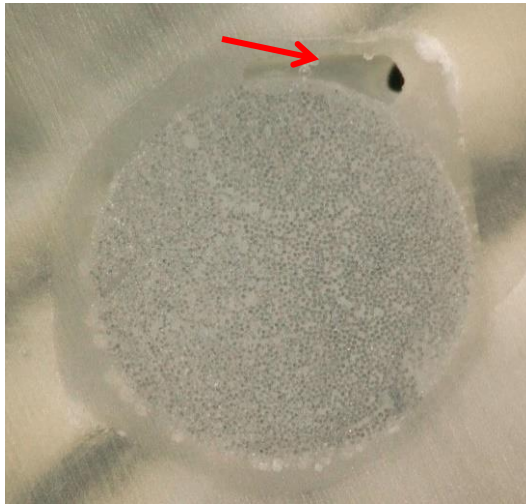


Abbildung 44: Leicht inhomogene Probe (Rebilda Post) – Blasenbildung (klein bis mittel)

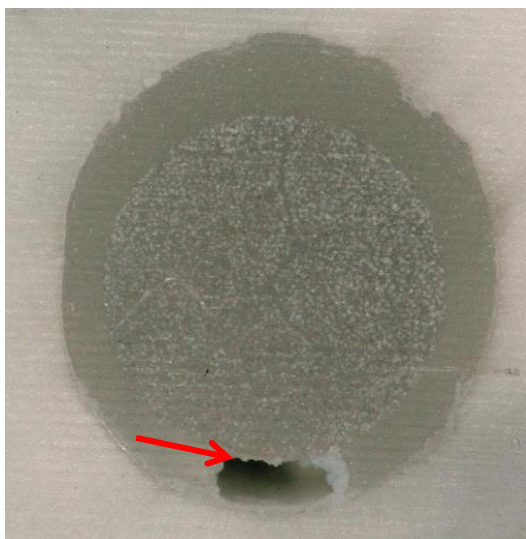
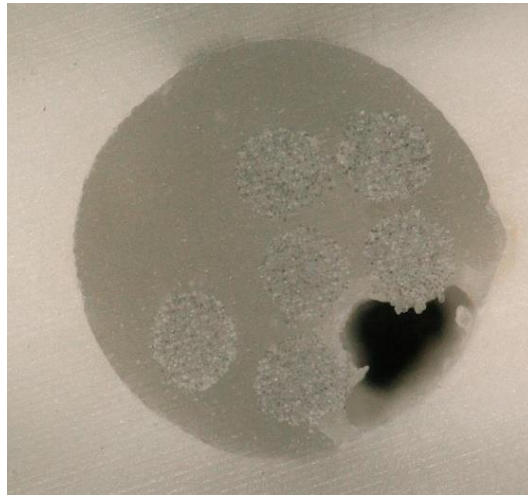
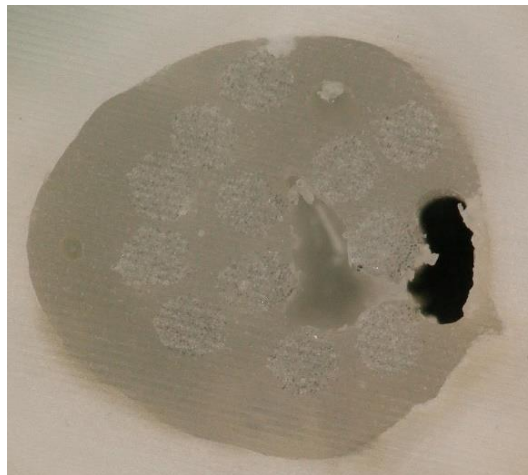


Abbildung 45: Leicht inhomogene Probe (Dentin Post) – Spaltbildung (klein bis mittel)

## *Inhomogene Proben*



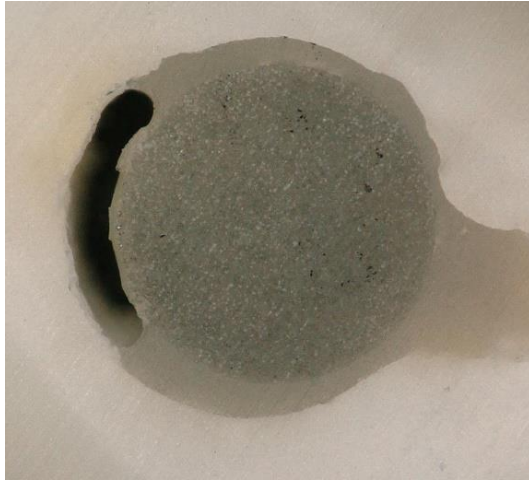
*Abbildung 46: Inhomogene Probe (Rebilda Post GT 6) – Spaltbildung (groß)*



*Abbildung 47: Inhomogene Probe (Rebilda Post GT 12) – Spaltbildung (groß)*



*Abbildung 48: Inhomogene Probe (Rebilda Post) – Spaltbildung (groß)*

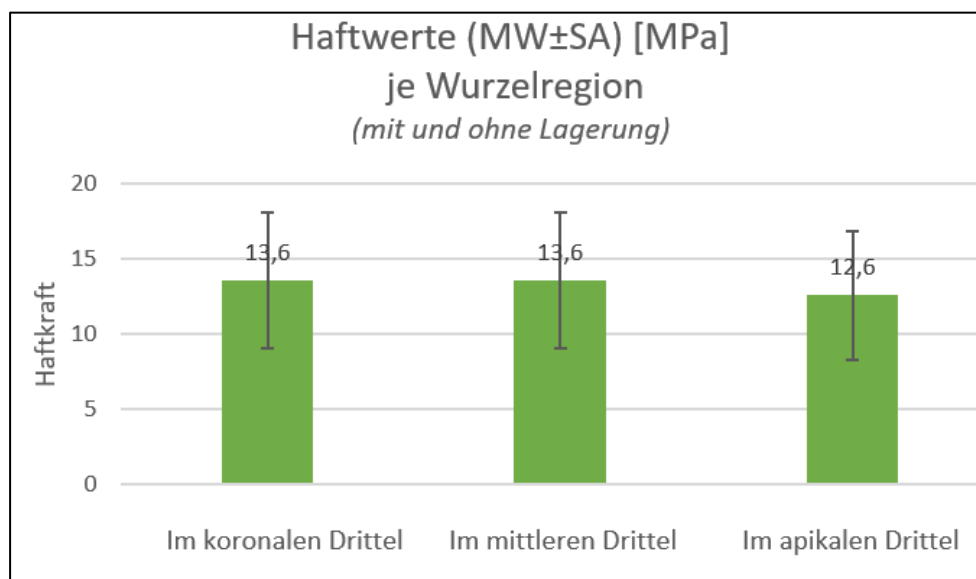


*Abbildung 49: Inhomogene Probe (Dentin Post) – Spaltbildung (sehr groß)*



### 4.3 Haftkraft anhand der Lage im Wurzelkanal und Einfluss der thermischen Belastung

Die nach den Ausstoßversuchen gemessenen Haftwerte ( $MW \pm SA$ ) [MPa] wurden signifikant von der Lage im Wurzelkanal ( $p = 0.004$ ) beeinflusst, jedoch nicht von der Lagerungszeit ( $p = 0.098$ ; Messwiederholungs-ANOVA). Die Haftwerte im apikalen Drittel demonstrierten signifikant niedrigere Werte ( $12.6 \pm 4.3$  MPa) im Vergleich zum mittleren ( $13.6 \pm 4.5$  MPa) und koronalen ( $13.6 \pm 4.5$  MPa) Wurzel Drittel. Nichtsdestotrotz hatte die Lage im Wurzelkanal keinen Einfluss auf das Auftreten von Inhomogenitäten ( $p = 0.469$ ; Chi-Square-Test)



Grafik 5: Haftwerte je Wurzelregion

#### 4.4 Ergebnisse zum Frakturmuster

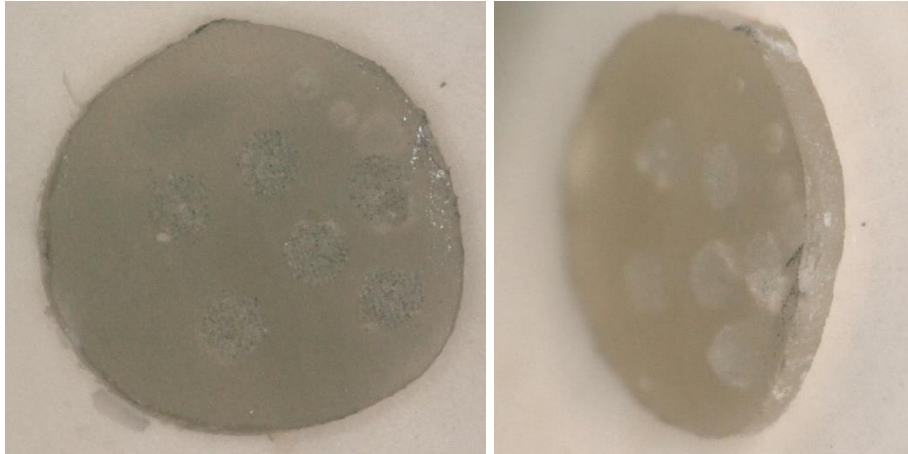
Das Frakturmuster wurde signifikant vom Stifttyp ( $p = < 0.0005$ ; Chi-Square-Test) beeinflusst. Dentin Post zeigte eine Mehrzahl an adhäsivem Versagen zwischen Befestigungskomposit und Stift im Vergleich zu Rebuilda Post.

Die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte Rebuilda Post GT wiesen, in Relation zu den solitären Stiften, häufigeres adhäsives Versagen zwischen Wurzeldentin und Stift sowie häufigeres kohäsives Versagen innerhalb des Befestigungskomposits auf.

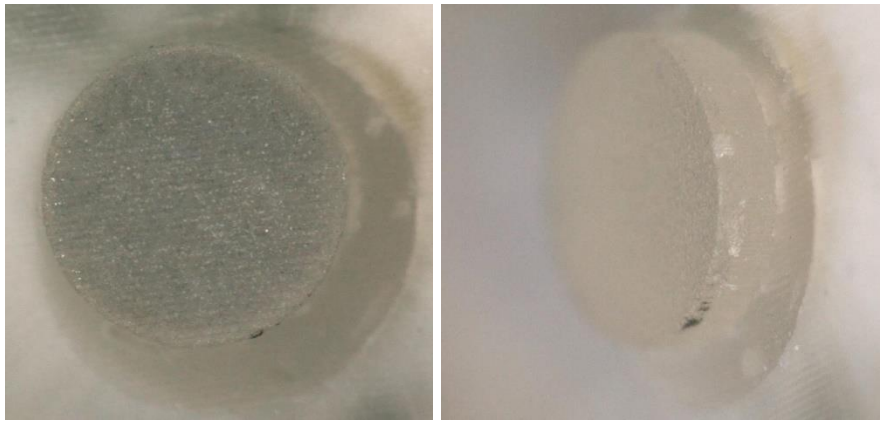
#### *Adhäsives Frakturmuster*

<i>Ergebnisse</i>		<i>Adhäsiv zwischen Komposit und Dentin</i>	<i>Adhäsiv zwischen Komposit und Stift(en)</i>
<i>Frakturmuster</i>			
<i>Rebuilda Post GT</i>	<i>6 Stifte</i>	<i>70,5 %</i>	<i>0,9 %</i>
<i>Rebuilda Post GT</i>	<i>12 Stifte</i>	<i>67,1 %</i>	<i>3,0 %</i>
<i>Rebuilda Post</i>	<i>solitärer Stift</i>	<i>35,9 %</i>	<i>33,3 %</i>
<i>Dentin Post</i>	<i>solitärer Stift</i>	<i>34,6 %</i>	<i>60,3 %</i>

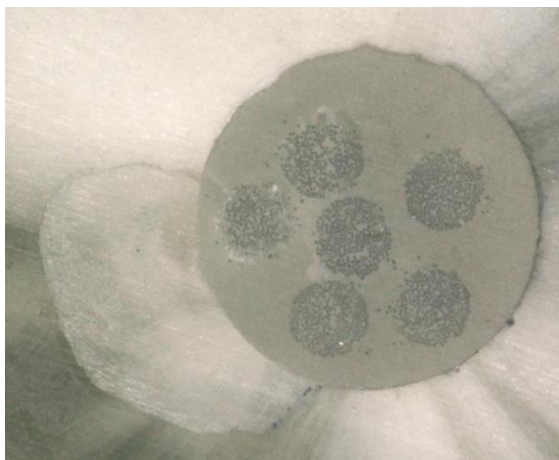
*Tabelle 10: Adhäsives Frakturmuster je Stiftsystem*



*Abbildung 50: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 6)  
zwischen Komposit und Dentin*



*Abbildung 51: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post)  
zwischen Komposit und Stift*



*Abbildung 52: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 6)  
zwischen Komposit und Dentin (mit Dentinbeteiligung)*

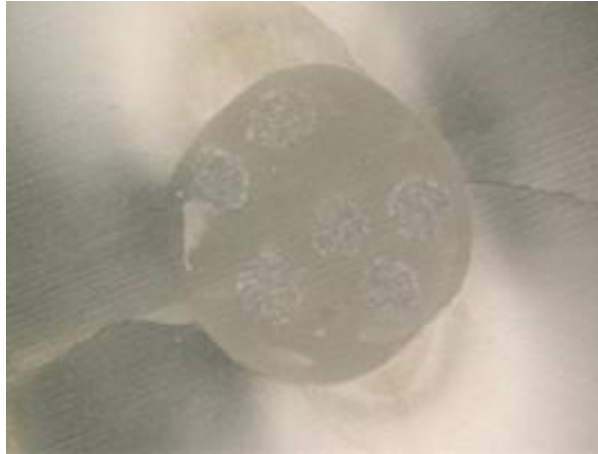


Abbildung 53: Adhäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 6)  
zwischen Komposit und Dentin (mit Dentinfraktur)

### Kohäsives Frakturmuster

Ergebnisse Frakturmuster		Kohäsiv innerhalb des Befestigungskomposits	Kohäsiv innerhalb des/der Stifts/Stifte
Rebilda Post GT	6 Stifte	17,9 %	0,0 %
Rebilda Post GT	12 Stifte	15,5 %	1,9 %
Rebilda Post	Solitärer Stift	1,3 %	15,4 %
Dentin Post	Solitärer Stift	0,0 %	0,0 %

Tabelle 11: Kohäsives Frakturmuster je Stiftsystem

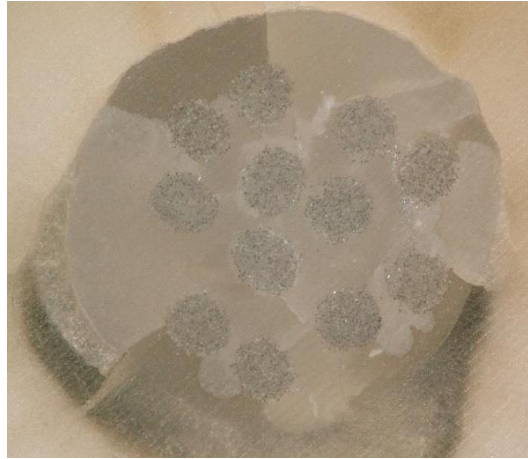


Abbildung 54: Kohäsives Frakturmuster (Rebilda Post GT 12)  
innerhalb des Befestigungskomposits

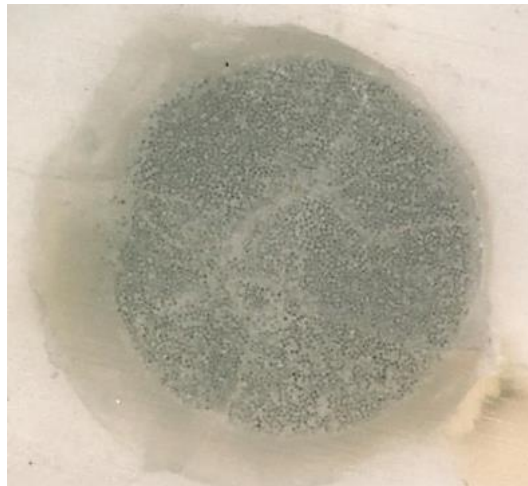


Abbildung 55: Kohäsives Frakturmuster (Rebilda Post)  
innerhalb des Stifts

### **Gemischtes Frakturmuster**

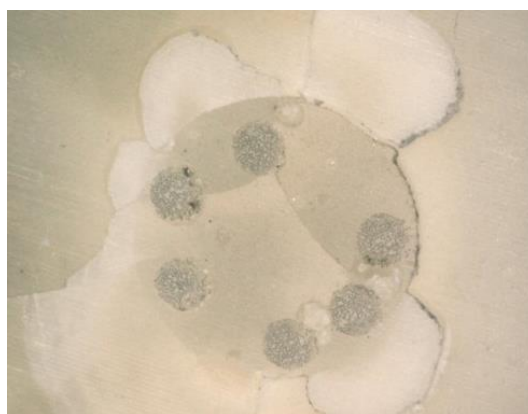
<i>Ergebnisse</i>		<i>Gemischt</i>
<i>Frakturmuster</i>		
<i>Rebilda Post</i>		
<i>GT</i>	<i>6 Stifte</i>	<i>10,7 %</i>

<i>Rebilda Post</i> <i>GT</i>	<i>12 Stifte</i>	<i>9,0 %</i>
<i>Rebilda Post</i>	<i>Solitärer</i> <i>Stift</i>	<i>14,1 %</i>
<i>Dentin Post</i>	<i>Solitärer</i> <i>Stift</i>	<i>5,1 %</i>

*Tabelle 12: Gemischtes Frakturmuster je Stiftsystem*



*Abbildung 56: Gemischtes Frakturmuster (Rebilda Post GT 6)*



*Abbildung 57: Gemischtes Frakturmuster (Rebilda Post GT 6)*

## 5 DISKUSSION

Mittels der vorliegenden Studie wurde der Versuch unternommen, den Einfluss des Insertionsverfahrens und der Stiftanzahl (solitäre Stifte vs. gebündelte glasfaserverstärkte Kompositstifte) auf den adhäsiven Verbund im Wurzelkanal festzustellen sowie die Homogenität der Kompositfuge und die Frakturmuster zu vergleichen.

Als Methodik bediente sich die Studie der mikroskopischen Analyse der Homogenität der Verbundschicht und der Frakturmuster. Zusätzlich wurden Ausstoßversuche, thermische Belastungen und Belastung durch Lagerung an den Proben durchgeführt.

### 5.1 Diskussion der Methodik

#### ***Probensammlung und Lagerung***

Um die Unterschiede in der Anatomie und Kanalgeometrie der Zähne auf ein Mindestmaß zu reduzieren, beschränkte sich diese *In-vitro*-Studie auf die Verwendung oberer Frontzähne mit Ausnahme der Eckzähne (Marceliano-Alves et al., 2018).

Obwohl die Bruchfestigkeit bei Ermüdung menschlichen Dentins mit dem Alter des Gewebes und der Dehydratation abnimmt (Bajaj, Sundaram, Nazari, & Arola, 2006), war die Selektion von Zähnen mit gleichem Alter unrealistisch. Es wurden über 140 Zähne ausschließlich mit ähnlichen klinischen Eigenschaften gesammelt. Zahnärztliche Vorbehandlungen jeder Art, Traumata oder Wurzelkaries waren absolute Ausschlusskriterien, sodass möglichst keine Probe bei der Herstellung benachteiligt wurde.

Während der Sammlungsphase wurden die Zähne in einer 0,5-prozentigen Chloramin-T-Lösung bei Raumtemperatur bis maximal 30 Tage konserviert. Die Wahl der Chloramin-T-Lösung ist ihren desinfizierenden, feuchtigkeitsspendenden Eigenschaften geschuldet. Zudem zeigte diese Lösung im Rahmen einer Studie keinen signifikant negativen Einfluss auf den adhäsiven Verbund (Lee et al., 2007).

Aufgrund der Wahl von drei verschiedenen glasfaserverstärkten Komposit-Stiftsystemen konnte die Vergleichstabelle erweitert werden. Neben den in dieser *In-vitro*-Studie untersuchten gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften wurden zwei bereits etablierte Systeme als Kontrollgruppen ausgewählt. Dabei handelt es sich

einerseits um einen solitären Stift auf Methacrylat-Basis und andererseits um einen solitären Stift aus Epoxidharzbasis.

Jede Zahnprobe wurde 24 Stunden vor Beginn der endodontischen Therapie in destilliertes Wasser gelegt, da während der Lagerung in Chloramin-T die Konzentration dieser Lösung im Dentin erhöht wird und mindestens zwei Stunden erforderlich sind, um diese zu reduzieren (Rolland, Carrick, Walls, & McCabe, 2007).

Beim Dekapitieren der Zähne bis zur Schmelz-Zement-Grenze erfolgte eine zweite Selektionsphase. Zähne mit stark obliterierten Kanälen oder mit komplexer Kanal Anatomie wurden aussortiert. Am Ende dieser beiden Selektionsphasen wurden insgesamt 104 Zähne eingesammelt.

### ***Vorbehandlung der Proben***

Für die Wurzelkanalbehandlungen wurde mit einer reziproken Aufbereitungstechnik bis ISO 45 gearbeitet, mit dem Ziel, möglichst einheitlich, zentriert und zeiteffektiv vorzugehen sowie iatrogene Schäden im apikalen Bereich zu vermeiden (Moore, Fitz-Walter, & Parashos, 2009; Stavileci et al., 2013).

Bei der Wurzelfüllung wurde der geeignete Guttaperchastift bis ein Millimeter vor Erreichen der Arbeitslänge mit dem entsprechenden ‚*Tug-Back*‘-Effekt als Indikator für die Passung eingeführt (Yoon et al., 2015). Ferner wurde im Sinne dieser Studie lediglich der *Downpack* vorgenommen. Um mit einer einheitlichen Arbeit fortzufahren, wurden bei allen Zahnproben darüber hinaus standardisierte Stiftbettpräparationen sowohl für die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte als auch für die solitären Stifte der Kontrollgruppen durchgeführt.

Das Irrigationsprotokoll vor der Stiftinsertion hat bei verschiedenen Adhäsionstechniken unterschiedliche Einflüsse auf die Haftwerte. Dementsprechend müsste dies möglicherweise je nach adhäsiver Technik angepasst werden (Bitter, Hambarayan, Neumann, Blunck, & Sterzenbach, 2013). In der vorliegenden Studie war eine *Self-etch*-adhäsive Technik mit einem dualhärtenden Befestigungskomposit vorgesehen.

Die erste Irrigation im Rahmen der endodontischen Behandlung wurde mit einer dreiprozentigen passiv-ultraschallaktivierten Natriumhypochlorit-Lösung (NaOCl) realisiert. Es besteht die Annahme, dass die NaOCl-Lösung bei hohen Konzentrationen die Haftkraft bedeutend beeinflusst. Eine *In-vitro*-Studie gelangte



indessen zu dem Ergebnis, dass die jeweils unterschiedlich zum Einsatz gebrachten Konzentrationen von NaOCl (von 0,9 % bis zum 5.25 %) keinen Einfluss auf den adhäsiven Verbund zwischen Glasfaserstiften und dem Wurzelkanalentin hatten (Pelegriane, De Martin, Cunha, Pelegriane, & da Silveira Bueno, 2010).

Die anschließende Spülung wurde mit einer einprozentigen passiv-ultraschallaktivierten Natriumhypochlorit-Lösung (NaOCl) mit destilliertem Wasser und Ethanol durchgeführt, um möglichst einen positiven Effekt für die Haftkraft zu erreichen. Es besteht die Annahme, dass Ethanol die Mikropermeabilität verringert. Im Rahmen einer *In-vitro*-Studie wurde festgestellt, dass die Verwendung von Ethanol die Haftwerte im apikalen Bereich bei *Self-etch*-Adhäsiven und einem selbstadhäsiven Befestigungskomposit steigern konnte (Bitter, Polster, et al., 2017). Innerhalb der gleichen *In-vitro*-Studie wurde mikroskopisch eine bessere Infiltration des Adhäsivs in die Dentintubuli beobachtet, wenn Ethanol appliziert wurde (Bitter, Polster, et al., 2017). Ein Grund dafür wird darin gesehen, dass die Applikation von Ethanol die Feuchtigkeit in den unteren Wurzelkanaldrütern reduziert, wodurch die Kollagenmatrix hydrophober werden soll (Liu et al., 2011).

Da alle Zahnproben ähnlich makroskopische Eigenschaften besaßen, wurden diese nach dem Zufallsprinzip in acht Gruppen aufgeteilt.

Die Vorbehandlung durch Silanisierung war in dieser Studie vorgesehen und wurde einheitlich sowohl bei den Untersuchungsgruppen als auch bei den Kontrollgruppen angewendet. Aus diesem Grund wurden keine Vergleichsdaten zwischen den Gruppen erstellt.

In einigen Studien hat sich gezeigt, dass sich die Haftfestigkeitswerte durch vorherige Silanisierung kurz- und langfristig erhöhen (Goracci & Ferrari, 2011; Machado et al., 2015; Magni et al., 2007; Murillo-Gomez, Rueggeberg, & De Goes, 2017). Allerdings deuten andere *In-vitro*-Studien darauf hin, dass die Verwendung von Silan nicht unbedingt vorteilhaft ist (Bitter et al., 2007; Perdigao et al., 2006; Rathke et al., 2009). Die Vorteile der Verwendung von Silan bleiben nach wie vor kontrovers. Ein Silan kann sich ausschließlich an Silikate binden. Entweder sind Fasern an der Oberfläche vorhanden oder es handelt sich um eine Dimethacrylat-Matrix mit Silikatfüllern. Diese Bindung gilt nicht für eine Epoxidharz-Matrix.

## ***Insertionsverfahren***

Für die untersuchten Gruppen wurden klar definierte Insertionsprotokolle erstellt. Da es sich um ein neues Stiftsystem handelt, für das nur wenige *In-vitro*- und keine bekannten *In-vivo*-Studien durchgeführt wurden, wurde auf diese Weise herauszufinden versucht, ob die unterschiedlichen Insertionsverfahren einen signifikanten Einfluss auf die Bildung von Inhomogenitäten sowie auf die Haftkraft besitzen. Mittels diverser Studien erfolgt bereits der Versuch, durch verschiedene Insertionsprotokolle homogenere Dentinproben herzustellen und diese mit konventionellen Techniken zu vergleichen (Caceres et al., 2018; Fakiha, Al-Aujan, & Al-Shamrani, 2001; Hirata et al., 2018; Watzke, Blunck, Frankenberger, & Naumann, 2008). Mithilfe des direkten Insertionsverfahrens konnten sich die einzelnen Stifte ohne die Anwendung von Kraft in die Kanalgeometrie verteilen, während beim Spreader-Insertionsverfahren ähnlich wie bei der lateralen Kondensation eine homogenere Verteilung der Stifte anhand des Handinstruments angestrebt wurde.

Das Ultraschall-Insertionsverfahren zielte auf eine Reduzierung der Blasen ab und suchte daher auch nach mehr Homogenität.

Es wurde bei diversen Studien postuliert, dass die Bildung von Inhomogenitäten (Blasen und Spalten) innerhalb des Befestigungskomposits oder zwischen Befestigungskomposit und Wurzelentin die Werte für die Haftkraft negativ beeinflusst (Bolhuis, de Gee, & Feilzer, 2005; Elbishari et al., 2012; Monticelli et al., 2005; Purk et al., 2007). Gleichwohl wurde konträr dazu suggeriert, dass beispielsweise Luftblasen einen positiven Effekt auf Stress haben könnten, der durch Polymerisation verursacht wird (Perdigao et al., 2007)

Die Insertion bei den Kontrollgruppen wurde nach Herstellerangaben durchgeführt. Aufgrund der Bedingungen sowohl des Aufbaukomposits als auch der Kanalgeometrien kann grundsätzlich jedoch nicht garantiert werden, dass sich keine Luftblasen bilden (Monticelli et al., 2005).

## ***Probenherstellung und thermische Belastung***

Für das Einbetten aller Proben wurde ein kaltpolymerisierendes Kunstharz verwendet. Während des Polymerisationsprozesses wird Wärme freigesetzt. Ob diese Wärme bzw. Temperaturänderung die Haftkraft beeinflusst, konnte nicht beurteilt werden. Hierzu findet sich keine ausreichende Studienlage.

In der vorliegenden Studie wurde die Belastung mit Thermocycling auf die Hälfte der Proben in allen Gruppen angewendet, um die Auswirkungen nach 6.000 Wärmezyklen und sechsmonatiger Lagerung bzw. Langzeitbelastung in einem feuchten Milieu (0.9-prozentige NaCl-Lösung) zu überprüfen und diese mit den restlichen Proben, die nicht thermisch belastet oder gelagert worden sind, zu vergleichen. Die Belastung mit Thermocycling ist eine übliche Methode, die im Rahmen von *In-vitro*-Studien im zahnmedizinischen Bereich eingesetzt wird, um die thermischen Veränderungen zu simulieren, die in der Mundhöhle auftreten (Palmer, Barco, & Billy, 1992). Zum Erreichen realistischer Werte wurde eine klinische Studie durchgeführt, bei der beobachtet wurde, dass die Werte in der Mundhöhle zwischen maximal 55–60 °C und mindestens 0–5 °C schwanken (Palmer et al., 1992). Einerseits zeigte eine Studie, dass die Stimulation mit Thermozyklen die Haftkraft glasfaserverstärkter Wurzelstifte nicht entscheidend beeinflusst, weshalb dieser Methode weniger Bedeutung beigemessen werden sollte (Purton, Chandler, & Qualtrough, 2003). Andererseits konnte in späteren Studien eindeutig belegt werden, dass die thermische Belastung mit Thermozyklen die Haftkraft sehr stark beeinflusst (Bitter, Neumann, & Kielbassa, 2008; Mazzoni et al., 2009; Saghiri, Asatourian, Garcia-Godoy, Gutmann, & Sheibani, 2013). Die Studie von *Mazzoni et al.* stellte in gleicher Weise zu der hier vorliegenden Untersuchung 1 mm dicke Scheiben her, die direkt dem Wasser und den Temperaturen ausgesetzt wurden. Dies könnte veränderte Werte bedingen, da es nicht der klinischen Situation entspricht, bei der der Stift-Komposit-Komplex hermetisch versiegelt ist. Die aufgebrachte thermische Belastung lag zwischen 5–55 °C. Ein *Review* zeigte, dass die Verwendung dieser Temperaturen in anderen *In-vitro*-Studien mit Thermocycling den Standard verkörperte (Morresi et al., 2014).

Die ISO-Norm TR 11405 empfahl die Verwendung von mindestens 500 Zyklen (ISO 1994). Jedoch entstand fünf Jahre später die Annahme, dass 10.000 Zyklen ein Jahr Veralterung entsprechen würden (Gale & Darvell, 1999). Im Rahmen der hier vorliegenden Vergleichsuntersuchung wurden 6.000 Zyklen durchgeführt. Ein *Review* ergab, dass die meisten durchgeführten *In-vitro*-Studien weniger als 10.000 Zyklen durchliefen, was auf die Uneinigkeit mit der von Gale & Darell postulierten Annahme hindeutet (Morresi et al., 2014).

## **Ausstoßversuche**

Zur Ermittlung der Haftwerte wurden Ausstoßversuche vorgenommen. Da eine homogenere Spannungsverteilung im Vergleich zu anderen Verfahren erzeugt werden kann, werden Ausstoßversuche zu diesem Zweck für *In-vitro*-Studien als gültige Methode betrachtet (Soares et al., 2008). Gleichwohl können Fehlinterpretationen der Materialeigenschaften des Adhäsiv-Systems nicht ausgeschlossen werden, da viele Faktoren nicht vollständig beaufsichtigt werden können (El Mourad, 2018). Beispielsweise könnte der Grad der Friktion zu einer Überschätzung der Haftwerte führen (Goracci et al., 2005). Um die Friktionskraft an der Grenzfläche möglichst gering zu halten, können in dieser Studie Scheiben mit einer Dicke von ca. 1 mm verwendet werden (Pashley et al., 1999). Jedoch können durch das Sägen der Zahnproben Artefakte auftreten, die die Werte gleichsam beeinflussen können (Radovic, Mazzitelli, Chieffi, & Ferrari, 2008).

Die Einstellung der Proben zum Ausstoßstempel soll möglichst zentral, großflächig und ohne Dentinbeteiligung erfolgen, um extraaxiale Druckspannungen zu vermeiden (Drummond, Sakaguchi, Racean, Wozny, & Steinberg, 1996). Aus diesem Grund wurden drei Stempel mit den Durchmessern 0,6 mm, 0,8 mm und 0,95 mm jeweils individuell ausgewählt. Dies erlaubte im Rahmen dieser Studie Ausstoßversuche in den unterschiedlichen Wurzelregionen, um zwischen den Haftkräften je Region differenzieren zu können (Goracci et al., 2004)

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

In der vorliegenden *In-vitro*-Studie konnten drei von fünf der Nullhypothesen abgelehnt werden:

Die Haftwerte im Wurzelkanal wurden durch das Stiftsystem beeinflusst, denn Rebuilda Post GT mit sechs und zwölf gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften sowie der solitäre Stift Rebuilda Post wiesen signifikant höhere Haftwerte in Relation zum solitären Stift Dentin Post auf.

Das Auftreten von Inhomogenitäten war abhängig vom Stiftsystem, da die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte signifikant mehr Inhomogenitäten demonstrierten als die solitären Stifte.

Die Frakturmuster waren ebenfalls abhängig vom Stiftsystem: Die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte wiesen in Relation zu den solitären Stiften signifikant häufigeres adhäsives Versagen zwischen Wurzeldentin und Stift sowie häufigeres kohäsives Versagen innerhalb des Befestigungskomposits auf.

In der vorliegenden *In-vitro*-Studie konnten die anderen zwei Nullhypothesen beibehalten werden, da die Haftwerte im Wurzelkanal nicht signifikant durch Insertionsverfahren, Lagerung oder thermische Belastung beeinflusst wurden.

### ***Einfluss des Stiftsystems***

Ein bedeutsamer Einfluss des Stiftsystems auf die Haftwerte sowie auf den Verbund zwischen Stift und Befestigungskomposit wurde bereits in einer früheren *In-vitro*-Studie festgestellt (Zicari, De Munck, Scotti, Naert, & Van Meerbeek, 2012).

Ein Stiftsystem, das dem in dieser Untersuchung verwendeten System ähnelt (everSticks POST, GC Europe N.V.; Leuven, Belgien), war Gegenstand kürzlich durchgeführter *In-vitro*-Studien. Die erste Studie zur Bruchfestigkeit ergab, dass Zirkondioxid-Aufbaustifte deutlich bruchsicherer sind als individuell geformte glasfaserverstärkte Aufbaustifte (Moyin et al., 2019). Die zweite Studie zur Haftfestigkeit konstatierte, dass präfabrizierte Kompositaufbaustifte im Vergleich zu individuell geformten glasfaserverstärkten Aufbaustiften signifikant höhere Haftwerte erreichten (Amizic, Miletic, Baraba, Fan, & Nathanson, 2018).

Die Ergebnisse der zweiten *In-vitro*-Studie weichen von denjenigen der vorliegenden Studie ab, da das präfabrizierte solitäre Stiftsystem von Rebuilda Post keine signifikant höheren Haftwerte aufwies als Rebuilda Post GT mit sechs und zwölf gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften. Ein direkter Vergleich ist nicht möglich, da es sich bei gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften und individuell geformten glasfaserverstärkten Aufbaustiften nicht um dasselbe Stiftsystem handelt.

Der solitäre Stift auf Epoxid-Basis des Dentin-Post-Systems bildete in dieser Studie das Stiftsystem mit den signifikant niedrigsten Werten. In Bezug auf dieses Ergebnis erwies sich die Art des Befestigungskomposits als plausibler Grund, denn in dieser Studie wurde ein Befestigungskomposit auf Methacrylat-Basis verwendet, und es finden sich Hinweise darauf, dass diese Art von Komposit die Co-Polymerisation mit einem auf Epoxid-Basis beruhenden hochpolymerisierten Stift nicht begünstigen soll (Kallio, Lastumaki, & Vallittu, 2001). Im Rahmen dieser Untersuchung könnte diese wahrscheinliche Inkompatibilität zwischen Aufbaumaterial und Stiftoberfläche als mögliche Erklärung für die niedrigen Haftwerte herangezogen werden. Diese Annahme wird durch die Analyse der Frakturmuster verstärkt, da beim Stiftsystem Dentin Post überwiegend adhäsives Versagen zwischen Stift und Befestigungskomposit beobachtet wurde. Ferner wurden in dieser Studie sowohl die Untersuchungsgruppen als auch die Kontrollgruppen mit Silan vorbehandelt. Gemäß der Herstellerangaben wird die Verwendung von Silan sowohl für die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte Rebuilda Post GT mit sechs und zwölf als auch für den solitären Stift Rebuilda Post empfohlen. Eine Studie stellte fest, dass keine allgemeingültige Theorie für Bindungsmechanismen zwischen Silan und Substrat existiert. Dennoch soll die Silanisierung eine chemische Wechselwirkung zwischen Silan-Monomer und dem freiliegenden silanisierbaren Glas auf der Stiftoberfläche ermöglichen (Matinlinna, Lassila, Ozcan, Yli-Urpo, & Vallittu, 2004). Allerdings soll die Interaktion zwischen Silan-Monomer und Epoxidharz-Matrix des solitären Stifts Dentin Post eher gering sein. Es ist strittig, ob diese Gruppe dabei benachteiligt wurde, da über die Auswirkungen der Silanisierung kein Konsens besteht. Einerseits zeigten diverse Studien einen positiven Effekt für die Haftwerte nach Vorbehandlung von Silan (Goracci & Ferrari, 2011; Magni et al., 2007). Andererseits stellten andere Studien fest, dass die Anwendung von Silan weder die Haftwerte erhöht (Perdigao et al., 2006; Wrbas, Altenburger, Schirrmeister, Bitter, & Kielbassa, 2007) noch eine klinische

Bedeutung besitzt (Bitter et al., 2007). Darüber hinaus scheint die Haftverbindung von der spezifischen Stiftoberfläche und Befestigungskomposit sowie auch von der Benetzbarkeit durch Silan abzuhängen (Zicari et al., 2012).

### ***Einfluss der Insertionsverfahren und der Stiftanzahl***

In Bezug auf den Einfluss von Insertionsverfahren – *direkt, Spreader und Ultraschall* – sowie der Anzahl der Stifte – sechs und zwölf – konnten für die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte und die solitären Stifte keine Unterschiede für die Haftwerte nachgewiesen werden.

Eine aktuelle *In-vitro*-Studie hat bereits unterschiedliche Insertionsverfahren bei solitären Aufbaustiften getestet. Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, homogenere Proben herzustellen und herauszufinden, ob diese Proben bessere Werte für die Haftkraft im Vergleich zu konventionellen Verfahren aufweisen (Caceres et al., 2018). Im Rahmen dieser *In-vitro*-Studie konnten keine homogenen Proben durch Ultraschall-Insertion geschaffen werden. Darüber hinaus ließ sich kein Unterschied für die Haftkraft beobachten (Caceres et al., 2018). Eine andere *In-vitro*-Studie konnte mehr Inhomogenitäten innerhalb eines Komposits bei einer Ultraschall-Insertion im Vergleich zur konventionellen Insertion nachweisen. Gleichwohl war kein Einfluss auf die Haftwerte feststellbar (Hirata et al., 2018). Dies verstärkt die Annahme, dass das Insertionsverfahren und das Auftreten von Inhomogenitäten keinen signifikanten Einfluss auf die Haftwerte haben.

Hinsichtlich der adhäsiven Technik wurde in der vorliegenden Studie das *multimode* Adhäsiv Futurabond U angewendet. Dieses gilt als mildes *Self-etch*-Adhäsiv-System und wurde bei der Probenherstellung folglich im *Self-etch-Mode* appliziert. Dennoch zeigte eine *In-vitro*-Studie signifikant höhere Haftwerte im Wurzelkanal mit der *Etch-and-rinse*-Technik als mit der *Self-etch*-Technik für das gleiche Adhäsiv-System (Bitter, Polster, et al., 2017). Die Verwendung von Phosphorsäure hängt von den Angaben des Herstellers ab. Es liegen indes Hinweise darauf vor, dass deren Applikation in der *Etch-and-rinse*-Technik den Verbund zwischen Befestigungskomposit und Wurzelkanaldentin begünstigt (Marchesi et al., 2014). Obwohl die Verwendung von Phosphorsäure einen positiven Effekt zu erzeugen scheint, waren noch weitere Variablen zu berücksichtigen. Beispielsweise konnte weder eine homogene Verteilung an den Dentinwänden noch eine vollständige

Spülung aus dem Wurzelkanal gewährleistet werden. Infolgedessen wurde die *Self-etch*-Technik gemäß Herstellerangaben ohne die Verwendung von Phosphorsäure eingehalten.

### ***Einfluss des Vorhandenseins von Inhomogenitäten***

Bei der optischen mikroskopischen Auswertung konnten signifikant mehr Inhomogenitäten innerhalb des Befestigungskomposits für die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte im Vergleich zu den solitären Stiften festgestellt werden. Nichtsdestotrotz waren die Werte für die Haftkraft vergleichbar. Demnach scheint der Einfluss der Inhomogenitäten auf die Haftkraft bei diesem Stiftsystem gering zu sein. Dies könnte mit der Lage der Blasen innerhalb der Kompositfuge im Zusammenhang stehen. Die meisten Inhomogenitäten waren innerhalb des Befestigungskomposit zu detektieren und hatten keinen Kontakt zum Wurzelkanalentin. Im Rahmen dieser Studie wurden Inhomogenitäten in allen Wurzel Drittel beobachtet. Die Haftwerte im apikalen Drittel zeigten signifikant niedrigere Werte im Vergleich zu den mittleren und koronalen Wurzel Dritteln. Jedoch wurde kein direkter Vergleich gezogen, ob sich die Inhomogenitäten im Komposit-Stiftkomplex befanden oder im Kontakt zum Wurzelkanalentin standen. Es sollte untersucht werden, ob die genaue Lage der Inhomogenitäten eine relevante Rolle für die Haftwerte spielt und ob diese überhaupt eine negative Wirkung haben könnte.

Inhomogenitäten könnten wiederum den Polymerisationsstress reduzieren und sich damit eventuell positiv auf die Haftkraft auswirken. Zudem wurde bereits suggeriert, dass Luftblasen die Spannungsverteilung beeinflussen und eine Anti-Stress-Funktion haben könnten (Perdigao et al., 2007).

Obwohl die Homogenität des Komposits entsprechend der vorliegenden Studie keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Haftwerte zu besitzen schien, wurden etwas höhere Haftwerte für die homogenen Proben im Vergleich zu den inhomogenen Proben beobachtet (siehe Tabelle 9). Allerdings kann laut einer Studie ein negativer Einfluss, beispielsweise von Luftblasen auf die Stabilität des Aufbaus sowie auf die Haftwerte, ausgeschlossen werden (Matsumoto et al., 2017). Die Größe und Qualität der Inhomogenitäten sollten indes Berücksichtigung finden, da ein inhomogener Aufbau mit Guttapercharesten oder Adhäsiv-Überschüssen nicht mit einem Aufbau mit



kleinen Blasen vergleichbar ist. Zudem sind Blasen innerhalb des Komposit-Stiftkomplexes mit ungebundenen Dentinoberflächen nicht komparabel.

Dessen ungeachtet sollte weiter untersucht werden, ob diese Inhomogenitäten *In-vivo*-Auswirkungen haben, wenn die Stifte bei der Funktion belastet werden.

### ***Frakturmuster, thermische Belastung und Lagerung***

Mit Blick auf die Frakturmodi zeigten die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte in keinem Fall ein kohäsives Versagen innerhalb der einzelnen Stifte. Dies könnte darauf hindeuten, dass dieses Stiftsystem eine hohe Bruchfestigkeit im Vergleich zu solitären Stiftsystemen erreichen kann. Gleichwohl sind weitere *In-vitro*- und *In-vivo*-Untersuchungen bei funktioneller Belastung erforderlich, um die Gültigkeit dieser Annahme zu bestimmen.

Ferner konnten nach thermischer Belastung oder Lagerungszeit für die gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstifte vergleichbare Haftwerte erzielt werden. Eine *In-vitro*-Studie ergab, dass die Haftwerte bei einem *multimode* Adhäsiv nach einem Jahr signifikant abnahmen (Marchesi et al., 2014). Dies lässt die Annahme zu, dass die sechsmonatige Lagerungszeit wahrscheinlich zu kurz war, um Unterschiede beobachten zu können.

## 6 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Mit gebündelten glasfaserverstärkten Kompositstiften wurden – unabhängig von Insertionsverfahren oder Stiftanzahl mit solitären Glasfaserstiften – vergleichbar hohe Haftwerte zum Wurzelkanalentin erreicht. Weitere *In-vitro*-Studien sind notwendig, um die Belastbarkeit und Haftkraft zu analysieren.

Im Rahmen der Literaturrecherche dieser Arbeit wurden keine klinischen Daten gefunden, die die Zuverlässigkeit dieser Ergebnisse belegen können. Daher sind auch klinische Studien vonnöten, um die Zuverlässigkeit dieses Systems bei der Funktion zu bestimmen.

Es wurden unabhängig von der Faserstiftanzahl vielfach Inhomogenitäten innerhalb des Befestigungskomposits beobachtet. Weitere *In-vitro*-Studien sind erforderlich, um eine Anti-Stress-Funktion der Luftblasen zu belegen.

## 7 LITERATURNACHWEISE

- Akiba, S., Takamizawa, T., Tsujimoto, A., Moritake, N., Ishii, R., Barkmeier, W. W., Latta, M. A., Miyazaki, M. (2019). Influence of different curing modes on flexural properties, fracture toughness, and wear behavior of dual-cure provisional resin-based composites. *Dent Mater J*, 38(5), 728-737. doi:10.4012/dmj.2018-300
- Al-Dwairi, Z. N., Aleisa, K., & Lynch, E. (2015). Effect of endodontic sealers on push-out bond strength of cemented fiber posts. *Quintessence Int*, 46(4), 299-307. doi:10.3290/j.qi.a33283
- Altmann, A. S., Leitune, V. C., & Collares, F. M. (2015). Influence of Eugenol-based Sealers on Push-out Bond Strength of Fiber Post Luted with Resin Cement: Systematic Review and Meta-analysis. *J Endod*, 41(9), 1418-1423. doi:10.1016/j.joen.2015.05.014
- Amiri, E. M., Balouch, F., & Atri, F. (2017). Effect of Self-Adhesive and Separate Etch Adhesive Dual Cure Resin Cements on the Bond Strength of Fiber Post to Dentin at Different Parts of the Root. *J Dent (Tehran)*, 14(3), 153-158.
- Amizic, I. P., Miletic, I., Baraba, A., Fan, Y., & Nathanson, D. (2018). In vitro retention of prefabricated and individually formed posts: A pilot study. *J Prosthet Dent*, 120(4), 553-557. doi:10.1016/j.prosdent.2018.04.011
- Asmussen, E., Peutzfeldt, A., & Sahafi, A. (2005). Finite element analysis of stresses in endodontically treated, dowel-restored teeth. *J Prosthet Dent*, 94(4), 321-329. doi:10.1016/j.prosdent.2005.07.003
- Bajaj, D., Sundaram, N., Nazari, A., & Arola, D. (2006). Age, dehydration and fatigue crack growth in dentin. *Biomaterials*, 27(11), 2507-2517. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.11.035
- Balbosh, A., & Kern, M. (2006). Effect of surface treatment on retention of glass-fiber endodontic posts. *J Prosthet Dent*, 95(3), 218-223. doi:10.1016/j.prosdent.2006.01.006
- Bateli, M., Kern, M., Wolkewitz, M., Strub, J. R., & Att, W. (2014). A retrospective evaluation of teeth restored with zirconia ceramic posts: 10-year results. *Clin Oral Investig*, 18(4), 1181-1187. doi:10.1007/s00784-013-1065-5
- Bateman, G., Ricketts, D. N., & Saunders, W. P. (2003). Fibre-based post systems: a review. *Br Dent J*, 195(1), 43-48; discussion 37. doi:10.1038/sj.bdj.4810278
- Belli, S., Eraslan, O., Eskitascioglu, G., & Karbhari, V. (2011). Monoblocks in root canals: a finite elemental stress analysis study. *Int Endod J*, 44(9), 817-826. doi:10.1111/j.1365-2591.2011.01885.x
- Berger, S. B., Palialol, A. R., Cavalli, V., & Giannini, M. (2009). Characterization of water sorption, solubility and filler particles of light-cured composite resins. *Braz Dent J*, 20(4), 314-318. doi:10.1590/s0103-64402009000400009
- Bitter, K., Hambarayan, A., Neumann, K., Blunck, U., & Sterzenbach, G. (2013). Various irrigation protocols for final rinse to improve bond strengths of fiber posts inside the root canal. *Eur J Oral Sci*, 121(4), 349-354. doi:10.1111/eos.12057
- Bitter, K., Maletic, A., Neumann, K., Breschi, L., Sterzenbach, G., & Taschner, M. (2017). Adhesive Durability Inside the Root Canal Using Self-adhesive Resin Cements for Luting Fiber Posts. *Oper Dent*, 42(6), E167-e176. doi:10.2341/17-017-I
- Bitter, K., Neumann, K., & Kielbassa, A. M. (2008). Effects of pretreatment and thermocycling on bond strength of resin core materials to various fiber-reinforced composite posts. *J Adhes Dent*, 10(6), 481-489.

- Bitter, K., Noetzel, J., Neumann, K., & Kielbassa, A. M. (2007). Effect of silanization on bond strengths of fiber posts to various resin cements. *Quintessence Int*, 38(2), 121-128.
- Bitter, K., Paris, S., Pfuertner, C., Neumann, K., & Kielbassa, A. M. (2009). Morphological and bond strength evaluation of different resin cements to root dentin. *Eur J Oral Sci*, 117(3), 326-333. doi:10.1111/j.1600-0722.2009.00623.x
- 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*, 19(3), 245-252. doi:10.3290/j.jad.a38415
- Bohrer, T. C., Fontana, P. E., Wandscher, V. F., Morari, V. H. C., Dos Santos, S. S., Valandro, L. F., & Kaize, O. B. (2018). Endodontic Sealers Affect the Bond Strength of Fiber Posts and the Degree of Conversion of Two Resin Cements. *J Adhes Dent*, 20(2), 165-172. doi:10.3290/j.jad.a40301
- Bolhuis, P., de Gee, A., & Feilzer, A. (2005). The influence of fatigue loading on the quality of the cement layer and retention strength of carbon fiber post-resin composite core restorations. *Oper Dent*, 30(2), 220-227.
- Bottino, M. A., Baldissara, P., Valandro, L. F., Galhano, G. A., & Scotti, R. (2007). Effects of mechanical cycling on the bonding of zirconia and fiber posts to human root dentin. *J Adhes Dent*, 9(3), 327-331.
- Breschi, L., Mazzoni, A., Ruggeri, A., Cadenaro, M., Di Lenarda, R., & De Stefano Dorigo, E. (2008). Dental adhesion review: aging and stability of the bonded interface. *Dent Mater*, 24(1), 90-101. doi:10.1016/j.dental.2007.02.009
- Butz, F., Lennon, A. M., Heydecke, G., & Strub, J. R. (2001). Survival rate and fracture strength of endodontically treated maxillary incisors with moderate defects restored with different post-and-core systems: an in vitro study. *Int J Prosthodont*, 14(1), 58-64.
- Caceres, E. A., Sampaio, C. S., Atria, P. J., Moura, H., Giannini, M., Coelho, P. G., & Hirata, R. (2018). Void and gap evaluation using microcomputed tomography of different fiber post cementation techniques. *J Prosthet Dent*, 119(1), 103-107. doi:10.1016/j.prosdent.2017.01.015
- Carvalho, M. P. M., Morari, V. H. C., Susin, A. H., Rocha, R. O., Valandro, L. F., & Soares, F. Z. M. (2017). Endodontic Irrigation Protocols: Effects on Bonding of Adhesive Systems to Coronal Enamel and Dentin. *J Esthet Restor Dent*, 29(3), 222-228. doi:10.1111/jerd.12289
- Chieruzzi, M., Pagano, S., Pennacchi, M., Lombardo, G., D'Errico, P., & Kenny, J. M. (2012). Compressive and flexural behaviour of fibre reinforced endodontic posts. *J Dent*, 40(11), 968-978. doi:10.1016/j.jdent.2012.08.003
- Cruz, J., Sousa, B., Coito, C., Lopes, M., Vargas, M., & Cavalheiro, A. (2019). Microtensile bond strength to dentin and enamel of self-etch vs. etch-and-rinse modes of universal adhesives. *Am J Dent*, 32(4), 174-182.
- Drummond, J. L., Sakaguchi, R. L., Racean, D. C., Wozny, J., & Steinberg, A. D. (1996). Testing mode and surface treatment effects on dentin bonding. *J Biomed Mater Res*, 32(4), 533-541. doi:10.1002/(sici)1097-4636(199612)32:4<533::Aid-jbm6>3.0.Co;2-s
- Edelhoff, D., Heidemann, D., Kern, M., & Weigl, P. (2003). Aufbau endodontisch behandelter Zähne - Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK, der DGZPW und der DGZ. *Zahnärztl Z*, 58, 199.
- Edelhoff, D., & Spiekermann, H. (2003). Alles über moderne Stiftsysteme. *Zahnärztliche Mitteilungen*, 93(7), 820-826.

- Edelhoff, D., Spiekermann, H., & Yildirim, M. (2000). Klinische Erfahrungen mit konfektionierten Wurzelstiften und individuellen Stumpfaufbauten auf Keramik. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 55(11), 746-750.
- Ehrenstein, G. W. (2006). Faser-Verbund-Kunststoffe, Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. *Hanser Verlag*, Kapitel 2 Verstärkungsfasern, S.192 ff.
- El Mourad, A. M. (2018). Assessment of Bonding Effectiveness of Adhesive Materials to Tooth Structure using Bond Strength Test Methods: A Review of Literature. *Open Dent J*, 12, 664-678. doi:10.2174/1745017901814010664
- Elbishari, H., Silikas, N., & Satterthwaite, J. (2012). Filler size of resin-composites, percentage of voids and fracture toughness: is there a correlation? *Dent Mater J*, 31(4), 523-527.
- Elkaffas, A. A., Hamama, H. H. H., & Mahmoud, S. H. (2018). Do universal adhesives promote bonding to dentin? A systematic review and meta-analysis. *Restor Dent Endod*, 43(3), e29. doi:10.5395/rde.2018.43.e29
- Fakiha, Z., Al-Aujan, A., & Al-Shamrani, S. (2001). Retention of cast posts cemented with zinc phosphate cement using different cementing techniques. *J Prosthodont*, 10(1), 37-41.
- Fernandes, A. S., Shetty, S., & Coutinho, I. (2003). Factors determining post selection: a literature review. *J Prosthet Dent*, 90(6), 556-562. doi:10.1016/S002239130300622X
- Ferrari, M., Vichi, A., & Garcia-Godoy, F. (2000). Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. *Am J Dent*, 13(Spec No), 15B-18B.
- Figueiredo, F. E., Martins-Filho, P. R., & Faria, E. S. A. L. (2015). Do metal post-retained restorations result in more root fractures than fiber post-retained restorations? A systematic review and meta-analysis. *J Endod*, 41(3), 309-316. doi:10.1016/j.joen.2014.10.006
- Gale, M. S., & Darvell, B. W. (1999). Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent*, 27(2), 89-99.
- Galhano, G. A., Valandro, L. F., de Melo, R. M., Scotti, R., & Bottino, M. A. (2005). Evaluation of the flexural strength of carbon fiber-, quartz fiber-, and glass fiber-based posts. *J Endod*, 31(3), 209-211.
- Glazer, B. (2000). Restoration of endodontically treated teeth with carbon fibre posts-- a prospective study. *J Can Dent Assoc*, 66(11), 613-618.
- Glazer, B. (2002). Endodontic post evolution: from metal to quartz. *Oral Health*, 5, 43-45.
- Goracci, C., Fabianelli, A., Sadek, F. T., Papacchini, F., Tay, F. R., & Ferrari, M. (2005). The contribution of friction to the dislocation resistance of bonded fiber posts. *J Endod*, 31(8), 608-612.
- Goracci, C., & Ferrari, M. (2011). Current perspectives on post systems: a literature review. *Aust Dent J*, 56 Suppl 1, 77-83. doi:10.1111/j.1834-7819.2010.01298.x
- Goracci, C., Tavares, A. U., Fabianelli, A., Monticelli, F., Raffaelli, O., Cardoso, P. C., Tay, F., Ferrari, M. (2004). The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci*, 112(4), 353-361. doi:10.1111/j.1600-0722.2004.00146.x
- Heydecke, G., Butz, F., Hussein, A., & Strub, J. R. (2002). Fracture strength after dynamic loading of endodontically treated teeth restored with different post-and-core systems. *J Prosthet Dent*, 87(4), 438-445.
- Hikita, K., Van Meerbeek, B., De Munck, J., Ikeda, T., Van Landuyt, K., Maida, T., Lambrechts, P., Peumans, M. (2007). Bonding effectiveness of adhesive luting

- agents to enamel and dentin. *Dent Mater*, 23(1), 71-80. doi:10.1016/j.dental.2005.12.002
- Hirata, R., Pacheco, R. R., Caceres, E., Janal, M. N., Romero, M. F., Giannini, M., Coelho, P. G., Rueggeberg, F. A. (2018). Effect of Sonic Resin Composite Delivery on Void Formation Assessed by Micro-computed Tomography. *Oper Dent*, 43(2), 144-150. doi:10.2341/16-331-l
- Janssen, U., Hülsmann, M.(2003). Das Bruchlastverhalten endodontisch verankerter Aufbauten mit den Wurzelstiftsystemen Luscent-Anchor und Perma-Tex im In-vitro Test. *Dtsch Zahnärztl Z*, 58, 331-336.
- Jung, S. H., Min, K. S., Chang, H. S., Park, S. D., Kwon, S. N., & Bae, J. M. (2007). Microleakage and fracture patterns of teeth restored with different posts under dynamic loading. *J Prosthet Dent*, 98(4), 270-276. doi:10.1016/s0022-3913(07)60100-0
- Kallio, T. T., Lastumaki, T. M., & Vallittu, P. K. (2001). Bonding of restorative and veneering composite resin to some polymeric composites. *Dent Mater*, 17(1), 80-86.
- Kar, S., Tripathi, A., & Trivedi, C. (2017). Effect of Different Ferrule Length on Fracture Resistance of Endodontically Treated Teeth: An In vitro Study. *J Clin Diagn Res*, 11(4), Zc49-zc52. doi:10.7860/jcdr/2017/24669.9675
- Kim, H.-R., Kim, Y. K., & Kwon, T.-Y. (2017). Post space preparation timing of root canals sealed with AH Plus sealer. *Restorative dentistry & endodontics*, 42(1), 27-33. doi:10.5395/rde.2017.42.1.27
- Kishen, A., Kumar, G. V., & Chen, N. N. (2004). Stress-strain response in human dentine: rethinking fracture predilection in postcore restored teeth. *Dent Traumatol*, 20(2), 90-100. doi:10.1111/j.1600-4469.2004.00250.x
- Lang, H., Korkmaz, Y., Schneider, K., & Raab, W. H. (2006). Impact of endodontic treatments on the rigidity of the root. *J Dent Res*, 85(4), 364-368. doi:10.1177/154405910608500416
- Lastumaki, T. M., Kallio, T. T., & Vallittu, P. K. (2002). The bond strength of light-curing composite resin to finally polymerized and aged glass fiber-reinforced composite substrate. *Biomaterials*, 23(23), 4533-4539.
- Lee, J. J., Nettek-Marbell, A., Cook, A., Jr., Pimenta, L. A., Leonard, R., & Ritter, A. V. (2007). Using extracted teeth for research: the effect of storage medium and sterilization on dentin bond strengths. *J Am Dent Assoc*, 138(12), 1599-1603.
- Liu, Y., Tjaderhane, L., Breschi, L., Mazzoni, A., Li, N., Mao, J., Pashley, D. H., Tay, F. R. (2011). Limitations in bonding to dentin and experimental strategies to prevent bond degradation. *J Dent Res*, 90(8), 953-968. doi:10.1177/0022034510391799
- Luhurs, A. K., De Munck, J., Geurtsen, W., & Van Meerbeek, B. (2014). Composite cements benefit from light-curing. *Dent Mater*, 30(3), 292-301. doi:10.1016/j.dental.2013.11.012
- Machado, F. W., Bossardi, M., Ramos Tdos, S., Valente, L. L., Munchow, E. A., & Piva, E. (2015). Application of resin adhesive on the surface of a silanized glass fiber-reinforced post and its effect on the retention to root dentin. *J Endod*, 41(1), 106-110. doi:10.1016/j.joen.2014.09.014
- Magne, P., Lazari, P. C., Carvalho, M. A., Johnson, T., & Del Bel Cury, A. A. (2017). Ferrule-Effect Dominates Over Use of a Fiber Post When Restoring Endodontically Treated Incisors: An In Vitro Study. *Oper Dent*, 42(4), 396-406. doi:10.2341/16-243-l

- 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 bond strength test and an SEM investigation following different treatments of the post surface. *J Adhes Dent*, *9*(2), 195-202.
- Marceliano-Alves, M. F., de Lima, C. O., Augusto, C. M., Almeida Barbosa, A. F., Vieira Bruno, A. M., Rosa, A. M., & Lopes, R. T. (2018). The internal root canal morphology of single-rooted mandibular canines revealed by micro-computed tomography. *J Conserv Dent*, *21*(6), 588-591. doi:10.4103/jcd.Jcd\_313\_18
- Marchesi, G., Frassetto, A., Mazzoni, A., Apolonio, F., Diolosa, M., Cadenaro, M., Di Lenarda, R., Pashley, D. H., Tay, F., Breschi, L. (2014). Adhesive performance of a multi-mode adhesive system: 1-year in vitro study. *J Dent*, *42*(5), 603-612. doi:10.1016/j.jdent.2013.12.008
- Marchionatti, A. M. E., Wandscher, V. F., Rippe, M. P., Kaizer, O. B., & Valandro, L. F. (2017). Clinical performance and failure modes of pulpless teeth restored with posts: a systematic review. *Braz Oral Res*, *31*, e64. doi:10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0064
- Matinlinna, J. P., Lassila, L. V., Ozcan, M., Yli-Urpo, A., & Vallittu, P. K. (2004). An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. *Int J Prosthodont*, *17*(2), 155-164.
- Matsumoto, M., Mine, A., Miura, J., Minamino, T., Iwashita, T., Nakatani, H., Nishida, T., Takeshige, F., Yatani, H. (2017). Bonding effectiveness and multi-interfacial characterization of two direct buildup resin core systems bonded to post-space dentin. *Clin Oral Investig*, *21*(1), 309-317. doi:10.1007/s00784-016-1792-5
- Mazzoni, A., Marchesi, G., Cadenaro, M., Mazzotti, G., Di Lenarda, R., Ferrari, M., & Breschi, L. (2009). Push-out stress for fibre posts luted using different adhesive strategies. *Eur J Oral Sci*, *117*(4), 447-453. doi:10.1111/j.1600-0722.2009.00656.x
- Mazzoni, A., Tjaderhane, L., Checchi, V., Di Lenarda, R., Salo, T., Tay, F. R., Pashley, D. H., Breschi, L. (2015). Role of dentin MMPs in caries progression and bond stability. *J Dent Res*, *94*(2), 241-251. doi:10.1177/0022034514562833
- Mjor, I. A., Smith, M. R., Ferrari, M., & Mannocci, F. (2001). The structure of dentine in the apical region of human teeth. *Int Endod J*, *34*(5), 346-353.
- Monticelli, F., Ferrari, M., & Toledano, M. (2008). Cement system and surface treatment selection for fiber post luting. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, *13*(3), E214-221.
- Monticelli, F., Goracci, C., Grandini, S., Garcia-Godoy, F., & Ferrari, M. (2005). Scanning electron microscopic evaluation of fiber post-resin core units built up with different resin composites. *Am J Dent*, *18*(1), 61-65.
- Moore, J., Fitz-Walter, P., & Parashos, P. (2009). A micro-computed tomographic evaluation of apical root canal preparation using three instrumentation techniques. *Int Endod J*, *42*(12), 1057-1064. doi:10.1111/j.1365-2591.2009.01626.x
- Morresi, A. L., D'Amario, M., Capogreco, M., Gatto, R., Marzo, G., D'Arcangelo, C., & Monaco, A. (2014). Thermal cycling for restorative materials: does a standardized protocol exist in laboratory testing? A literature review. *J Mech Behav Biomed Mater*, *29*, 295-308. doi:10.1016/j.jmbbm.2013.09.013
- Moura, A. S., Pereira, R. D., Rached, F. J. J., Crozeta, B. M., Mazzi-Chaves, J. F., Souza-Flamini, L. E., & Cruz, A. M. F. (2017). Influence of root dentin treatment on the push-out bond strength of fibre-reinforced posts. *Braz Oral Res*, *31*, e29. doi:10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0029

- Moyin, S., Chaturvedi, S., Alqahtani, N. M., Shariff, M., Abdelmonem, A. M., & Alfarsi, M. A. (2019). An In Vitro Evaluation of Fracture Resistance Strength of Different Post Systems in Endodontically Treated Teeth. *J Pharm Bioallied Sci*, 11(Suppl 2), S236-s239. doi:10.4103/jpbs.Jpbs\_306\_18
- Murillo-Gomez, F., Rueggeberg, F. A., & De Goes, M. F. (2017). Short- and Long-Term Bond Strength Between Resin Cement and Glass-Ceramic Using a Silane-Containing Universal Adhesive. *Oper Dent*, 42(5), 514-525. doi:10.2341/16-211-l
- Mustafa, A. A., Matinlinna, J. P., Saidin, S., & Kadir, M. R. (2014). The influence of experimental silane primers on dentin bond strength and morphology: a laboratory and finite element analysis study. *J Prosthet Dent*, 112(6), 1498-1506. doi:10.1016/j.prosdent.2014.05.011
- Naumann, M. (2003). Wann Wurzelstifte indiziert sind - Klassifikation und Therapiekonzept. *Quintessenz*. 54(9), 931-938.
- Naumann, M., & Blankenstein, F. (2002). *Adhäsive Restauration endodontisch behandelter Zähne mit Hilfe glasfaserverstärkter Kompositstifte - Konzept und Technik*.
- Naumann, M., Blankenstein, F., & Dietrich, T. (2005). Survival of glass fibre reinforced composite post restorations after 2 years-an observational clinical study. *J Dent*, 33(4), 305-312. doi:10.1016/j.jdent.2004.09.005
- Naumann, M., Koelpin, M., Beuer, F., & Meyer-Lueckel, H. (2012). 10-year survival evaluation for glass-fiber-supported postendodontic restoration: a prospective observational clinical study. *J Endod*, 38(4), 432-435. doi:10.1016/j.joen.2012.01.003
- Naumann, M., & Lange, K-P. (2003). Ansichten und Techniken zur Rekonstruktion endodontisch behandelter Zähne- eine Umfrage unter Zahnärzten im Bundesgebiert. *DZZ*, 58(5), 280-285.
- Naumann, M., Neuhaus, K. W., Kolpin, M., & Seemann, R. (2016). Why, when, and how general practitioners restore endodontically treated teeth: a representative survey in Germany. *Clin Oral Investig*, 20(2), 253-259. doi:10.1007/s00784-015-1505-5
- Nergiz, I., & Schmage, P. (2004). Wurzelstifte im Wandel der Zeit. *Endodontie Journal*, 1, 10-17
- Nothdurft, F. P., & Pospiech, P. R. (2006). Clinical evaluation of pulpless teeth restored with conventionally cemented zirconia posts: a pilot study. *J Prosthet Dent*, 95(4), 311-314. doi:10.1016/j.prosdent.2006.02.024
- Oliveira, L. V., Maia, T. S., Zancoppe, K., Menezes, M. S., Soares, C. J., & Moura, C. C. G. (2018). Can intra-radicular cleaning protocols increase the retention of fiberglass posts? A systematic review. *Braz Oral Res*, 32, e16. doi:10.1590/1807-3107bor-2018.vol32.0016
- Palmer, D. S., Barco, M. T., & Billy, E. J. (1992). Temperature extremes produced orally by hot and cold liquids. *J Prosthet Dent*, 67(3), 325-327.
- Pashley, D. H., Carvalho, R. M., Sano, H., Nakajima, M., Yoshiyama, M., Shono, Y., Fernandes, C. A., Tay, F. (1999). The microtensile bond test: a review. *J Adhes Dent*, 1(4), 299-309.
- Pashley, D. H., Tay, F. R., Breschi, L., Tjaderhane, L., Carvalho, R. M., Carrilho, M., & Tezvergil-Mutluay, A. (2011). State of the art etch-and-rinse adhesives. *Dent Mater*, 27(1), 1-16. doi:10.1016/j.dental.2010.10.016
- Pelegrine, R. A., De Martin, A. S., Cunha, R. S., Pelegrine, A. A., & da Silveira Bueno, C. E. (2010). Influence of chemical irrigants on the tensile bond strength of an



- adhesive system used to cement glass fiber posts to root dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 110(5), e73-76. doi:10.1016/j.tripleo.2010.05.005
- Perdigao, J. (2010). Dentin bonding-variables related to the clinical situation and the substrate treatment. *Dent Mater*, 26(2), e24-37. doi:10.1016/j.dental.2009.11.149
- Perdigao, J., Gomes, G., & Augusto, V. (2007). The effect of dowel space on the bond strengths of fiber posts. *J Prosthodont*, 16(3), 154-164. doi:10.1111/j.1532-849X.2006.00166.x
- Perdigao, J., Gomes, G., & Lee, I. K. (2006). The effect of silane on the bond strengths of fiber posts. *Dent Mater*, 22(8), 752-758. doi:10.1016/j.dental.2005.11.002
- Perdigao, J., & Loguercio, A. D. (2014). Universal or Multi-mode Adhesives: Why and How? *J Adhes Dent*, 16(2), 193-194. doi:10.3290/j.jad.a31871
- Portigliatti, R. P., Tumini, J. L., Bertoldi Hepburn, A. D., Aromando, R. F., & Olmos, J. L. (2017). Correspondence between fiber post and drill dimensions for post canal preparation. *Am J Dent*, 30(6), 295-298.
- Preethi, G., & Kala, M. (2008). Clinical evaluation of carbon fiber reinforced carbon endodontic post, glass fiber reinforced post with cast post and core: A one year comparative clinical study. *J Conserv Dent*, 11(4), 162-167. doi:10.4103/0972-0707.48841
- Purk, J. H., Dusevich, V., Glaros, A., & Eick, J. D. (2007). Adhesive analysis of voids in Class II composite resin restorations at the axial and gingival cavity walls restored under in vivo versus in vitro conditions. *Dent Mater*, 23(7), 871-877. doi:10.1016/j.dental.2006.07.001
- Purton, D. G., Chandler, N. P., & Qualtrough, A. J. (2003). Effect of thermocycling on the retention of glass-fiber root canal posts. *Quintessence Int*, 34(5), 366-369.
- Qualtrough, A. J., & Mannocci, F. (2003). Tooth-colored post systems: a review. *Oper Dent*, 28(1), 86-91.
- Radovic, I., Mazzitelli, C., Chieffi, N., & Ferrari, M. (2008). Evaluation of the adhesion of fiber posts cemented using different adhesive approaches. *Eur J Oral Sci*, 116(6), 557-563. doi:10.1111/j.1600-0722.2008.00577.x
- Rasimick, B. J., Wan, J., Musikant, B. L., & Deutsch, A. S. (2010). A review of failure modes in teeth restored with adhesively luted endodontic dowels. *J Prosthodont*, 19(8), 639-646. doi:10.1111/j.1532-849X.2010.00647.x
- Rathke, A., Haj-Omer, D., Muche, R., & Haller, B. (2009). Effectiveness of bonding fiber posts to root canals and composite core build-ups. *Eur J Oral Sci*, 117(5), 604-610. doi:10.1111/j.1600-0722.2009.00668.x
- Rolland, S. L., Carrick, T. E., Walls, A. W., & McCabe, J. F. (2007). Dentin decontamination using chloramine T prior to experiments involving bacteria. *Dent Mater*, 23(12), 1468-1472. doi:10.1016/j.dental.2007.01.001
- Sadek, F. T., Monticelli, F., Goracci, C., Tay, F. R., Cardoso, P. E., & Ferrari, M. (2007). Bond strength performance of different resin composites used as core materials around fiber posts. *Dent Mater*, 23(1), 95-99. doi:10.1016/j.dental.2005.12.005
- Saghiri, M. A., Asatourian, A., Garcia-Godoy, F., Gutmann, J. L., & Sheibani, N. (2013). The impact of thermocycling process on the dislodgement force of different endodontic cements. *Biomed Res Int*, 2013, 317185. doi:10.1155/2013/317185
- Sahafi, A., Peutzfeldt, A., Asmussen, E., & Gotfredsen, K. (2003). Bond strength of resin cement to dentin and to surface-treated posts of titanium alloy, glass fiber, and zirconia. *J Adhes Dent*, 5(2), 153-162.
- Sauro, S., Pashley, D. H., Mannocci, F., Tay, F. R., Pilecki, P., Sherriff, M., & Watson, T. F. (2008). Micropermeability of current self-etching and etch-and-rinse

- adhesives bonded to deep dentine: a comparison study using a double-staining/confocal microscopy technique. *Eur J Oral Sci*, 116(2), 184-193. doi:10.1111/j.1600-0722.2007.00518.x
- Schmitter, M., Hamadi, K., & Rammelsberg, P. (2011). Survival of two post systems--five-year results of a randomized clinical trial. *Quintessence Int*, 42(10), 843-850.
- Soares, C. J., Santana, F. R., Castro, C. G., Santos-Filho, P. C., Soares, P. V., Qian, F., & Armstrong, S. R. (2008). Finite element analysis and bond strength of a glass post to intraradicular dentin: comparison between microtensile and push-out tests. *Dent Mater*, 24(10), 1405-1411. doi:10.1016/j.dental.2008.03.004
- Stavileci, M., Hoxha, V., Gorduysus, O., Tatar, I., Laperre, K., Hostens, J., Kucukkaya, S., Berisha, M. (2013). Effects of preparation techniques on root canal shaping assessed by micro-computed tomography. *Med Sci Monit Basic Res*, 19, 163-168. doi:10.12659/msmbr.889350
- Stavridakis, M., Brokos, Y., & Krejci, I. (2018). Is the glass half empty or half full? A novel "philosophical" approach to the "mystery" of the so-called ferrule effect. *Med Hypotheses*, 115, 35-41. doi:10.1016/j.mehy.2018.03.013
- Sterzenbach, G., Franke, A., & Naumann, M. (2012). Rigid versus flexible dentine-like endodontic posts--clinical testing of a biomechanical concept: seven-year results of a randomized controlled clinical pilot trial on endodontically treated abutment teeth with severe hard tissue loss. *J Endod*, 38(12), 1557-1563. doi:10.1016/j.joen.2012.08.015
- Sterzenbach, G., Karajouli, G., Naumann, M., Peroz, I., & Bitter, K. (2012). Fiber post placement with core build-up materials or resin cements--an evaluation of different adhesive approaches. *Acta Odontol Scand*, 70(5), 368-376. doi:10.3109/00016357.2011.603702
- Stober, T., & Rammelsberg, P. (2005). The failure rate of adhesively retained composite core build-ups in comparison with metal-added glass ionomer core build-ups. *J Dent*, 33(1), 27-32. doi:10.1016/j.jdent.2004.07.006
- Tang, W., Wu, Y., & Smales, R. J. (2010). Identifying and reducing risks for potential fractures in endodontically treated teeth. *J Endod*, 36(4), 609-617. doi:10.1016/j.joen.2009.12.002
- Tay, F. R., Loushine, R. J., Lambrechts, P., Weller, R. N., & Pashley, D. H. (2005). Geometric factors affecting dentin bonding in root canals: a theoretical modeling approach. *J Endod*, 31(8), 584-589.
- Tay, F. R., & Pashley, D. H. (2007). Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod*, 33(4), 391-398. doi:10.1016/j.joen.2006.10.009
- Topcu, F. T., Erdemir, U., Sahinkesen, G., Mumcu, E., Yildiz, E., & Uslan, I. (2010). Push-out bond strengths of two fiber post types bonded with different dentin bonding agents. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 93(2), 359-366. doi:10.1002/jbm.b.31590
- Trushkowsky, R. D. (2014). Restoration of endodontically treated teeth: criteria and technique considerations. *Quintessence Int*, 45(7), 557-567. doi:10.3290/j.qi.a31964
- Uzun, I., Keskin, C., Ozsu, D., Guler, B., & Aydemir, H. (2016). Push-out bond strength of oval versus circular fiber posts irradiated by erbium-doped yttrium aluminum garnet laser. *J Prosthet Dent*, 116(3), 425-430. doi:10.1016/j.prosdent.2016.01.023
- Van Landuyt, K. L., Snauwaert, J., De Munck, J., Coutinho, E., Poitevin, A., Yoshida, Y., Suzuki, K., Lambrechts, P., Van Meerbeek, B. (2007). Origin of interfacial

- droplets with one-step adhesives. *J Dent Res*, 86(8), 739-744. doi:10.1177/154405910708600810
- Van Meerbeek, B., De Munck, J., Yoshida, Y., Inoue, S., Vargas, M., Vijay, P., Van Landuyt, K., Lambrechts, P., Vanherle, G. (2003). Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent*, 28(3), 215-235.
- Van Meerbeek, B., Yoshihara, K., Yoshida, Y., Mine, A., De Munck, J., & Van Landuyt, K. L. (2011). State of the art of self-etch adhesives. *Dent Mater*, 27(1), 17-28. doi:10.1016/j.dental.2010.10.023
- Vichi, A., Ferrari, M., & Davidson, C. L. (2000). Influence of ceramic and cement thickness on the masking of various types of opaque posts. *J Prosthet Dent*, 83(4), 412-417.
- Wang, X., Shu, X., Zhang, Y., Yang, B., Jian, Y., & Zhao, K. (2019). Evaluation of fiber posts vs metal posts for restoring severely damaged endodontically treated teeth: a systematic review and meta-analysis. *Quintessence Int*, 50(1), 8-20. doi:10.3290/j.qi.a41499
- Watzke, R., Blunck, U., Frankenberger, R., & Naumann, M. (2008). Interface homogeneity of adhesively luted glass fiber posts. *Dent Mater*, 24(11), 1512-1517. doi:10.1016/j.dental.2008.03.022
- Wrbas, K. T., Altenburger, M. J., Schirrmeister, J. F., Bitter, K., & Kielbassa, A. M. (2007). Effect of adhesive resin cements and post surface silanization on the bond strengths of adhesively inserted fiber posts. *J Endod*, 33(7), 840-843. doi:10.1016/j.joen.2007.04.010
- Yoon, H., Baek, S. H., Kum, K. Y., Kim, H. C., Moon, Y. M., Fang, D. Y., & Lee, W. (2015). Fitness of gutta-percha cones in curved root canals prepared with reciprocating files correlated with tug-back sensation. *J Endod*, 41(1), 102-105. doi:10.1016/j.joen.2014.09.016
- Zecin-Deren, A., Sokolowski, J., Szczesio-Wlodarczyk, A., Piwonski, I., Lukomska-Szymanska, M., & Lapinska, B. (2019). Multi-Layer Application of Self-Etch and Universal Adhesives and the Effect on Dentin Bond Strength. *Molecules*, 24(2). doi:10.3390/molecules24020345
- Zicari, F., De Munck, J., Scotti, R., Naert, I., & Van Meerbeek, B. (2012). Factors affecting the cement-post interface. *Dent Mater*, 28(3), 287-297. doi:10.1016/j.dental.2011.11.003
- Zimmerli, B., Strub, M., Jeger, F., Stadler, O., & Lussi, A. (2010). Composite materials: composition, properties and clinical applications. A literature review. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 120(11), 972-986.

## 8 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich, Luis Felipe Läser (geb. Falcon) versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:  
[Die postendodontische Rekonstruktion mit gebündelten faserverstärkten Aufbaustiften – Einfluss des Insertionsverfahrens und der Stifteanzahl auf den Haftverbund und Inhomogenitäten im Wurzelkanal] selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe. Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

Datum

Unterschrift

***Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen***

Luis Felipe Läser (geb. Falcon) hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

**Publikation 1** (Artikel) - Autoren: Kerstin Bitter, Luis Falcon, Ana Prates Soares, Richard Sturm, Manja von Stein-Lausnitz, Guido Sterzenbach, Titel: Effect of Application Mode on Bond Strength of Adhesively Luted Glass-Fiber Bundles Inside the Root Canal. Journal of Adhesive Dentistry, 2019;21(6):517-524. doi: 10.3290/j.jad.a43507

Beitrag im Einzelnen:

- Probensammlung und Versuchsaufbau
- Probenherstellung und Versuchsdurchführung
- Entwicklung von Insertionsprotokollen
- Ausstoßversuche und mikroskopische Auswertung
- Datenauswertung

**Publikation 2** (Poster Präsentation) - Autoren: Luis Falcon, PD Dr. Kerstin Bitter, PD Dr. Guido Sterzenbach, Titel: Bundled Glass Fibre Posts - Comparative Study on Bond Strength, 96th General Session and Exhibition of the IADR in London, UK – 25. bis 28. Juli, 2018

Beitrag im Einzelnen:

- Probensammlung und Versuchsaufbau
- Probenherstellung und Versuchsdurchführung
- Entwicklung von Insertionsprotokollen
- Ausstoßversuche und mikroskopische Auswertung
- Poster Erstellung

**Publikation 3** . (Poster Präsentation) - Autoren: Luis Falcon, PD Dr. Kerstin Bitter, PD Dr. Guido Sterzenbach, Titel: Multipost - Haftkraft glasfaserverstärkter Kompositstiftbündel im Wurzelkanal, DGPro – 67. Jahrestagung Deutsche Gesellschaft für Prothetische Zahnmedizin und Biomaterialien, 3. bis 5. Mai 2018

- Probensammlung und Versuchsaufbau
- Probenherstellung und Versuchsdurchführung
- Entwicklung von Insertionsprotokollen
- Ausstoßversuche und mikroskopische Auswertung
- Poster Erstellung

---

Unterschrift, Datum und Stempel des erstbetreuenden Hochschullehrers

PD. Dr. Guido Sterzenbach

---

Unterschrift des Doktoranden

Luis Felipe Läser

## **9 LEBENSLAUF**

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

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



## 10 DANKSAGUNGEN

In erster Linie danke ich Frau OÄ Priv.-Doz. Dr. Kerstin Bitter für die sehr engagierte und sorgfältige Begleitung dieser Untersuchung. Ein Teil Ihres Arbeitsteams zu sein, hat mich dazu motiviert, mich stärker mit der zahnärztlichen Forschung zu befassen und bei der Schaffung neuer Erkenntnisse mitzuwirken.

Einen weiteren großen Dank möchte ich an Herrn Priv.-Doz. Dr. Guido Sterzenbach für die herausragende Unterstützung von Beginn an bis zur Fertigstellung dieser wissenschaftlichen Arbeit richten. Vielen Dank, dass Du mich dazu motiviert hast, die *Posters* in Berlin und in London zu präsentieren. Die Erfahrungen werden für mich unvergesslich bleiben. Danke, dass Du so ein vorbildlicher Vorgesetzter und guter Freund bist.

Des Weiteren danke ich Herrn Priv.-Doz. Dr. Dr. Steffen Köhler, der mir im Verlauf meiner beruflichen Entwicklung stetige Unterstützung und reichlich Vertrauen entgegenbrachte. Danke, dass Du solch ein toller Wegbegleiter bist und mir erlaubt hast, an meinen Herausforderungen weiter wachsen zu können.

Ebenso möchte ich meinen Dank an Herrn Prof. (UH) PD Dr. Wolf-Dieter Müller richten. Das Gespräch vor Beginn der Versuche im Labor diente als gute Grundlage für das Arbeiten unter den erwarteten Standards. In diesem Sinne vielen Dank auch an Herrn Rainer Toll für die Hinweise und die Geduld während meiner ersten Wochen im Labor. Ohne Ihre Hilfe wäre es nicht möglich gewesen, einen solchen reibungslosen Start meiner Laboruntersuchungen zu haben.

Lieber Daniel, ohne Deine ständigen Aufmunterungen und Deine hilfreiche Unterstützung hätte ich diese Arbeit in der deutschen Sprache nicht realisieren können.

Danke an meine Freunde Frau Dr. Franziska Kunath, Frau Dr. Christina Erdmann, Herrn Alexander Korting, Frau Kristin Richter und Frau Dr. Lina Krull. Jeder von Euch hat individuell dazu beigetragen, die Arbeit in einer für mich zufriedenstellenden Art und Weise abschließen zu können.