

AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND-
UND KIEFERHEILKUNDE

Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. Heike Korbmacher-Steiner des Fachbereichs

Medizin der Philipps-Universität Marburg

in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,

Standort Marburg, Abteilung für Zahnerhaltungskunde

**Analyse der Extrusionskraft mittels *SpeedCEM Plus*
selbstadhäsiv intraradikulär inserierter Metallstifte
nach Irrigation der Stiftkanäle mit verschiedenen
endodontischen Spüllösungen**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Medizin

der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Heike Caliebe

aus Gütersloh

Marburg 2021

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg
am: 14.09.2021

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereiches

Dekanin: Frau Prof. Dr. D. Hilfiker-Kleiner

Referent: Herrn PD. Dr. M. Roggendorf

Korreferent: Herrn Prof. Dr. U. Lotzmann

Meiner Tochter Marie gewidmet

Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Arbeitshypothesen.....	9
3	Literaturübersicht.....	10
3.1	Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung	10
3.2	Schmierschicht	11
3.3	Endodontische Spüllösungen	13
3.3.1	Natriumhypochlorit (NaOCl).....	14
3.3.2	Chlorhexidindigluconat-Lösung (CHX).....	15
3.3.3	Ethylendiamintetraacetat (EDTA).....	16
3.3.4	Zitronensäure.....	17
3.3.5	Ethanol.....	17
3.4	Selbstadhäsiver Befestigungszement <i>SpeedCEM</i>	18
4	Material und Methode.....	21
4.1	Versuchsaufbau	21
4.2	Auswahl und Vorbereitung der Zähne.....	22
4.3	Aufbereitung der Zähne	23
4.4	Vorbereitung der Spreader	24

4.5	Gruppeneinteilung und Spülprotokoll.....	24
4.6	Einbringen von Spreadern und <i>SpeedCEM Plus</i> in den Kanal	25
4.7	Pulloutanalyse	25
4.8	Statistische Auswertung.....	28
5	Ergebnisse	30
5.1	Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Spülflüssigkeit.....	30
5.2	Bewertung der Frakturmodi	32
5.3	Zusammenhang zwischen den Frakturmodi und der Spülflüssigkeit	35
5.4	Zusammenhang zwischen den Frakturmodi und der Scherfestigkeit....	37
6	Diskussion.....	38
6.1	Diskussion der Methodik.....	38
6.1.1	Auswahl der Probezähne.....	38
6.1.2	Methoden zur Analyse des Haftverbundes	39
6.1.2.1	Conventional Shear/ Tensile Bond-Strength-Test (Konventioneller Scher-/ Zugversuch)	39
6.1.2.2	Pushout-Test (Ausstoßversuch)	40
6.1.2.3	Microtensile-Bond-Strength-Test (Miniaturzugversuch).....	40
6.1.2.4	Pullout-Test (Zugversuch)	41
6.1.3	Einflussfaktor Lichthärtung.....	42
6.2	Diskussion der Ergebnisse	43
7	Klinische Schlussfolgerung.....	47

8	Zusammenfassung.....	49
8.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	49
8.2	Material und Methode	49
8.3	Ergebnisse und Schlussfolgerung	50
9	Summary	51
9.1	Objective.....	51
9.2	Material and Methods	51
9.3	Results and Conclusion	52
10	Literaturverzeichnis	53
11	Abkürzungsverzeichnis.....	66
12	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....	67
12.1	Tabellenverzeichnis	67
12.2	Abbildungsverzeichnis	68
13	Materialliste	69
14	Rohdaten.....	70
15	Verzeichnis der akademischen Lehrer	72
16	Danksagung	73
17	Lebenslauf.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
18	Ehrenwörtliche Erklärung	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Einleitung

Bei der Wurzelkanalaufbereitung wird die Keimzahl durch zirkulären Substanzabtrag des Wurzelkanalodontins mit mechanischen Instrumenten reduziert.

Eine alleinige mechanische Aufbereitung des Kanalsystems reicht allerdings nicht aus, weswegen die Wurzelkanäle zusätzlich während der Behandlung mit desinfizierenden Spülflüssigkeiten gereinigt werden müssen. Dies ermöglicht auch ein weitgehendes komplettes Auflösen und Herausspülen von Dentinspänen und Geweberesten.

Bei endodontisch behandelten Zähnen mit einem hohen Destruktionsgrad der klinischen Krone sind zur Retention einer Restauration Wurzelstifte erforderlich (37, 38).

Vorherige Studien (37, 38) haben gezeigt, dass das Retentionsverhalten unter anderem abhängig ist von Stiftgröße, Stiftdesign und Oberflächenbeschaffenheit, sowie das entsprechende Befestigungsmaterial einen Einfluss auf die Stiftverankerung hat.

Trotz guter Resultate bei den durch Anwenderfreundlichkeit, Verringerung der Anwendungszeit und eine geringere Techniksensitivität populär gewordenen Self-etch-Adhäsiven (109), kommt es auch zu Misserfolgen, wie z.B. Retentionsverlust (85), Debonding und Stiftfraktur (8, 12).

Es gibt verschiedene Faktoren, die den Haftverbund zwischen Komposit und Dentin beeinflussen (58). Dazu zählen unter anderem die Hydrophobie des Befestigungsmaterials (61) und die suboptimale Polymerisation des Befestigungsmaterials (15). Des Weiteren kann die kollagenolytische Aktivität von endogenen Matrix-Metalloproteinasen (MMPs) zur Reduktion des Langzeithaftverbunds zwischen Komposit und Dentin führen (116).

Darüber hinaus kann auch die im Wurzelkanal verbleibende Schmierschicht den Haftverbund beeinflussen (96). Für einen besseren Haftverbund zwischen Befestigungskomposit und Wurzeldentin werden daher endodontische Spüllösungen eingesetzt (10, 11, 105).

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, den Einfluss verschiedener endodontischer Spüllösungen auf die initiale Haftkraft des Haftverbundes im Rahmen der selbstadhäsiven Befestigung von Metallstiften unter Verwendung des selbstadhäsiven Befestigungskomposits *SpeedCEM* zu analysieren.

2 Arbeitshypothesen

Arbeitshypothese 1:

Der Einsatz verschiedener endodontischer Spüllösungen führt zu unterschiedlichen Haftwerten.

Arbeitshypothese 2:

Oxidierende Spüllösungen reduzieren den Haftverbund von *SpeedCEM*.

Arbeitshypothese 3:

Der Einsatz von Chelatoren im Rahmen der Stiftkanalspülung verbessert den Haftverbund von *SpeedCEM*.

3 Literaturübersicht

3.1 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung

Für die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung gelten die gleichen Ziele und Anforderungen wie für die manuelle Aufbereitung, welche durch die ESE (30) definiert wurden.

- Entfernung von nekrotischem oder vitalem Pulpagewebe.
- Eliminierung der Mikroorganismen.
- Beibehaltung des originären Wurzelkanalverlaufs.
- Der Wurzelkanal soll von apikal nach koronal konisch aufbereitet werden, die engste Stelle soll am apikalen Endpunkt des Kanals liegen
- Erhaltung der apikalen Konstriktion.
- Vorher festgelegte Arbeitslänge soll mit der endgültigen Aufbereitungslänge übereinstimmen. Es soll keine Über- oder Unterinstrumentierung erfolgen.
- Apikales überpressen von infiziertem Material oder Spülflüssigkeit sind zu vermeiden genauso wie Instrumentenfraktur, Perforationen oder Veränderungen der endodontischen Arbeitslänge.

Bei der Wurzelkanalaufbereitung kann sich der Behandler grundsätzlich zwischen den manuellen oder den maschinellen Wurzelkanalaufbereitungssystemen entscheiden. Die manuelle Wurzelkanalaufbereitung ist in der Regel zeitintensiver als die maschinelle Aufbereitung (97). Zudem kommt es bei der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung zu weniger Verlagerungen des Kanalverlaufs und weniger Stufenbildung als bei der manuellen Aufbereitung (97). Allerdings erfordert es vom Behandler eine andere „Handhabung“. Bei den maschinellen Feilensystemen sollte weniger Kraft ausgeübt werden als bei der manuellen Aufbereitung, um die Risiken einer Instrumentenfraktur zu minimieren (97).

Eine endodontische Behandlung kann unter anderem bei einer irreversiblen Schädigung der Pulpa, Traumen oder auch für eine prothetische Behandlung zur Aufnahme eines Wurzelkanalstiftes notwendig werden (30).

Ziel der endodontischen Behandlung ist es, jeweils den Wurzelkanal nach seiner Anatomie zu instrumentieren, und den Kanal durch Entfernung des Pulpagewebes sowie die durch Instrumentierung entstandene Schmierschicht anhand von Instrumenten und den Einsatz von Spüllösungen die Keimzahl signifikant zu reduzieren und Gewebereste möglichst vollständig zu entfernen (30). Die Arbeitslänge wird vorher röntgenologisch oder durch den Einsatz der Endometrie festgelegt und der Kanal anschließend von koronal nach apikal konisch aufbereitet (30).

Die maschinelle Aufbereitung ist besonders durch die sehr flexiblen Nickel-Titanfeilen für gekrümmte Kanäle geeignet und hilft auch, Perforationen zu vermeiden und die Grundform des Kanals zu erhalten. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl maschineller Aufbereitungssysteme von vollrotierenden bis reziproken Systemen, die mit nur einer maschinellen Feile die Instrumentierung des Wurzelkanalsystems ermöglichen. Es sollte dabei ein System ausgewählt werden, mit dem effizient und wirtschaftlich gearbeitet werden kann und welches evtl. auch die Rissbildung im Dentin minimieren kann (30). In einer Studie zum Haftverbund eines selbstadhäsiven Befestigungszementes in Bezug auf die Aufbereitungstechniken und die endodontischen Spüllösungen wurde herausgefunden, dass die besten Haftwerte mit rotierenden Nickel-Titanfeilen und zusätzlicher Spülung mit NaOCl und EDTA erreicht wurden (92).

3.2 Schmierschicht

Bei einer mechanischen Wurzelkanalaufbereitung entsteht eine Schmierschicht, die Bakterien, abgelöste Dentinspäne und Zellreste enthält. Die Schmierschicht enthält anorganische und organische Bestandteile, weswegen verschiedene Spüllösungen benötigt werden, um sie vollständig zu entfernen (110).

Die Notwendigkeit einer vollständigen Entfernung der Schmierschicht ergibt sich aus der weiteren Vorgehensweise.

Bei einer Wurzelkanalbehandlung ist der Verbleib einer Schmierschicht und der darin enthaltenen Bakterien problematisch. Daher muss die Schmierschicht zwingend entfernt werden.

Bei einer Stiftkanalpräparation findet prinzipiell eine deutlich größere Aufbereitung statt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Bakterien, die im Rahmen einer Nekrose in die Dentintubuli hineingewandert sind, weitestgehend oder vollständig entfernt werden. Eine Entfernung der Schmierschicht ist in diesem Fall eher zweitrangig.

Wenn die Schmierschicht nicht vollständig entfernt werden kann, verhindert sie das Eindringen von Adhäsiv- und Befestigungssystemen und kann so die Haftkraft minimieren (79, 96).

In einer weiteren Studie zeigte sich hingegen, dass das Belassen der Schmierschicht zu einer Hemmung der bakteriellen Besiedelung im Wurzelkanal führt (26).

Die Schmierschicht kann durch Chelatoren wie EDTA oder Zitronensäure, aber auch durch Phosphorsäure entfernt werden. Mit NaOCl kann die Schmierschicht zwar nicht beseitigt werden (33), aber ihre organischen Bestandteile werden so verändert, dass die Schmierschicht später durch die anderen Spüllösungen wie EDTA oder Zitronensäure leichter entfernt werden kann.

Darüber hinaus lässt sich die Schmierschicht durch einen ER:YAG-Laser entfernen. Die Tiefenwirkung des Lasers ist im mittleren und apikalen Drittel des Wurzelkanals besser als die der Spüllösungen, somit werden Bakterien und die Schmierschicht effektiv entfernt (25, 42, 56, 101). Die Abtragung der Schmierschicht beruht auf einem hydrokinetischen Prozess. Während der Bestrahlung wird das Wasser der Schmierschicht und des Zahngewebes erhitzt und verdampft schlagartig. Die dabei entstehenden Mikroexplosionen bewirken die Abtragung (71).

3.3 Endodontische Spüllösungen

Neben der mechanischen Aufbereitung der Wurzelkanäle mit Wurzelkanalinstrumenten, bei dem infiziertes und nekrotisches Gewebe sowie das Wurzelkanalwanddentin abgetragen wird und anschließend die Wurzelkanäle ausgeformt und konisch gestaltet werden, ist auch die chemische Reinigung der Kanäle anhand von desinfizierenden und teilweise antimikrobiell oder bakterizid (7, 40) wirkenden Spüllösungen notwendig (52). Abschließend werden Spüllösungen zur Entfernung der entstandenen Schmierschicht, etwa Chelatoren wie Ethylen-diamintetraacetat (EDTA) eingesetzt.

Auch mithilfe einer maschinellen Aufbereitung gelingt es nicht, alle Seitenkanäle sowie akzessorische Kanälchen und apikale Ramifikationen zu erreichen, so dass auf die chemischen Spüllösungen zur Keimreduzierung nicht verzichtet werden kann (4, 63).

Eine Spüllösung muss außerdem eine biologische Verträglichkeit besitzen. Sie muss gewebeverträglich sein und sollte eine geringe Toxizität aufweisen (114, 115). Zudem sollte sie einfach zu applizieren sein. Da diese Eigenschaften in der Regel nicht mit einer Spülflüssigkeit allein erzielt werden können, sollten sie für eine bessere Prognose der Wurzelkanalbehandlung kombiniert werden. Die effektivsten Spüllösungen sind Natriumhypochlorit, Chlorhexidindigluconat und Ethylendiamintetraessigsäure (114). Natriumhypochlorit löst als einzige Spüllösung sowohl vitales als auch nekrotisches Gewebe auf, seine Wirksamkeit lässt sich noch erhöhen, indem NaOCl kurz vor der Anwendung erwärmt wird (20). Zudem kann NaOCl für eine bessere Wirksamkeit noch mit Ultraschall aktiviert oder in Kombination mit einem Laser angewendet werden (106, 112).

Ein zu hoher Druck sowie das Verklemmen der Spülkanüle sollten vermieden werden, da dies zum Überpressen von Spülflüssigkeit und Debris führen kann (98). Dadurch können Weichteilemphyseme hervorgerufen werden (98). Weitere mögliche Komplikationen sind Nerv- und Gewebeschädigungen, Nekrosen oder akuter septischer Schock, insbesondere bei der Injektion von NaOCl in das Gewebe (43). Die Verwendung von Wasserstoffperoxid als Spüllösung ist nach heutigem Wissensstand obsolet, da bedingt durch den Übertritt von ent-

stehendem Sauerstoff über das Foramen apikale ins umliegende Gewebe, die Gefahr einer Emphysementstehung zu groß ist (98). Darüber hinaus besitzt Wasserstoffperoxid kaum antibakterielle Eigenschaften (50) und ist nur gering gewebeauflösend. Die chemo-mechanische Reinigung der Wurzelkanäle ist entscheidend für eine hohe Erfolgsrate der Wurzelkanalbehandlung sowie für einen guten adhäsiven Verbund (115).

3.3.1 Natriumhypochlorit (NaOCl)

Natriumhypochlorit gehört zu den meist verwendeten Spüllösungen (67). Sie kann vitales und nekrotisches Pulpagewebe auflösen und besitzt eine gute antimikrobielle Wirkung (40) gegen viele endodontische Keime wie z.B. *Enterococcus faecalis* (82) bei einer geringen Toxizität. Die Schmierschicht, die durch den mechanischen Substanzabtrag entsteht und aus organischen und anorganischen Substanzen besteht, kann nicht alleine durch Natriumhypochlorit entfernt werden, da Natriumhypochlorit nur das organische Material der Schmierschicht entfernt (50).

Natriumhypochlorit kann als endodontische Spüllösung Endotoxine, die sogenannten Lipopolysaccharide (LPS) gram-negativer Bakterien sowie die Lipoteichonsäure (LTA) aus der Zellwand gram-positiver Bakterien neutralisieren (6, 67).

Die Fähigkeit von Natriumhypochlorit, gewebeauflösend zu wirken, wird mit zunehmender Temperatur und/oder mit zunehmender Konzentration gesteigert (36, 46). Darüber hinaus steigert auch die Aktivierung von Natriumhypochlorit mittels Ultraschall die antimikrobielle Wirkung der Spüllösung (18).

Die Effizienz zur Reinigung von Natriumhypochlorit wurde in mehreren Studien bestätigt (67, 115).

Es gibt allerdings auch Untersuchungen die belegen, dass sich Natriumhypochlorit negativ auf den Haftverbund zwischen Dentin und Self-etch-Komposit auswirkt (53). In einer anderen Studie konnte hingegen eine Verbesserung des Haftverbundes nach der Nutzung von NaOCl festgestellt werden (29). Man

kann also nicht unbedingt voraussagen, wie Natriumhypochlorit den Haftverbund zwischen Komposit und Dentin beeinflusst. Es hängt hierbei auch von den Bondingsystemen ab. Bei den genannten Untersuchungen wurden verschiedene Systeme verwendet (29, 53, 89).

Negativ zu bewerten ist, dass nach dem Spülen mit NaOCl, aufgrund seiner oxidierenden Wirkung eine Schicht auf der Dentinoberfläche bleibt, die sehr sauerstoffreich ist (62). Durch Sauerstoff wird die Polymerisation des Bondings herabgesetzt, wodurch die Viskosität und der Füllgehalt negativ beeinflusst wird (34).

Durch das anschließende Spülen mit Zitronensäure, die als Reduktionsmittel wirkt, kann die oxidierende Wirkung aufgehoben werden (22, 113).

3.3.2 Chlorhexidindigluconat-Lösung (CHX)

Chlorhexidin wird meistens zur Abschlussspülung verwendet und bei Revisionen, da CHX sehr wirksam gegen Enterokokken und Pilze ist, die sich bei Revisionsfällen finden und teilweise gegen NaOCl resistent sind (114). Zudem besitzt es eine geringe Toxizität und ist nicht gewebeauflösend (45).

CHX besitzt eine hohe Substantivität zum Dentin, somit hält die antimikrobielle Wirkung über die Spüldauer hinaus an (7). Dies liegt daran, dass sich CHX als Kation an die anionischen Strukturen in der Mundhöhle anlagert. Es besitzt eine hohe Halbwertszeit und ist über einen längeren Zeitraum nachweisbar (86).

Es wirkt besonders gut gegen grampositive Bakterien, wie z.B. Enterokokken (45). Des Weiteren ist CHX als einzige Spüllösung in der Lage, die sogenannten Matrixmetalloproteine zu inhibieren und so die Langzeithaftung zwischen Dentin und Adhäsivsystemen zu erhöhen (13, 57).

Matrixmetalloproteinasen sind Enzyme, die in der Dentinmatrix enthalten sind und durch ihre proteolytische Aktivität die Kollagen-Typ-I-Fibrillen in der organischen Matrix des Dentins abbauen (66). Die Kollagenolyse kann sich negativ auf den Haftverbund auswirken und zu einem Debonding führen. Es existieren 28 verschiedene MMPs, 22 davon wurden im menschlichen Gewebe nachge-

wiesen (111). In der Dentinmatrix sind MMP-2 (Gelatinase A), MMP-3 (Stromelysin), MMP-8 (Kollagenase), MMP-9 (Gelatinase B) und MMP-20 (Enamelysin) vorhanden (66, 100).

In mehreren Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung eines Proteaseinhibitors wie etwa CHX die Integrität der Hybridschicht verbessert und die Haftkraft von Adhäsiven stabilisiert (18, 48). Vor allem die Langzeithaftwerte werden positiv beeinflusst. Daher wurde CHX als Abschluss-spülung empfohlen.

Zwischen NaOCl und CHX sollte immer eine Zwischenspülung mit z.B. Ethanol, Aqua dest. oder NaCl-Lösung erfolgen, da sich sonst das rötliche, potentiell kanzerogene p-Chloranilin bilden kann (6).

3.3.3 Ethylendiamintetraacetat (EDTA)

EDTA ist ein Chelator und kann durch die selektive Bindung mit den Calciumionen aus dem Dentin Chelate ausbilden und so die durch die Aufbereitung entstandene Schmierschicht komplexieren und somit entfernen (68).

Bei den Chelatoren können von einem Liganden mehrere koordinative Bindungen zu einem Zentralion ausgehen (69). Es entstehen Komplexe mit Ringstruktur. Die Chelatkomplexe besitzen eine sehr große Stabilität.

Durch die Bindung von Calciumionen wirkt EDTA auch dekalzifizierend (16, 114). Der Komplex kann aber immer nur ein Calciumion binden, somit werden alle freien Calciumionen schnell gebunden und die Demineralisierung wird gestoppt (95).

Auch bei EDTA hängt die Wirksamkeit von der Konzentration, dem applizierten Volumen, der Applikationsdauer und dem pH-Wert ab. Eine 3-minütige Spülung des Wurzelkanals mit 8 % EDTA soll genauso effektiv sein, wie eine 1-minütige Spülung des Kanals mit 15 prozentiger EDTA-Lösung (80). Laut Perdigão et al. (77) binden Adhäsive schlechter an dekalzifiziertem Dentin. Für einen guten Haftverbund zwischen Adhäsiv und Dentin ist es erforderlich, dass die Schmierschicht vollständig entfernt wird und eine Hybridschicht zwischen dem Adhäsiv

und den freigelegten Kollagenfasern ausgebildet werden kann (75). Besonders wichtig ist die komplette Entfernung der Schmierschicht bei Self-etch-Adhäsiven (44). EDTA ist nicht gewebeauflösend und wirkt auch nicht antibakteriell (45). Um die Schmierschicht vollständig zu entfernen, wird eine Kombination aus einer Wurzelkanalspülung mit NaOCl, welches die organischen Bestandteile der Schmierschicht auflöst und EDTA, welches die anorganischen Bestandteile löst, empfohlen (45).

3.3.4 Zitronensäure

Zitronensäure ist wie EDTA ein Chelatbildner, die mit den Calciumionen des Dentins einen Chelat-Komplex bildet und so das Kanalwanddentin erweicht und die Schmierschicht löst (45). Damit keine fortschreitende Demineralisierung stattfindet, sollte die Zitronensäure wieder gründlich mit NaOCl oder CHX herausgespült werden (33). Eine Spüldauer von 3 min mit Zitronensäure reicht aus, bei längerer Spüldauer wird keine Effizienzsteigerung erreicht (93). Zitronensäure wird meistens in einer Konzentration von 10 % angewendet (60, 93). Es konnte gezeigt werden, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen EDTA und Zitronensäure im Bezug zur Entfernung der Schmierschicht gibt (80). Andererseits wurde berichtet, dass Zitronensäure (1 % und 10 %) besser die Schmierschicht löst als 17-prozentige EDTA-Lösung (60). Zitronensäure besitzt zudem eine geringe antimikrobielle Wirkung (113).

Des Weiteren kann die Wirksamkeit durch den Einsatz von Ultraschall erhöht werden (19).

3.3.5 Ethanol

Ethanol wird in einer Konzentration von 70 % bis 90 % als Zwischenspülung und als Abschlusspülung verwendet (10). Es hat eine geringe Oberflächenspannung und trocknet das Wurzelkanalsystem aufgrund der Mitnahme von Feuchtigkeit, insbesondere aus den Dentintubuli (81). Damit wird die Dentinmatrix hydrophober und somit auch die Langlebigkeit von hydrophoben Adhäsivsystemen verbessert (10).

Darüber hinaus zeigte Ethanol eine Inaktivierung von MMPs (103). Es entsteht eine kovalente Bindung zwischen dem Sauerstoffatom der Hydroxylgruppe des Alkohols und dem katalytischen Zinkatom des Enzyms wodurch die MMPs inaktiviert werden (103, 111).

3.4 Selbstadhäsiver Befestigungszement *SpeedCEM*

SpeedCEM ist ein selbstadhäsiver Kompositzement, der laut Hersteller sowohl rein selbsthärtend, als auch optional mit Lichthärtung verwendet werden kann. Nach den Studien, die in der Wissenschaftlichen Dokumentation von Ivoclar Vivadent genannt sind, ist die Anwendung von Primern sowie eines Dentinadhäsivs nicht notwendig (51).

Nach Herstellerangaben eignet es sich besonders für Restaurationen aus Zirkoniumoxid, Metallkeramik, zur Befestigung von Restaurationen auf Implantat-Abutments sowie zur Befestigung von Wurzelstiften. Selbstadhäsive Befestigungszemente benötigen keine separate Säureätzung der Zahnoberfläche (51)

Die selbstadhäsive Wirkung wird durch ein Haftmonomer namens MDP verursacht, es zeichnet sich durch ein langkettiges Methacrylat mit einer Phosphorsäuregruppe aus, die die Zahnhartsubstanz demineralisieren kann (23). Die chemische Bindung an Zirkoniumoxid und vielen Metallen wird durch die Phosphorsäuregruppe ermöglicht (109). Des Weiteren bildet die Phosphorsäuregruppe auch mit den positiven Calciumionen einen Komplex der Zahnhartsubstanz und erreicht so eine Bindung zum Zahn (35). Der Haftmechanismus funktioniert somit nicht über die Hybridschicht (102).

Es handelt sich um eine radikalische Polymerisation, der Start der Reaktion kann entweder durch Licht oder durch eine Redoxreaktion erfolgen, sowie eine Abbindereaktion durch eine Säure-Basereaktion (109). Die phosphorsäuren Methacrylate reagieren mit den basischen Füllkomponenten und zum anderen mit dem Hydroxylapatit des Zahnes (109). Bei der Reaktion entsteht Wasser, welches die Feuchtigkeitstoleranz des Zementes erhöht (109). Das Wasser wird dann durch die Reaktion mit überschüssigen Säuren und basischen Füllkörpern in der Zementreaktion wieder verbraucht (109).

Der selbstadhäsive Befestigungszement dringt in die Schmierschicht ein, durch die polymerisierte Schmierschicht wird die Dentinoberfläche versiegelt (109).

Die Dentinoberfläche sollte vorher nicht mit Phosphorsäure konditioniert werden, da dies zur Zerstörung der Dentinhaftung führt (23). Rückstände von basischen Strahlmitteln (z.B. *Airflow*) sollten vermieden werden, da hierdurch die sauren Phosphorsäure-Komponenten neutralisiert werden und so die Reaktion mit der Dentinoberfläche verhindert wird (51).

Flury et al. (32) untersuchten die mikromechanischen Eigenschaften von dualhärtenden Zementen, einschließlich Lichthärtung durch Glaskeramiken. Es wurde die Vickers-Härte und das Eindruckmodul überprüft. Mit *SpeedCEM* werden hohe Werte erreicht, durch die Lichthärtung wurden sie nochmals erhöht. Bei der Lichthärtung durch 3 mm dicke IPS e.max CAD erreichte in der Studie nur *SpeedCEM* hohe Werte, bei allen anderen getesteten Zementen wurden die Werte minimiert (32).

Rohr et al. ermittelten mit *SpeedCEM* hohe Werte der indirekten Zugfestigkeit sowohl ohne (39,8 MPa) wie auch mit Lichthärtung (41 MPa). Allerdings nahm die Zugfestigkeit nach Alterung durch den Thermozyklus signifikant ab und erreicht ohne Lichthärtung 33,9 MPa und mit Lichthärtung nur noch 36 MPa (87).

In einer Untersuchung des Herstellers erreichte *SpeedCEM* selbst auf nassem Dentin eine hohe Feuchtigkeitstoleranz und eine hohe Haftung am Dentin (51).



Abbildung 1: SpeedCEM Plus in der Doppelkartuschenapplikationsspritze

4 Material und Methode

4.1 Versuchsaufbau

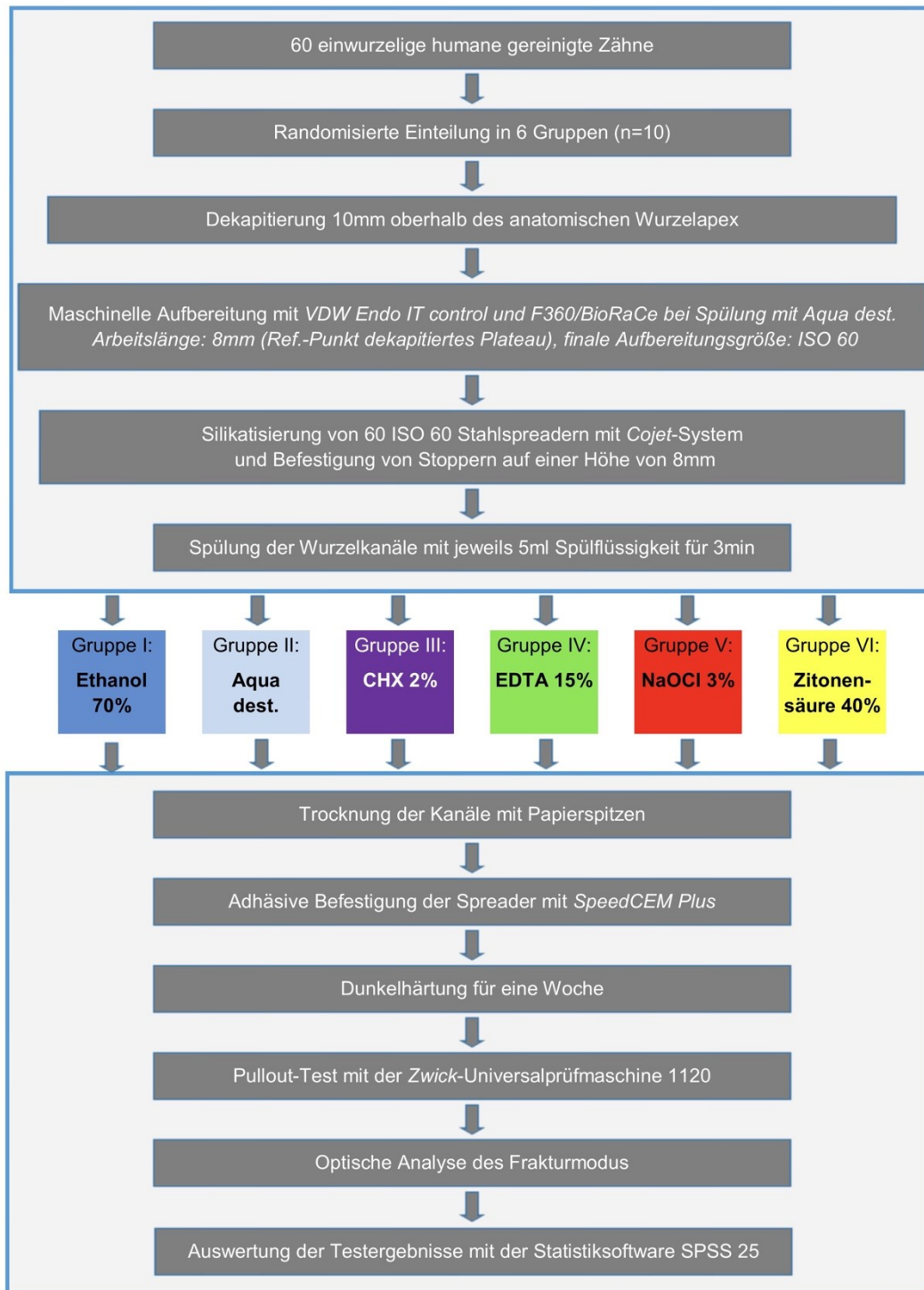


Abbildung 2: Fließdiagramm des Versuchsaufbaus

4.2 Auswahl und Vorbereitung der Zähne

Es wurden 60 einwurzelige humane Zähne mit einem Wurzelkanal und geradem Wurzelverlauf gesammelt und in 0,001-prozentigem Natriumacid gelagert. Weitere Kriterien waren ein abgeschlossenes Wurzelwachstum, keine Frakturen und keine vorherigen endodontischen Behandlungen. Die Zähne wurden für ihre Tauglichkeit röntgenologisch überprüft. Konkremete und Gewebereste wurden vorher mit einem Scaler entfernt. Im Anschluss wurden mit einer Trennscheibe die Zähne dekapitiert und auf eine Länge von 10 mm gekürzt.



Abbildung 3: Röntgenaufnahme eines Versuchszahns vor der Dekapitierung

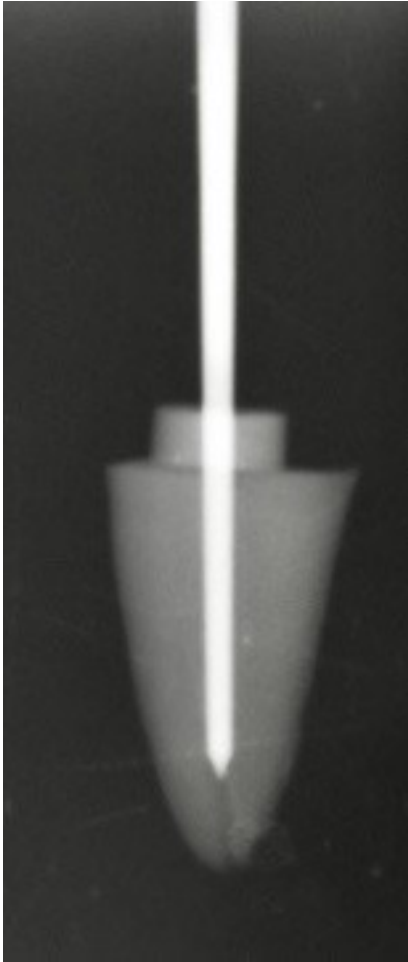


Abbildung 4: Röntgenaufnahme eines Versuchszahns mit eingepasstem Spreader

4.3 Aufbereitung der Zähne

Die auf 10 mm gekürzten Zähne wurden nun maschinell mit dem F360 und dem BioRace-Feilensystem auf 8 mm Arbeitslänge und Feilengröße 7/#60 (F360 Größe 25, 35, 45 und BR 7) aufbereitet. Die Verwendung der Feilen erfolgte in Single-length-Technik. Vorher wurde ein Gleitpfad mit einer Handfeile der ISO-Größe 15 geschaffen.

Der verwendete Endomotor *VDW Endo IT control* wurde auf eine Drehzahl von 500 U/min und auf ein Drehmoment von 100 N/cm eingestellt (System: PTS1).

Die standardisierte Bezugsgröße in diesem Versuch ist eine Oberfläche von 17,2 mm², sie ergibt sich aus einer Arbeitslänge von 8 mm und der Kanalaufbereitung bis Größe ISO 60. Bei der Aufbereitung wurden die Wurzelkanäle ausschließlich mit destilliertem Wasser gespült. Die aufbereiteten Zähne wurden anschließend in 0,001 prozentiger Natriumacidlösung in Eppendorfgefäßen mit 2,0 ml Fassungsvermögen gelagert.

4.4 Vorbereitung der Spreader

Die Spreader der Größe ISO 60 wurden durch Abstrahlen mit *Cojet* silikatisiert, damit so ein besserer Verbund zum adhäsiven Zement besteht. Ein Stopper wurde in Höhe von 8 mm befestigt, damit die Stahlspreader einheitlich auf 8 mm in die Kanäle einzementiert werden konnten und somit eine Dentinoberfläche von 17,2 mm² garantiert werden konnte.

4.5 Gruppeneinteilung und Spülprotokoll

Die 60 aufbereiteten Zähne wurden randomisiert in 6 Gruppen mit jeweils 10 Zähnen aufgeteilt. In den Gruppen wurden verschiedene Spüllösungen verwendet.

Tabelle 1: Einteilung der experimentellen Gruppen

Gruppen	Spülprotokoll
1	Alkohol (Ethanol, 70%)
2	Aqua dest. (Kontrollgruppe)
3	Chlorhexidindiglukonat (CHX, 2%)
4	Ethylendiamintetraacetat (EDTA, 15%)
5	Natriumhypochlorit (NaOCl, 3%)
6	Zitronensäure (40%)

Es wurde in der jeweiligen Gruppe jeweils mit 5 ml Spülflüssigkeit unter Verwendung einer Einwegspritze und Endospülkanülen für eine Dauer von 3 Minuten jeder Kanal gleichmäßig gespült. Im Anschluss wurden die Kanäle mit Papierspitzen der Größe ISO 60 getrocknet.

4.6 Einbringen von Spreadern und *SpeedCEM Plus* in den Kanal

Der selbstadhäsive Kompositzement *SpeedCEM Plus* wird als Paste-Paste-System in einer Doppelschubspritze angeboten, dadurch muss der Zement weder per Hand noch in einer Kapsel angemischt werden. Die Vorteile liegen in einer schnelleren Dosierbarkeit, einem stets gleichbleibenden Mischungsverhältnis von 1:1 und es entstehen keine Luft einschlüsse. Unter Verwendung eines langsam rotierenden Lentulos (250 U pro Minute) wurde *SpeedCEM Plus* direkt in die Wurzelkanäle appliziert. Anschließend wurden auch die Spreader mit *SpeedCEM Plus* bestrichen und mit der Arbeitslänge von 8 mm eingesetzt, die Überschüsse wurden mit einem Schaumstoffpellet entfernt, damit keine zusätzliche Haftfläche zwischen dem Dentin und *SpeedCEM Plus* entstand. Die Zähne wurden nach Stiftsetzung und Zementierung noch einmal röntgenologisch kontrolliert. In der Studie wurde nur die selbsthärtende Komponente des Zementes beurteilt, die optionale Lichthärtung blieb unberücksichtigt, deswegen wurden die Zähne nach Zementierung der Spreader aufrecht in den Eppendorf-Gefäßen mit einem feuchten mit Natriumacid getränkten Schaumstoffpellet in einer dunklen vor Lichteinfall geschützten Kiste gelagert.

4.7 Pulloutanalyse

Für die Messung der Scherkraftwerte zwischen dem adhäsiven Zement, Dentin und den Spreadern wurde die Pulloutanalyse nach Ebert et al. (2011) (27) mittels einer *Zwick-Universalprüfmaschine 1120* eingesetzt.

Die Probezähne mit den Spreadern wurden hierzu einzeln nach ihrer Achsrichtung in die spannungsfreie Zugvorrichtung eingespannt. Es wurde auf eine richtige Ausrichtung der Probezähne geachtet, damit keine extraaxialen Kräfte auftraten, es sollten nur axiale Kräfte entlang der Zugachse entstehen.

Beim Einschalten der Maschine wurde der Spreader im Verlauf der Pullout-Analyse entlang seiner Achse aus der Wurzel gezogen.



Abbildung 5: Eingespannter Probezahn in der Zwick-Universaltestmaschine



Abbildung 6: Situation nach Extrusion des Spreaders aus einem Probezahn nach Rückkehr in die Ausgangsposition

Die *Zwick*-Universal-Prüfmaschine 1120 war mit einem Computer verbunden, die entsprechende Software zeichnete das resultierende Spannungs-/Dehnungsdiagramm mit dem Moment des Versagens auf, wobei die maximale Kraft [N] ermittelt wurde, die zum Debonding des Spreaders führte. Da die Wurzelkanäle einheitlich auf Größe ISO 60 aufbereitet wurden, resultierte eine einheitliche Stiftkanaloberfläche von 17,2 mm², so dass die Kraft von Newton in Megapascal [MPa] umgerechnet werden konnte. Um die Scherkräfte in MPa zu ermitteln, wird der Versagenswert des Haftverbundes (N) durch die Haftfläche (mm²) zwischen dem adhäsiven Zement und Kanaldentin dividiert.

$$\text{Scherkräfte (MPa)} = \text{Versagenswert (N)} / \text{Haftfläche (mm}^2\text{)}$$

Folgende Werte wurden in der *Zwick*-Universalprüfmaschine eingestellt.

Versuchseinstellungen der Zwick-Universalprüfmaschine	
LE-Geschwindigkeit	300mm/min
Prüfgeschwindigkeit	1mm/min
Kraftabschaltswelle	manuell
Kraftschwelle für Bruchuntersuchung	0,1% F_{nom}
Obere Kraftgrenze	2.500 N
Messlänge Standardweg	50 mm

Tabelle 2: Versuchseinstellungen für die Zwick-1120 Prüfmaschine

4.8 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse erfolgte durch das Softwareprogramm SPSS 25.0 (IBM, Armonk, NY, USA).

Folgende statistische Verfahren wurden angewandt:

- Shapiro-Wilk-Test
- Kruskal-Wallis-Test
- Mann-Whitney-Test
- Spearman-Rangkorrelation

Bei den genannten statistischen Testverfahren wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit auf 5 % festgelegt ($p < 0,05$).

Mit dem Shapiro-Wilk-Test wird getestet, ob die Werte einer Stichprobe normalverteilt sind. Nach der Nullhypothese liegt eine Normalverteilung vor und nach der Alternativhypothese ist keine Normalverteilung gegeben.

Mit dem U-Test (Mann, Whitney und Wilcoxon) werden zwei unverbundene Stichproben derselben Variablen auf Unterschiedlichkeit getestet. Es müssen keine Voraussetzungen für eine bestimmte Verteilungsform erfüllt sein. Zudem genügt es, wenn die Variable ordinalskaliert ist, da in den Test nicht die Messwerte selbst, sondern ihre Rangplätze eingehen. Ordinalskaliert bedeutet, dass die Daten Wertungen darstellen, wobei die Linearität der Skala nicht gefordert ist (z.B. Kraft).

Der Kruskal-Wallis-Test ist vergleichbar mit dem U-Test für unabhängige Stichproben. So wird ebenfalls keine bestimmte Verteilungsform vorausgesetzt. Im Unterschied zum U-Test werden jedoch mehr als zwei unverbundene Stichproben derselben Variablen auf Unterschiedlichkeit getestet (z.B. 6 Spülflüssigkeiten oder 4 Frakturmodi).

Durch die Spearman-Rangkorrelation werden zwei Variablen auf Korrelation getestet. Es wird keine bestimmte Verteilungsform vorausgesetzt, es genügt, wenn die Variablen ordinalskaliert sind. Der Korrelationskoeffizient, das Spearman rho, ist das Zusammenhangsmaß, das Werte von -1 bis +1 annehmen kann.

5 Ergebnisse

5.1 Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Spülflüssigkeit

Die Scherfestigkeit nach dem Spülen der Stiftkanäle mit den einzelnen Spülflüssigkeiten wird als deskriptive Auswertung (Tabelle 3) und auch als Grafik dargestellt (Abbildung 7). Dabei ist zu erkennen, dass die Scherfestigkeit im Mittel und auch im Median in der Reihenfolge CHX, Alkohol, Zitronensäure, Aqua dest., NaOCl und schließlich EDTA abnimmt.

Tabelle 3: Deskriptive Auswertung der Scherfestigkeit (MPa) von *SpeedCEM Plus* für die einzelnen Spülflüssigkeiten

Gruppe	n	MW	Median	SD	Min	Max	Shapiro-Wilk
Alkohol	10	7,54	7,58	2,10	3,73	10,73	p=0,980
Aqua dest.	10	6,68	6,90	1,26	4,98	9,48	p=0,048
CHX	10	7,79	7,84	1,02	6,25	9,25	p=0,661
EDTA	10	5,66	5,35	1,76	3,37	9,78	p=0,194
NaOCl	10	6,59	6,07	1,98	4,30	11,38	p=0,67
Zitronensäure	10	7,20	7,76	2,34	2,79	10,04	p=0,233

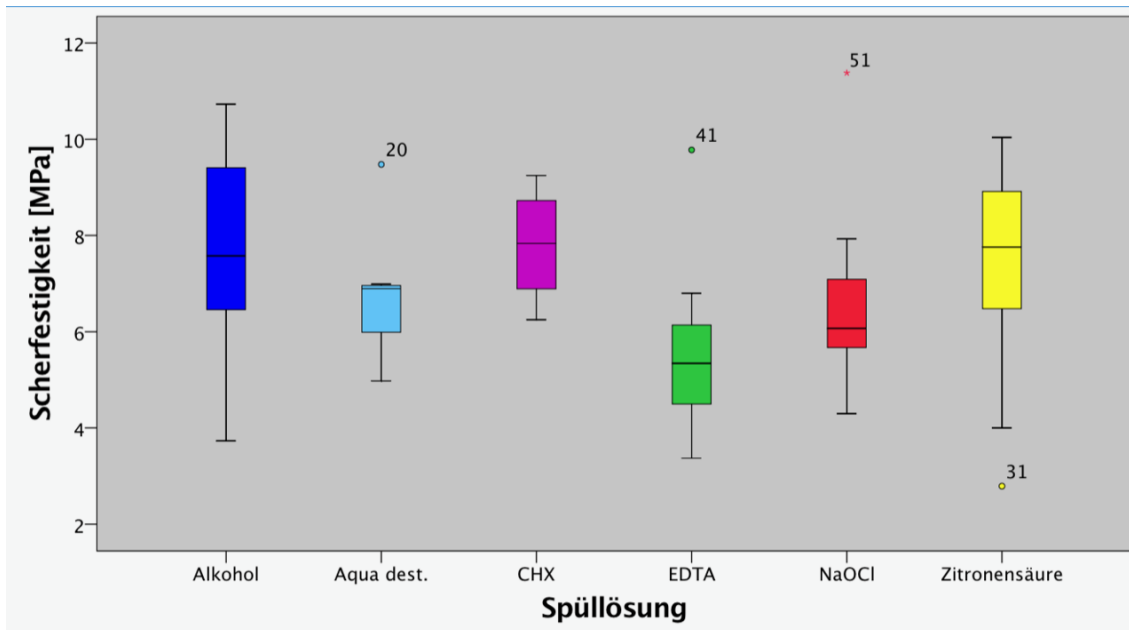


Abbildung 7: Boxplot-Diagramm der Scherfestigkeitswerte von *SpeedCEM Plus* in Abhängigkeit von der Spüllösung

Der Shapiro-Wilk-Test ergab, dass keine Normalverteilung vorlag. Daher wurden die nicht parametrischen Testverfahren Mann-Whitney-Test und Kruskal-Wallis-Test angewendet.

Im Kruskal-Wallis-Test wurden signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen insgesamt festgestellt ($p=0,049$).

Mittels der Mann-Whitney-Paarvergleich-Analyse zeigten sich signifikante Unterschiede im direkten Vergleich zwischen EDTA und CHX (Tab. 4). EDTA führte vergleichsweise zu einem signifikant (*) schlechteren Haftverbund ($p=0,004^*$). Darüber hinaus wurden für EDTA auch signifikant geringere Haftwerte gegenüber Alkohol ermittelt ($p=0,034^*$). Ferner wurde beim Vergleich von Natriumhypochlorit mit CHX ein schlechterer Haftverbund ($p=0,028^*$) beobachtet.

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Spülflüssigkeit
(Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney-Test)

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6
Gruppe 1		p=0,26	p=0,88	p=0,034*	p=0,20	p=0,88
Gruppe 2	p=0,26		p=0,07	p=0,07	p=0,45	p=0,60
Gruppe 3	p=0,88	p=0,07		p=0,004*	p=0,028*	p=0,76
Gruppe 4	p=0,034*	p=0,07	p=0,004*		p=0,20	p=0,10
Gruppe 5	p=0,20	p=0,45	p=0,028*	p=0,20		p=0,29
Gruppe 6	p=0,88	p=0,60	p=0,76	p=0,10	p=0,29	
Kruskal-Wallis-Test: p=0,049*						

(* = signifikante Unterschiede)

5.2 Bewertung der Frakturmodi

Nach den abgeschlossenen Pullout-Versuchen wurden die Spreader zur Bewertung der einzelnen Frakturmodi von beiden Seiten fotografisch dokumentiert und ausgewertet. Die Ergebnisse für alle 60 Proben finden sich in Kap. 14 Rohdaten.

Es wurden 4 Frakturmodi analysiert:

- Eine saubere glänzende Spreaderoberfläche bedeutete ein adhäsives Versagen am Spreader.
- Erschien die Oberfläche der Spreader matt und war eine dünne Schicht des *SpeedCEM Plus* sichtbar, dann lag ein kohäsives Versagen des Befestigungskomposits vor.
- Eine dicke Schicht *SpeedCEM Plus* am Spreader deutete auf adhäsives Versagen am Dentin hin.
- Eine gemischte Fraktur lag vor, wenn in einer Probe mindestens 2 Frakturmodi auftraten.



Abbildung 8: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout-Analyse mit einem adhäsiven Versagen am Stift

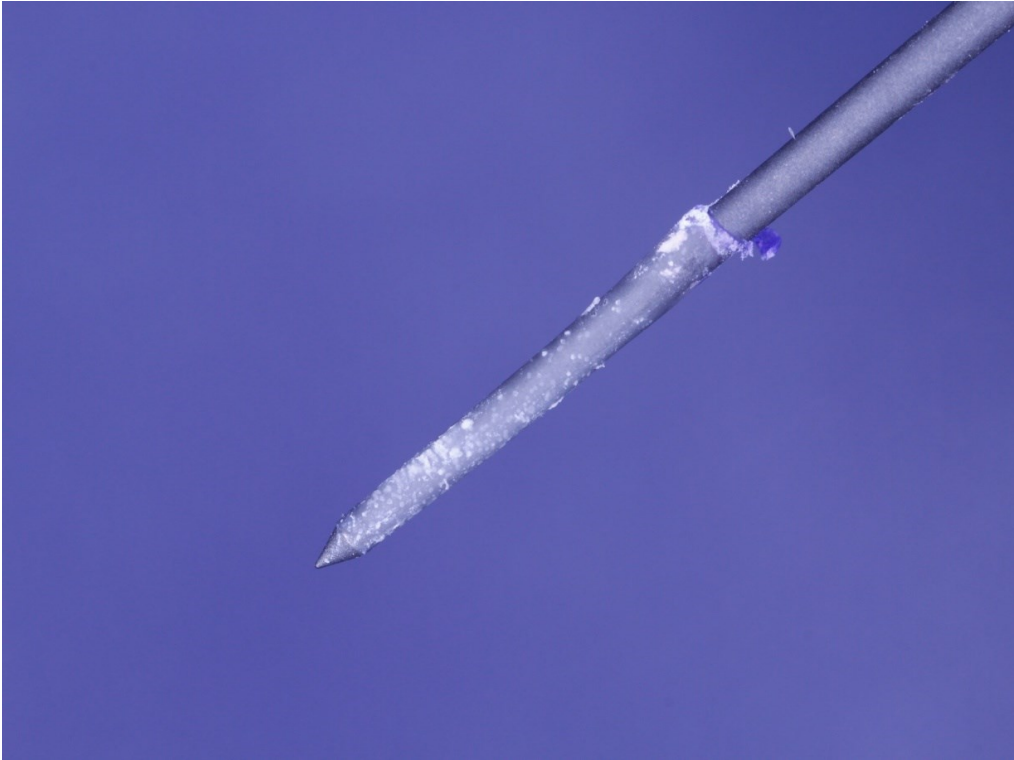


Abbildung 9: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout-Analyse mit einem kohäsiven Versagen am Stift



Abbildung 10: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout-Analyse mit einem adhäsiven Versagen am Dentin



Abbildung 11: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout-Analyse mit einem gemischten Frakturmodus

Auf die Beschreibung der Frakturmodi kohäsives Versagen am Dentin, kohäsives Versagen am Stift, Stiftfraktur und Zahnfraktur konnte verzichtet werden, weil diese Frakturmodi aufgrund der ermittelten Haftwerten nicht aufgetreten waren.

5.3 Zusammenhang zwischen den Frakturmodi und der Spülflüssigkeit

Bei der Auswertung der Frakturmodi lagen generell keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen vor. Ein erhöhtes adhäsives Versagen am Dentin von 20 % der Frakturen lag allerdings in der Gruppe der Probenzähne, die mit EDTA gespült worden waren vor. Bei CHX und Alkohol lag jeweils in 10% der Fälle adhäsives Versagen am Dentin vor. Ein kohäsives Versagen von 10% lag nur bei Alkohol vor. In den anderen Gruppen gab es kein kohäsives Versagen. Das adhäsive Versagen an der Spreaderoberfläche lag mit 30% in der mit Aqua dest. gespülten Gruppe am häufigsten vor, gefolgt von 20% in der CHX Gruppe und 10% in der Natriumhypochlorit-Gruppe. Insgesamt

überwiegen bei den Gruppen signifikant die gemischten Frakturen mit 100 % gemischter Fraktur bei der Zitronensäure, 90% bei Natriumhypochlorit und jeweils 80 % bei EDTA und Alkohol, sowie 70 % in den Aqua dest. und CHX Gruppen.

Zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen den Frakturmodi und der Spülflüssigkeit (Frakturmodus* Spülflüssigkeit) wurde ein Korrelationstest nach Spearman durchgeführt. Hiermit sollte festgestellt werden, ob sich die Flüssigkeiten dahingehend unterscheiden, ob sie den einen oder anderen Frakturmodus bewirken. Mit dem Test wurden folgende Werte ermittelt:

Spearman rho: 0,142: Dies bedeutet, dass keine Korrelation zwischen Spülflüssigkeit und der Form des Frakturmodus ermittelt wurde.

Der p-Wert von 0,279 zeigt, dass keine Signifikanz vorliegt.

Eine eindeutige Beziehung zwischen Frakturmodus und Spülprotokoll konnte aus der Spreaderauswertung somit nicht erkannt werden.

Tabelle 5: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Frakturmodi in den experimentellen Gruppen

Gruppe	Adhäsives Versagen an der Spreaderoberfläche	Kohäsives Versagen	Adhäsives Versagen am Dentin	Gemischte Fraktur
Alkohol	0	10	10	80
Aqua dest.	30	0	0	70
Chlorhexidindigluconat-Lösung	20	0	10	70
EDTA	0	0	20	80
Natriumhypochlorit	10	0	0	90
Zitronensäure	0	0	0	100

5.4 Zusammenhang zwischen den Frakturmodi und der Scherfestigkeit

Auch zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der Scherfestigkeit und den Frakturmodi (Scherfestigkeit * Frakturmodus) wurde ein Korrelationstest nach Spearman durchgeführt. Damit sollte ermittelt werden, ob eine mögliche Abhängigkeit des einen oder anderen Frakturmodus mit einem höheren oder niedrigeren Haftverbund besteht. Bei dem Test ergaben sich folgende Werte:

Spearman rho: 0,227. Dies bedeutet das Vorliegen einer schwachen Korrelation. Der Signifikanzwert war mit $p=0,082$ nicht signifikant. Dies bedeutet, dass Frakturmodus und Scherfestigkeit voneinander unabhängig sind.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methodik

6.1.1 Auswahl der Probezähne

Die Entscheidung zugunsten humaner anstelle von bovinen Zähnen fiel aufgrund der Tatsache, dass eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit der klinischen Situation möglich sein sollte. Die morphologische Struktur des Dentins von bovinen Zähnen ist anders als die von humanen Zähnen (99). Soares & Santo (2015) belegten dies bereits in einer Studie. Die Mikrohärtigkeit von bovinen Dentin ist geringer als jene vom humanen Dentin (99).

Für die Studie wurden Zähne verschiedener Altersgruppen verwendet. Dabei lässt es sich nicht ganz vermeiden, dass die Ergebnisse der Studie durch altersbedingte Veränderungen im Wurzelkanal, beeinflusst werden. Diese altersbedingten Veränderungen wie Ausdehnung der Dentinkanäle wurden von Kontakiotis et al. (2015) festgestellt (55). Des Weiteren können gemäß Bajaj et al. (2006) Sklerosierungen, Mikrorisse oder Tertiärdentinbildung auftreten (3). Durch die randomisierte Einteilung der Zähne in 6 Gruppen wurde versucht, den Einfluss der altersbedingten Veränderungen auf die Versuchsergebnisse zu minimieren. Durch die Randomisierung ist gewährleistet, dass die Zähne aller Versuchsgruppen in etwa die gleiche Altersverteilung aufwiesen.

Es wurden einwurzelige Zähne mit geradem Wurzelverlauf gewählt, auf 10 mm dekapitiert und auf 8 mm Arbeitslänge bis ISO 60 maschinell aufbereitet. Daraus ergibt sich eine effektive Haftfläche von 17,2 mm². Dadurch sollten in den einzelnen Proben die Wurzeloberflächen und die Stärken des adhäsiven Zementes möglichst identisch sein. Durch den geraden Wurzelverlauf der Probezähne soll auch ein Verkeilen der Spreader beim Pullout-Versuch verhindert und ein in Kanalachse gerichteter Pullout ermöglicht werden.

Die Zähne wurden in 0,001% Natriumacid-Lösung aufbewahrt. Dadurch wurden die Probezähne desinfiziert und vor dem Austrocknen geschützt. Santana et al. (2008) stellten fest, dass es keine signifikanten Unterschiede in den Haftwerten

zwischen in Natriumacid aufbewahrten und frisch extrahierten Zähnen gab (91). Dagegen zeigten Aufbewahrungsmedien wie Thymol oder Formalin einen negativen Einfluss auf die Haftwerte (91).

6.1.2 Methoden zur Analyse des Haftverbundes

Die Scherkräfte am Dentin lassen sich unter anderem durch folgende Versuchsmethoden ermitteln:

- Scherversuche
- Ausstoßversuche (Pushout)
- Miniaturzugversuche
- Auszugversuche (Pullout)

6.1.2.1 Conventional Shear/ Tensile Bond-Strength-Test (Konventioneller Scher-/ Zugversuch)

Bei dieser Methode zur Messung der Haftung zwischen Befestigungsmaterialien und Zahnschubstanz wird ein vorgefertigter Kompositzylinder auf eine je nach verwendetem Adhäsiv vorbehandelte Zahnoberfläche anpolymerisiert (39). Zur Messung der Scherhaftung wird die Belastung parallel zur Verbundfläche ausgeübt, bei den Zugfestigkeitstests wird die Belastung rechtwinklig zur Verbundfläche ausgeübt (39). Es wird der Druck gemessen, der benötigt wird, um den Prüfkörper zu zerstören. Da die Messwerte von den experimentellen Bedingungen abhängen, wie etwa dem Durchmesser des Prüfkörpers, können Ergebnisse unterschiedlicher Testserien nur bedingt miteinander verglichen werden. Bei Kräften von 15-20 MPa die auf den Prüfkörper wirken, entstehen kohäsive Dentinausrisse, somit ist eine genaue Bewertung der Haftfläche nicht mehr möglich (14, 39, 73). Diese Werte liegen jedoch deutlich oberhalb der eigenen Werte. Darüber hinaus kommt es bei den Scher- und Zugkräften zu einer ungleichen Kräfteverteilung an der Haftfläche (24).

6.1.2.2 Pushout-Test (Ausstoßversuch)

Bei dem Ausstoßversuch werden die Zahnwurzeln mit einzementierten Stiften in horizontaler Richtung gesägt, wobei 1 bis 2 mm dicke Dentinscheiben senkrecht zur Zahnachse aus dem apikalen, mittleren und zervikalen Drittel herausgesägt werden (39). Die Probenscheiben (Querschnitte) werden mit der koronalen Seite nach unten in eine Universalprüfmaschine eingespannt, so dass der zylindrische Prüfkolben auf dem Wurzelstift trifft, ohne dabei die Dentinscheibe zu berühren. Der Stift wird dann durch die Kraft des Kolbens in apiko-koronaler Richtung bis zum Versagen des adhäsiven Verbundes belastet. Bei diesem Test können die Haftwerte der unterschiedlichen Kanalabschnitte bestimmt werden (39). Durch das Zersägen der Probezähne könnte es zu einer Beeinflussung des Haftverbundes durch Vibrationen kommen (54).

In dieser Studie wurde der Pullout-Test ausgewählt, um eine weitgehend reale klinische Situation zu simulieren, mit möglichst wenigen Störfaktoren.

6.1.2.3 Microtensile-Bond-Strength-Test (Miniaturzugversuch)

Ein anderes gängiges Verfahren ist der Microtensile-Bond-Strength-Test (83). Bei dem Test wird die klinische Krone des Probezahnes bis zu einer gleichmäßigen Schmelz- oder Dentinfläche plan geschliffen. Die plane Fläche wird dann nach Herstellerangaben adhäsiv vorbehandelt und eine Kunststoffkappe aufpolymerisiert (73, 90). Je größer der Prüfkörper ist, desto höher ist das kohäsive Versagen. Bei dem Microtensile-Bond-Strength-Verfahren werden sehr kleine Prüfflächen verwendet. Die Probezähne mit den Kompositzylindern werden vertikal in Stäbchen mit einer Fläche von 0,5 mm bis 1 mm gesägt. Es wird zwischen dem Miniaturzugversuch A mit sanduhrförmigen Prüfkörpern und dem Miniaturzugversuch B mit parallelwandigen Stäbchen unterschieden (39). Die Proben werden anschließend in eine Universalprüfmaschine eingespannt und bis zum Versagen des adhäsiven Verbundes auseinandergezogen. Die Vorteile sind, dass hier durch die gradlinige Zugbelastung Dentinrisse weitgehend vermieden werden (94). Des Weiteren wird durch die kleinen Prüfkörperflächen bei dieser Versuchsmethode das kohäsive Versagen minimiert, welches mit zunehmender Größe des Prüfkörpers steigt. Die Versuchsmethode mit kleinen

Prüfkörpern ist experimentell aufwändig, da diese recht schnell austrocknen (76) und auch beim Sägen Risse in den Prüfkörpern resultieren können (39). Des Weiteren müssen die Prüfkörper fehlerfrei in die Universalmaschine eingespannt werden, da ansonsten Torsionen resultieren können und so vorzeitige Krafteinwirkungen auftreten, die möglicherweise die Werte verfälschen.

Darüber hinaus kann das Testverfahren auch bei adhäsiv zementierten Wurzelstiften durchgeführt werden. Hierbei werden die Wurzeln mit einzementiertem Stift in dünne Scheiben gesägt, anschließend werden zwei seitliche Kerben mit einer Flamme einpräpariert, an denen die Zugkraft angebracht wird, dies entspricht dem Miniaturzugversuch A mit der Sanduhrform (39). Für die Probe in Stäbchenform wird die Wurzel beidseits longitudinal an der Peripherie des Stiftes zerteilt. Die so entstandene Wurzelscheibe wird dann nochmal transversal in Stäbchen gesägt. Da die Fehleranfälligkeit und die Frakturgefahr bei der Herstellung der Proben zu hoch ist (39), war dieses Prüfverfahren für diese Studie nicht geeignet.

6.1.2.4 Pullout-Test (Zugversuch)

In dieser Studie wurde das Pullout-Verfahren durchgeführt. Mit einer *Zwick-Universalprüfmaschine Zwick 1120* wurden die zuvor in die Zahnwurzeln einzementierten Stahlspreader, durch axiale Zugbelastung bis zum adhäsiven Versagen herausgezogen. Im Anschluss konnte man die herausgezogenen Spreader zur Bestimmung der Frakturmodi verwenden (54). Ein Vorteil dieses Verfahrens ist auch, dass viele Proben in einer relativ kurzen Zeit gegenüber den anderen Testmethoden durchgeführt werden können (9). Des Weiteren wurde der Zugversuch gewählt, da er am ehesten die klinische Situation widerspiegelt. Die Belastung der Spreader in den Zahnwurzeln erfolgte gleichmäßig und ruckfrei. Die axialen Kräfte, die beim Zugversuch auftraten, bezogen sich auf die gesamte Kanallänge und dem Spreader. Daher ist dies das aussagekräftigste Prüfverfahren. Bei dem Zugversuch werden die Zähne nicht segmentiert und somit vor dem Messen nicht in kleinere Abschnitte zerteilt. Daher ist bei dieser Methode die Frakturgefahr der Zahnwurzeln geringer. Einzelne Wurzelkanalabschnitte können mit diesem Prüfverfahren allerdings nicht unter-

sucht werden, sondern nur der Haftverbund des Stiftes zur gesamten Verbundfläche. Dadurch ergibt sich der Nachteil, dass pro Zahn auch nur ein Messwert ermittelt werden kann.

6.1.3 Einflussfaktor Lichthärtung

In dieser Studie wurde nur die chemische Aushärtung des selbstadhäsiven Befestigungszementes *SpeedCEM Plus* unter gleichmäßig erfolgter Dunkelhärtung untersucht, sodass die optionale Lichthärtung hier nicht mit einbezogen wurde. Um die Proben vor dem Licht zu schützen, wurden sie nach der Stiftzementierung in einer lichtundurchlässigen Box aufbewahrt. Lührs et al. (2014) zeigten, dass sich die Scherhaftwerte bei Dualhärtung von selbstadhäsiven Befestigungskompositen, also mit zusätzlicher Lichthärtung, signifikant erhöht haben. Damit ist der Einfluss der zusätzlichen Aushärtung durch Licht auf den Haftverbund zum Dentin bewiesen (59). Auch in der Studie von Ramos et al. (2012) wurden die Scherhaftwerte von verschiedenen dualhärtenden Befestigungskompositen einmal ohne und einmal mit Lichthärtung untersucht. Alle untersuchten Komposite wiesen nach Lichthärtung eine höhere Scherhaftung auf. Durch die Aktivierung durch Lichteinfluss wurde die Mikrohärtigkeit des Komposits gesteigert. In dieser Studie wurde die optionale Lichthärtung der Proben nicht durchgeführt, sodass dementsprechend die verbesserten Haftwerte durch Lichteinfluss in dieser Studie nicht ermittelt wurden (84). In einer Studie von Pereira et al. (2015) zeigte sich, dass bei einer verzögerten Lichtpolymerisation ein geringerer Polymerisationsstress beim Zementieren von Wurzelstiften resultierte (78). Der Vorteil der reinen Dunkelhärtung könnte darin begründet liegen, dass der Polymerisationsstress geringer ist und der Kunststoff nicht sofort aushärtet, sondern noch entlang des Wurzelkanals nachfließen kann. Zudem darf die Wirkung der Lichtpolymerisation nicht überschätzt werden, da sie beim Einsatz metallischer Stifte nur eine begrenzte Tiefe erreicht und somit nicht über die gesamte Strecke des Stiftkanals wirkt. Insbesondere bei Pullout-Analysen, wo nicht zwischen den Haftverbundwerten der verschiedenen Ebenen unterschieden werden kann, erhält man somit einen Wert, der sich dann aus jenen Bereichen mit Lichthärtung sowie anderen ohne Lichthärtung zusammensetzt.

Um hier dieses Dilemma zu umgehen, wurde lediglich eine Polymerisationsform gewählt, die in sämtlichen Kanalabschnitten wirksam wurde.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

In der durchgeführten Studie wurde der Einfluss verschiedener Spüllösungen auf den Haftverbund von *SpeedCEM Plus* in Verbindung mit intrakanalären inserierten Metallstiften durch eine Pullout-Analyse untersucht. In den Gruppen der verwendeten Spüllösungen wurden signifikante Unterschiede festgestellt (Kruskal-Wallis-Test, $p=0,049$). Die niedrigsten Haftwerte wurden nach Spülung der Kanäle mit EDTA, Natriumhypochlorit und Aqua dest. erzielt. Die höchsten Haftwerte wurden mit Chlorhexidin, Zitronensäure und Alkohol erreicht.

Der Median der ausgewerteten Haftverbundwerte der Proben, die mit 40-prozentiger Zitronensäure gespült wurden, lag bei 7,76 MPa, dies war der zweit höchste Wert. In der Studie von Turk et al. (2015) wurde herausgefunden, dass Zitronensäure den Smear Layer besser entfernen konnte als EDTA (107). Die Haftwerte von *SpeedCEM Plus* lassen sich durch die Dicke der Schmierschicht beeinflussen (76). Hierdurch sind wahrscheinlich die höheren Haftwerte bei den Proben zu erklären, die mit Zitronensäure gespült wurden, im Gegensatz zu den niedrigen Haftwerten bei EDTA. Eine weitere Erklärung ist die hohe Konzentration der Zitronensäure, diese lag bei 40 Prozent und hat somit einen effektiven pH-Wert von 1,2 (pH-Wert-Analyse im wissenschaftlichen Labor der Zahnklinik Marburg). 36-prozentige Phosphorsäure besitzt nur einen unwesentlich höheren pH-Wert von 1,6. Somit muss nicht nur die Eigenschaft der Zitronensäure als Chelator beurteilt werden, sondern auch die Eigenschaft der Säurewirkung. Durch die Säurewirkung wird die Oberfläche aufgeraut und die Schmierschicht entfernt. Eine Studie von Taschner et al. (2010) zeigte, dass durch die Entfernung der Schmierschicht durch eine Säure die Haftverbundwerte der eines selbstätzenden Adhäsivs verbessert werden konnten (102). Auch Azadi-Schossig et al. (2016) zeigten, dass nicht so sehr die Eigenschaft als Chelator (2), sondern vielmehr die Säurewirkung für die Entfernung der Schmierschicht von Bedeutung ist.

Der schwächste Haftverbund zeigte sich bei der Spülung der Kanäle mit EDTA (Median 5,35 MPa). Auch Faria-e-Silva et al. (2013) zeigten, dass es bei Verwendung von einer 17-prozentigen EDTA-Spülung im Wurzelkanal mit anschließender Verwendung von selbstadhäsiven Kompositen zu einer Verschlechterung des Haftverbundes kam (31). Da EDTA mit den Calciumionen der Dentinoberfläche reagiert (72), kommt es somit zu einem Absinken der Hydroxylapatitstärke (72). Hydroxylapatit ist ein Reaktionspartner von den selbstadhäsiven Kompositen (34). EDTA reagiert folglich mit den Calciumionen in der Dentinoberfläche, die dann nicht mehr für die Reaktion mit den selbstadhäsiven Kompositen zur Verfügung stehen. Auch bei der Auswertung der Frakturmodi lag bei der Spülung mit EDTA ein erhöhtes Versagen am Dentin vor.

Die zweitschlechtesten Werte wurden mit Natriumhypochlorit erzielt. Der Medianwert lag bei 6,07 MPa. Auch die Ergebnisse von Khoroushi & Kachuei (2014) zeigen, dass durch die vorherige Spülung des Wurzelkanals mit Natriumhypochlorit, bei Verwendung eines selbstadhäsiven Befestigungskomposits, ein geringerer Haftverbund entsteht. Das anschließende Spülen mit antioxidativ wirkenden Spülungen könnte den Haftverbund wieder erhöhen (53).

Die freien Radikale, die bei der Spülung mit Natriumhypochlorit entstehen, könnten die Polymerisation von Adhäsiven stören und so zu einem geringeren Haftverbund zum Dentin führen. In der Studie von Montagner et al. (2015) wurde kein signifikanter Unterschied in der Stärke des Haftverbundes nach der Vorbehandlung mit Natriumhypochlorit (70) und anschließender Verwendung eines Self-etch-Adhäsivs festgestellt. Natriumhypochlorit löst die organischen Bestandteile auf (20, 46). Dadurch wird die Dicke der Schmierschicht beeinflusst (20), wodurch die sauren Monomere leichter diffundieren können und dadurch höhere Haftverbundswerte entstehen können. Zu diesem Ergebnis kamen Elkassas et al. (2014) in ihrer Studie (28). In dieser Untersuchung konnten diese Ergebnisse allerdings nicht bestätigt werden. Den dritthöchsten Haftfestigkeitswert erzielte in dieser Studie die Spülung mit Ethanol. Alkohol entzieht Feuchtigkeit und trocknet das Kanalsystem bis in die Dentintubuli (81). Die Kollagenmatrix wird dadurch hydrophober (58). Bei adhäsiven Befestigungsmaterialien ist die absolute Trockenlegung notwendig, da es ansonsten zu keinem guten

Haftverbund kommt. Zudem könnten die hohen Haftwerte von 7,58 MPa mit der zusätzlichen Trocknung mit Papierspitzen und Alkohol begründet sein, wodurch die Restfeuchtigkeit effektiv reduziert werden konnte.

Der höchste ermittelte Wert lag bei 7,84 MPa und wurde mit einer Spülung mit 2-prozentiger Chlorhexidindigluconatlösung erreicht. CHX deaktiviert die körpereigenen Enzyme wie Cathepsinen und MMPs wodurch eine Nanoleakage verhindert wird. Allerdings dürfte diese Wirkung eher einen mittel- bis langfristigen Effekt auf den Haftverbund bedeuten.

Die MMPs zersetzen das freigelegte Kollagen und besitzen somit einen negativen Einfluss auf die Stabilität des adhäsiven Verbundes. Durch die dadurch freigesetzte pulpale Flüssigkeit, die im Bereich der Hybridschicht zwischen dem Dentin und dem selbstadhäsiven Zement gelangt, kommt es zur Verringerung der Haftwerte. Durch das Spülen mit 2-prozentigem Chlorhexidin kommt es zu einer Inaktivierung von MMPs und damit zu einem Schutz der Kollagenstruktur und verbesserten Haftwerten (69). Auch die Höhe der Konzentration der Chlorhexidinspülung wurde in manchen Untersuchungen als abhängig auf deren Wirkung beschrieben (20), in einer Studie von Zhang et al. (2010) wurden ab einer Chlorhexidinkonzentration von 0,2 Prozent allerdings keine Unterschiede mehr festgestellt (117). Auch in der Untersuchung von Sabatini et al. (2013) wurde festgestellt, dass Chlorhexidin eine Hemmung der proteolytischen Dentinaktivität schon ab einer Konzentration von 0,2 Prozent und 2 Prozent zeigt, es aber keine konzentrationsabhängige Haftveränderung der Dentinadhäsive gibt (88). Campos et al. (2009) kamen zu dem Ergebnis, dass die Vorbehandlung mit 2-prozentigem Chlorhexidin den Verlust an Mikrozugfestigkeit in dem untersuchten Zeitraum von 6 Monaten sich verringerte (17). In einer anderen Studie zeigte sich gar keine Veränderung im Haftverbund zum Wurzelentin unter der Anwendung von 2-prozentigem CHX (66). Die Hemmung der MMPs führt zu einer erhöhten Dentinbindungsstärke. Des Weiteren trug wahrscheinlich eine Stabilisierung der Hybridschicht durch Spülung mit Chlorhexidin zu den hohen Haftwerten bei (18).

Das Chlorhexidin zerstört zahlreiche grampositive sowie auch gramnegative und fakultativ anaerobe und aerobe Keime. Deshalb kann die Annahme getroffen werden, dass die Säureproduktion durch die Bakterien reduziert wird, wodurch ein höherer pH-Wert entsteht und die Calciumionen wieder mehr für die chemische Reaktion mit dem selbstadhäsiven Komposit zur Verfügung stehen können. Diese Annahme ist bislang jedoch nicht literaturseitig belegt. Es existieren verschiedene Meinungen hinsichtlich des Einflusses von Chlorhexidin auf den adhäsiven Verbund. Folglich bedarf es weiterer Studien, die sich dieses Themas annehmen.

Bei der Spülung mit Aqua dest. lag der Median bei 6,90 MPa. Der niedrigste Wert wurde mit 5,35 MPa bei EDTA erreicht. EDTA ist ein Komplexbildner der mit den Calciumionen (72) im Hydroxylapatit reagiert, dadurch kommt es zu einer Calciumerschöpfung im Wurzelkanalentin. Die Calciumionen sind jedoch für die Reaktion mit den selbstadhäsiven Kompositen notwendig. Wenn sie nicht ausreichend zur Verfügung stehen, sinken auch die Haftwerte. Auch Faria-e-Silva et al. (2013) fanden heraus, dass die Dentinvorbehandlung mit einer 17-prozentigen EDTA-Lösung sich negativ auf den Haftverbund auswirkt (31), da sich zeigte, dass EDTA zu einer Reduktion der Hydroxylapatitstärke (72) führt.

7 Klinische Schlussfolgerung

Arbeitshypothese 1:

Die unterschiedlichen endontischen Spüllösungen führen zu unterschiedlichen Haftwerten.

Die Arbeitshypothese 1 wird **angenommen**.

Zusammenfassend kann anhand der Ergebnisse dieser Studie bestätigt werden, dass die in der Endodontie verwendeten Spüllösungen einen signifikanten Einfluss auf den Haftverbund zwischen dem Wurzelkanalentin und selbstadhäsiven Komposit *SpeedCEM* haben. Vor der Stiftsetzung mit *SpeedCEM* hat sich in dieser Untersuchung gezeigt, dass eine vorherige Spülung mit CHX eine positive Auswirkung auf den Haftverbund hat. Des Weiteren lassen sich auch noch relativ gute Haftwerte mit einer Spülung mit Alkohol oder 40-prozentiger Zitronensäure erreichen.

Arbeitshypothese 2:

Oxidierende Spüllösungen reduzieren den Haftverbund von *SpeedCEM*.

Die Arbeitshypothese 2 wird **abgelehnt**.

Die oxidierende Spüllösung NaOCl hatte keine Verschlechterung des Haftverbundes zur Folge, sondern war hinsichtlich der Haftwerte der Spülung mit Aqua dest. vergleichbar.

Arbeitshypothese 3:

Der Einsatz von Chelatoren führt zu einer Erhöhung des Haftverbundes von *SpeedCEM*.

Die Arbeitshypothese 3 wird **abgelehnt**.

Der erwartete Effekt, eine Verbesserung des Haftverbundes durch die Entfernung der Schmierschicht zu erzielen, konnte nicht erreicht werden. Es zeigten sich höhere durchschnittliche Haftwerte nach Spülung mit Zitronensäure im Vergleich zur Aqua dest.-Gruppe, jedoch niedrigere Haftwerte nach Spülung mit EDTA. Beide Spüllösungen wiesen allerdings keine signifikanten Unterschiede gegenüber der Kontrollgruppe auf.

8 Zusammenfassung

8.1 Problemstellung und Zielsetzung

Bei der Wurzelkanalaufbereitung wird die Keimzahl durch einen zirkulären Substanzabtrag des Wurzelkanaldentins mit mechanischen Instrumenten reduziert. Eine alleinige mechanische Aufbereitung des Kanalsystems reicht aber nicht aus, sodass die Wurzelkanäle zusätzlich während der Behandlung mit desinfizierenden Spülflüssigkeiten gespült werden müssen. Dies ermöglicht auch eine weitgehende Auflösung und ein Herausspülen von Dentinspänen und Geweberesten. Bei endodontisch behandelten Zähnen mit einem hohen Destruktionsgrad der klinischen Krone sind zur Erhöhung der Retention einer Restauration Wurzelstifte erforderlich.

Vorherige Studien haben gezeigt, dass das Retentionsverhalten unter anderem abhängig ist von Stiftgröße, Stiftdesign und Oberflächenbeschaffenheit, sowie das entsprechende Befestigungsmaterial einen Einfluss auf die Stiftverankerung hat. Für eine erleichterte Stifzementierung lassen sich selbstadhäsive Komposite wie zum Beispiel *SpeedCEM* einsetzen und reduzieren die Gefahr von Zementierungsfehlern.

Ziel der Studie war es, den Einfluss von verschiedenen Spüllösungen auf den Haftverbund von Wurzelstiften aus Metall mit dem selbstadhäsiven Kompositzement *SpeedCEM* zu untersuchen.

8.2 Material und Methode

60 einwurzelige Zähne mit geradem Wurzelverlauf wurden maschinell bis Größe ISO 60 mit dem *BioRaCe*-System aufbereitet und mit Aqua dest. gespült. Die Zähne wurden auf 10 mm getrimmt bei einer Arbeitslänge von 8 mm. Dadurch ergab sich eine standardisierte Oberfläche von 17,2 mm². Die aufbereiteten 60 Zähne wurden in 6 Gruppen mit (n=10) randomisiert zugeordnet:

- Gruppe 1: Aqua dest. (Kontrollgruppe)
- Gruppe 2: Natriumhypochlorit (3%)

- Gruppe 3: EDTA (15%)
- Gruppe 4: Zitronensäure (40%)
- Gruppe 5: Ethanol (70%)
- Gruppe 6: Chlorhexidindigluconatlösung (2%)

Es wurden silikatisierte Spreader der Größe ISO 60 verwendet.

Die Wurzelkanäle der 60 Zähne wurden mit den jeweiligen Spüllösungen gespült und anschließend mit Papierspitzen getrocknet. Der dualhärtende Zement *SpeedCEM* wurde mittels eines Lentulos 250/min in die Kanäle einrotiert und direkt im Anschluss wurden die Spreader eingebracht. Anschließend lagerten die Zähne bei Dunkelheit bis der Befestigungszement ausgehärtet war. Nach 20 Tagen erfolgte der Pullout-Versuch, wobei die Spreader mittels einer Zwick-Universalprüfmaschine aus dem Wurzelkanal gezogen wurden. Es wurde die maximale Kraft gemessen, die zum Verlust des Haftverbundes erforderlich war. Anschließend erfolgte die statistische Auswertung mit dem SPSS-Softwareprogramm.

8.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Es gab signifikante Unterschiede bei den getesteten Spüllösungen im Wurzelkanal in Bezug auf die Haftwerte von *SpeedCEM* zum Wurzelkanaldentin (Kruskal-Wallis-Test, $p=0,049$). Die höchsten Werte wurden mit CHX, Zitronensäure und Ethanol erreicht. Das Spülen mit Aqua dest., Natriumhypochlorit und EDTA führte zu signifikant niedrigeren Haftwerten. Durch die Studie wurde bestätigt, dass verschiedene Spülflüssigkeiten die Haftwerte vom selbstadhäsiven Komposit *SpeedCEM* beeinflussen.

9 Summary

9.1 Objective

Root canal preparation reduces the bacterial load by the circular removal of root canal dentin with mechanical instruments. However, mechanical treatment of the canal system without the use of irrigations is not sufficient, so root canals must also be disinfected during the treatment with bactericidal irrigations. They also enable a sufficient dissolution and removal of dentin chips and tissue residues. For endodontically treated teeth with a significant loss of destruction of the clinical crown, root posts are required to retain a restoration. Previous studies have shown that retention behavior depends, among other things, on root post size, root anatomy and surface finish, and that the corresponding luting material has an influence on post anchorage. Self-adhesive composites like *SpeedCEM* can be used to facilitate root post cementation. The aim of the study is to investigate the influence of different rinsing solutions on the bonding of metal posts with the self-adhesive composite cement *SpeedCEM*.

9.2 Material and Methods

60 single-rooted teeth with straight mature roots were instrumented to ISO 60 using the BioRaCe system and rinsed with distilled water. After trimming the coronal part of the irrigated root, a resulting canal length of 8 mm was established with an effective post canal surface of 17.2 mm². The instrumented teeth are randomized into 6 groups (n=10).

- group 1: distilled water (control)
- group 2: sodium hypochlorite 3%
- group 3: EDTA 15%
- group 4: citric acid 40%
- group 5: ethanol 70%
- group 6: chlorhexidine digluconate 2 %

Silicated spreaders of size ISO 60 were used. The post canals of the 60 teeth were rinsed with the respective rinsing solutions and then dried with paper tips. The dual-curing cement *SpeedCEM* was placed into the post canals by means of a lentulos and the spreaders were inserted directly afterwards. The teeth were then stored under dark conditions until the cement was completely set. Thereafter, a pullout test was performed. The spreaders were extruded out of the root canals using a *Zwick 1120* universal testing machine. The maximum of force to extrude the spreaders was calculated. Subsequently, statistics was computed using SPSS 25 software package.

9.3 Results and Conclusion

There were significant differences in terms of bond strength of *SpeedCEM Plus* when post canals were irrigated with the 6 investigated endodontic irrigations. (Kruskal-Wallis test, $p=0.049$). The highest bond strength values were achieved with chlorhexidine digluconate, citric acid and ethanol. Rinsing with distilled water, sodium hypochlorite and EDTA resulted in lower bond strength values. The present study confirms that the investigated endodontic irrigation affected bond strength of the self-adhesive luting composite *SpeedCEM Plus*.

10 Literaturverzeichnis

1. Ari H, Yaşar E, Belli S. Effects of NaOCl on bond strengths of resin cements to root canal dentin. *J Endod.* 2003 Apr;29(4):248–51.
2. Azadi-Schossig P, Becker K, Attin T. Chelating effect of citric acid is negligible for development of enamel erosions. *Clin Oral Investig.* 2016 Sep;20(7):1577–87.
3. Bajaj D, Sundaram N, Nazari A, Arola D. Age, dehydration and fatigue crack growth in dentin. *Biomaterials.* 2006 Apr;27(11):2507–17.
4. Baratto-Filho F, Fariniuk LF, Ferreira EL, Pecora JD, Cruz-Filho AM, Sousa-Neto MD. Clinical and macroscopic study of maxillary molars with two palatal roots. *Int Endod J.* 2002 Sep;35(9):796–801.
5. Barthel CR, Roulet JF. Can we fulfil even the basics of endodontic therapy? *Ann R Australas Coll Dent Surg.* 2002 Oct;16:30–6.
6. Basrani BR, Manek S, Sodhi RNS, Fillery E, Manzur A. Interaction between sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate. *J Endod.* 2007 Aug;33(8):966–9.
7. Basrani B, Santos JM, Tjäderhane L, Grad H, Gorduysus O, Huang J, et al. Substantive antimicrobial activity in chlorhexidine-treated human root dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002 Aug;94(2):240–5.
8. Binus S, Koch A, Petschelt A, Berthold C. Restoration of endodontically treated teeth with major hard tissue loss--bond strength of conventionally and adhesively luted fiber-reinforced composite posts. *Dent Traumatol.* 2013 Oct;29(5):339–54.
9. Bitter K, Perdigão J, Exner M, Neumann K, Kielbassa A, Sterzenbach G. Reliability of fiber post bonding to root canal dentin after simulated clinical function in vitro. *Oper Dent.* 2012 Aug;37(4):397–405.

10. Bitter K, Aschendorff L, Neumann K, Blunck U, Sterzenbach G. Do chlorhexidine and ethanol improve bond strength and durability of adhesion of fiber posts inside the root canal? *Clin Oral Investig*. 2014 Apr;18(3):927–34.
11. Bitter K, Hambarayan A, Neumann K, Blunck U, Sterzenbach G. Various irrigation protocols for final rinse to improve bond strengths of fiber posts inside the root canal. *Eur J Oral Sci*. 2013 Aug;121(4):349–54.
12. Bitter K, Perdigão J, Hartwig C, Neumann K, Kielbassa AM. Nanoleakage of luting agents for bonding fiber posts after thermo-mechanical fatigue. *J Adhes Dent*. 2011 Feb;13(1):61–9.
13. Borges FMC, de Melo MAS, Lima JPM, Zanin ICJ, Rodrigues LKA. Antimicrobial effect of chlorhexidine digluconate in dentin: In vitro and in situ study. *J Conserv Dent*. 2012 Jan;15(1):22–6.
14. Braga RR, Meira JBC, Boaro LCC, Xavier TA. Adhesion to tooth structure: a critical review of 'macro' test methods. *Dent Mater*. 2010 Feb;26(2):e38-49.
15. Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Di Lenarda R, De Stefano Dorigo E. Dental adhesion review: aging and stability of the bonded interface. *Dent Mater*. 2008 Jan;24(1):90–101.
16. Calt S, Serper A. Time-dependent effects of EDTA on dentin structures. *J Endod*. 2002 Jan;28(1):17–9.
17. Campos EA, Correr GM, Leonardi DP, Barato-Filho F, Gonzaga CC, Zielak JC. Chlorhexidine diminishes the loss of bond strength over time under simulated pulpal pressure and thermo-mechanical stressing. *J Dent*. 2009 Feb;37(2):108–14.
18. Carrilho MRO, Carvalho RM, de Goes MF, di Hipólito V, Geraldeli S, Tay FR, et al. Chlorhexidine preserves dentin bond in vitro. *J Dent Res*. 2007 Jan;86(1):90–4.
19. Chen S, Liu J, Dong G, Peng B, Yang P, Chen Z, et al. Comparison between ultrasonic irrigation and syringe irrigation in clinical and laboratory studies. *J Oral Sci*. 2016;58(3):373–8.

20. Cobankara FK, Ozkan HB, Terlemez A. Comparison of organic tissue dissolution capacities of sodium hypochlorite and chlorine dioxide. *J Endod.* 2010 Feb;36(2):272–4.
21. Collares FM, Rodrigues SB, Leitune VC, Celeste RK, Borba de Araújo F, Samuel SM. Chlorhexidine application in adhesive procedures: a meta-regression analysis. *J Adhes Dent.* 2013 Feb;15(1):11–8.
22. da Cunha LF, Furuse AY, Mondelli RFL, Mondelli J. Compromised bond strength after root dentin deproteinization reversed with ascorbic acid. *J Endod.* 2010 Jan;36(1):130–4.
23. De Munck J, Vargas M, Van Landuyt K, Hikita K, Lambrechts P, Van Meerbeek B. Bonding of an auto-adhesive luting material to enamel and dentin. *Dent Mater.* 2004 Dec;20(10):963–71.
24. DeHoff PH, Anusavice KJ, Wang Z. Three-dimensional finite element analysis of the shear bond test. *Dent Mater.* 1995 Mar;11(2):126–31.
25. DiVito E, Peters OA, Olivi G. Effectiveness of the erbium:YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers Med Sci.* 2012 Mar;27(2):273–80.
26. Drake DR, Wiemann AH, Rivera EM, Walton RE. Bacterial retention in canal walls in vitro: effect of smear layer. *J Endod.* 1994 Feb;20(2):78–82.
27. Ebert J, Leyer A, Günther O, Lohbauer U, Petschelt A, Frankenberger R, Roggendorf MJ. Bond strength of adhesive cements to root canal dentin tested with a novel pull-out approach. *J Endod.* 2011 Nov;37:1558–61.
28. Elkassas DW, Fawzi EM, El Zohairy A. The effect of cavity disinfectants on the micro-shear bond strength of dentin adhesives. *Eur J Dent.* 2014 Apr;8(2):184–90.

29. Erdemir A, Ari H, Güngüneş H, Belli S. Effect of medications for root canal treatment on bonding to root canal dentin. *J Endod.* 2004 Feb;30(2):113–6.
30. European Society of Endodontology. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J.* 2006 Dec;39(12):921–30.
31. Faria-e-Silva AL, Menezes M de S, Silva FP, Reis GR dos, Moraes RR de. Intra-radicular dentin treatments and retention of fiber posts with self-adhesive resin cements. *Braz Oral Res.* 2013 Feb;27(1):14–9.
32. Flury S, Lussi A, Hickel R, Ilie N. Light curing through glass ceramics: effect of curing mode on micromechanical properties of dual-curing resin cements. *Clin Oral Investig.* 2014 Apr;18(3):809–18.
33. Garberoglio R, Becce C. Smear layer removal by root canal irrigants. A comparative scanning electron microscopic study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1994 Sep;78(3):359–67.
34. Gauthier MA, Stangel I, Ellis TH, Zhu XX. Oxygen inhibition in dental resins. *J Dent Res.* 2005 Aug;84(8):725–9.
35. Gerth HUV, Dammaschke T, Züchner H, Schäfer E. Chemical analysis and bonding reaction of RelyX Unicem and Bifix composites--a comparative study. *Dent Mater.* 2006 Oct;22(10):934–41.
36. Golob BS, Olivi G, Vrabec M, El Feghali R, Parker S, Benedicenti S. Efficacy of Photon-induced Photoacoustic Streaming in the Reduction of *Enterococcus faecalis* within the Root Canal: Different Settings and Different Sodium Hypochlorite Concentrations. *J Endod.* 2017 Oct;43(10):1730–5.
37. Goodacre CJ, Spolnik KJ. The prosthodontic management of endodontically treated teeth: a literature review. Part I. Success and failure data, treatment concepts. *J Prosthodont.* 1994 Dec;3(4):243–50.

38. Goracci C, Grandini S, Bossù M, Bertelli E, Ferrari M. Laboratory assessment of the retentive potential of adhesive posts: a review. *J Dent.* 2007 Nov;35(11):827–35.
39. Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, et al. The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci.* 2004 Aug;112(4):353–61.
40. Goztas Z, Onat H, Tosun G, Sener Y, Hadimli HH. Antimicrobial effect of ozonated water, sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate in primary molar root canals. *Eur J Dent.* 2014 Oct;8(4):469–74.
41. Gu X-H, Mao C-Y, Liang C, Wang H-M, Kern M. Does endodontic post space irrigation affect smear layer removal and bonding effectiveness? *Eur J Oral Sci.* 2009 Oct;117(5):597–603.
42. Guidotti R, Merigo E, Fornaini C, Rocca J-P, Medioni E, Vescovi P. Er: YAG 2,940-nm laser fiber in endodontic treatment: a help in removing smear layer. *Lasers Med Sci.* 2014 Jan;29(1):69–75
43. Guivarc'h M, Ordioni U, Ahmed HMA, Cohen S, Catherine J-H, Bukiet F. Sodium Hypochlorite Accident: A Systematic Review. *Journal of endodontics* 2017 Jan;43:16–24
44. Guo X, Miao H, Li L, Zhang S, Zhou D, Lu Y, et al. Efficacy of four different irrigation techniques combined with 60 °C 3% sodium hypochlorite and 17% EDTA in smear layer removal. *BMC Oral Health.* 2014 Sep 8;14:114.
45. Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Br Dent J.* 2014 Mar;216(6):299–303.
46. Haapasalo M, Shen Y, Qian W, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Dent Clin North Am.* 2010 Apr;54(2):291–312.
47. Haznedaroğlu F. Efficacy of various concentrations of citric acid at different pH values for smear layer removal. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003 Sep;96(3):340–4.

48. Hebling J, Pashley DH, Tjäderhane L, Tay FR. Chlorhexidine arrests subclinical degradation of dentin hybrid layers in vivo. *J Dent Res*. 2005 Aug;84(8):741–6.
49. Hülsmann M, Rummelin C, Schäfers F. Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: a comparative SEM investigation. *J Endod*. 1997 May;23(5):301–6.
50. Ishizuka T, Kataoka H, Yoshioka T, Suda H, Iwasaki N, Takahashi H, et al. Effect of NaClO treatment on bonding to root canal dentin using a new evaluation method. *Dent Mater J*. 2001 Mar;20(1):24–33.
51. Ivoclar Vivadent, Wissenschaftliche Dokumentation von SpeedCEM Plus (Inhalt: Dr. Erik Braziulis, Ausgabe: April 2016)
https://www.ivoclarvivadent.de/medias/sys_master/celum-connect2-assets/celum-connect2-assets/h3d/hca/10112215482398/1speedcem-pluswissdok-de-2016-04-14.pdf (Zugriff: 21.02.2021)
52. Kandaswamy D, Venkateshbabu N. Root canal irrigants. *J Conserv Dent*. 2010 Oct;13(4):256–64.
53. Khoroushi M, Kachuei M. Pull-out bond strength of a self-adhesive resin cement to NaOCl-treated root dentin: effect of antioxidizing agents. *Restor Dent Endod*. 2014 May;39(2):95–103.
54. Koch ATA, Binus SM, Holzschuh B, Petschelt A, Powers JM, Berthold C. Restoration of endodontically treated teeth with major hard tissue loss - influence of post surface design on pull-out bond strength of fiber-reinforced composite posts. *Dent Traumatol*. 2014 Aug;30(4):270–9.
55. Kontakiotis EG, Tsatsoulis IN, Filippatos CG, Agrafioti A. A quantitative and diametral analysis of human dentinal tubules at pulp chamber ceiling and floor under scanning electron microscopy. *Aust Endod J*. 2015 Apr;41(1):29–34.
56. Korkut E, Torlak E, Gezgin O, Özer H, Şener Y. Antibacterial and Smear Layer Removal Efficacy of Er: YAG Laser Irradiation by Pho-

ton-Induced Photoacoustic Streaming in Primary Molar Root Canals: A Preliminary Study. *Photomed Laser Surg* 2018 Sep;36(9):480–86

57. Leitune VCB, Portella FF, Bohn PV, Collares FM, Samuel SMW. Influence of chlorhexidine application on longitudinal adhesive bond strength in deciduous teeth. *Braz Oral Res*. 2011 Oct;25(5):388–92.
58. Liu Y, Tjäderhane L, Breschi L, Mazzoni A, Li N, Mao J, et al. Limitations in bonding to dentin and experimental strategies to prevent bond degradation. *J Dent Res*. 2011 Aug;90(8):953–68.
59. Lührs A-K, Pongprueksa P, De Munck J, Geurtsen W, Van Meerbeek B. Curing mode affects bond strength of adhesively luted composite CAD/CAM restorations to dentin. *Dent Mater*. 2014 Mar;30(3):281–91.
60. Machado-Silveiro LF, González-López S, González-Rodríguez MP. Decalcification of root canal dentine by citric acid, EDTA and sodium citrate. *Int Endod J*. 2004 Jun;37(6):365–9.
61. Malacarne J, Carvalho RM, de Goes MF, Svizero N, Pashley DH, Tay FR, et al. Water sorption/solubility of dental adhesive resins. *Dent Mater*. 2006 Oct;22(10):973–80.
62. Manimaran VS, Srinivasulu S, Rajesh Ebenezer A, Mahalaxmi S, Srinivasan N. Application of a proanthocyanidin agent to improve the bond strength of root dentin treated with sodium hypochlorite. *J Conserv Dent*. 2011 Jul;14(3):306–8.
63. Manning SA. Variations in root canal anatomy. *N Z Dent J*. 1991 Apr;87(388):52–6.
64. Martinho FC, Gomes BPFA. Quantification of endotoxins and culturable bacteria in root canal infection before and after chemomechanical preparation with 2.5% sodium hypochlorite. *J Endod*. 2008 Mar;34(3):268–72.
65. Maryam Zare Jahromi, Barekatin M, Ravanbod S, Ranjbarian P, Kousehlar S. Comparison of Endodontic Medicaments on Bond

Strength of Fiber Post to Root Dentin Using Resin Cement. *J Dent (Shiraz)*. 2017 Mar;18(1):56–60.

66. Mazzoni A, Mannello F, Tay FR, Tonti G a. M, Papa S, Mazzotti G, et al. Zymographic analysis and characterization of MMP-2 and -9 forms in human sound dentin. *J Dent Res*. 2007 May;86(5):436–40.
67. Mohammadi Z, Shalavi S. Antimicrobial activity of sodium hypochlorite in endodontics. *J Mass Dent Soc*. 2013;62(1):28–31.
68. Mohammadi Z, Shalavi S, Jafarzadeh H. Ethylenediaminetetraacetic acid in endodontics. *Eur J Dent*. 2013 Sep;7(Suppl 1):S135-142.
69. Montagner AF, Sarkis-Onofre R, Pereira-Cenci T, Cenci MS. MMP Inhibitors on Dentin Stability: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res*. 2014 Aug;93(8):733–43.
70. Montagner AF, Skupien JA, Borges MF, Krejci I, Bortolotto T, Susin AH. Effect of sodium hypochlorite as dentinal pretreatment on bonding strength of adhesive systems. *Indian J Dent Res*. 2015 Aug;26(4):416–20.
71. Montero-Miralles P, Torres-Lagares D, Segura-Egea J-J, Serrera-Figallo M-Á, Gutierrez-Perez J-L, Castillo-Dali G. Comparative study of debris and smear layer removal with EDTA and Er,Cr:YSGG laser. *J Clin Exp Dent*. 2018 Jan 1;10(1):e598-e602
72. Ozdemir HO, Buzoglu HD, Calt S, Cehreli ZC, Varol E, Temel A. Chemical and ultramorphologic effects of ethylenediaminetetraacetic acid and sodium hypochlorite in young and old root canal dentin. *J Endod*. 2012 Feb;38(2):204–8.
73. Pashley DH, Carvalho RM, Sano H, Nakajima M, Yoshiyama M, Shono Y, et al. The microtensile bond test: a review. *J Adhes Dent*. 1999;1(4):299–309.
74. Pashley DH, Ciucchi B, Sano H, Horner JA. Permeability of dentin to adhesive agents. *Quintessence Int*. 1993 Sep;24(9):618–31.

75. Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM. Adhesion testing of dentin bonding agents: a review. *Dent Mater.* 1995 Mar;11(2):117–25.
76. Peerzada F, Yiu CKY, Hiraishi N, Tay FR, King NM. Effect of surface preparation on bond strength of resin luting cements to dentin. *Oper Dent.* 2010 Dec;35(6):624–33.
77. Perdigão J, Eiriksson S, Rosa BT, Lopes M, Gomes G. Effect of calcium removal on dentin bond strengths. *Quintessence Int.* 2001 Feb;32(2):142–6.
78. Pereira RD, Valdívia ADCM, Bicalho AA, Franco SD, Tantbirojn D, Versluis A, et al. Effect of Photoactivation Timing on the Mechanical Properties of Resin Cements and Bond Strength of Fiberglass Post to Root Dentin. *Oper Dent.* 2015 Oct;40(5):E206-221.
79. Perez F, Rouqueyrol-Pourcel N. Effect of a low-concentration EDTA solution on root canal walls: a scanning electron microscopic study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2005 Mar;99(3):383–7.
80. Pérez-Heredia M, Ferrer-Luque CM, González-Rodríguez MP, Martín-Peinado FJ, González-López S. Decalcifying effect of 15% EDTA, 15% citric acid, 5% phosphoric acid and 2.5% sodium hypochlorite on root canal dentine. *Int Endod J.* 2008 May;41(5):418–23.
81. Petschelt A. [Drying of root canals]. *Dtsch Zahnarztl Z.* 1990 Apr;45(4):222–6.
82. Priyank H, Pandey V, Bagul A, Majety KK, Verma P, Choudhury BK. Evaluation of 4% Sodium Hypochlorite in eliminating *Enterococcus faecalis* from the Root Canal when Used with Three Irrigation Methods: An in vitro Study. *J Contemp Dent Pract.* 2017 Mar 1;18(3):214–7.
83. Proença JP, Polido M, Osorio E, Erhardt MCG, Aguilera FS, García-Godoy F, et al. Dentin regional bond strength of self-etch and total-etch adhesive systems. *Dent Mater.* 2007 Dec;23(12):1542–8.

84. Ramos MB, Pegoraro TA, Pegoraro LF, Carvalho RM. Effects of curing protocol and storage time on the micro-hardness of resin cements used to lute fiber-reinforced resin posts. *J Appl Oral Sci.* 2012 Oct;20(5):556–62.
85. Rasimick BJ, Wan J, Musikant BL, Deutsch AS. A review of failure modes in teeth restored with adhesively luted endodontic dowels. *J Prosthodont.* 2010 Dec;19(8):639–46.
86. Reda B, Hollemeyer K, Trautmann S, Hannig M, Volmer DA. Determination of chlorhexidine retention in different oral sites using matrix-assisted laser desorption/ionization-time of flight mass spectrometry. *Arch Oral Biol* 2020 Feb;110:104623
87. Rohr N, Fischer J. Effect of aging and curing mode on the compressive and indirect tensile strength of resin composite cements. *Head Face Med.* 2017 Nov 21;13(1):22.
88. Sabatini C. Effect of a chlorhexidine-containing adhesive on dentin bond strength stability. *Oper Dent.* 2013 Dec;38(6):609–17.
89. Saber S-EDM, El-Askary FS. The outcome of immediate or delayed application of a single-step self-etch adhesive to coronal dentin following the application of different endodontic irrigants. *Eur J Dent.* 2009 Apr;3(2):83–9.
90. Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho R, et al. Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength--evaluation of a micro-tensile bond test. *Dent Mater.* 1994 Jul;10(4):236–40.
91. Santana FR, Pereira JC, Pereira CA, Fernandes Neto AJ, Soares CJ. Influence of method and period of storage on the microtensile bond strength of indirect composite resin restorations to dentine. *Braz Oral Res.* 2008 Dec;22(4):352–7.
92. Santana FR, Soares CJ, Silva JA, Alencar AHG, Renovato SR, Lopes LG, et al. Effect of Instrumentation Techniques, Irrigant Solutions and Artificial accelerated Aging on Fiberglass Post Bond Strength to Intraradicular Dentin. *J Contemp Dent Pract.* 2015 01;16(7):523–30.

93. Scelza MFZ, Teixeira AM, Scelza P. Decalcifying effect of EDTA-T, 10% citric acid, and 17% EDTA on root canal dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003 Feb;95(2):234–6.
94. Scherrer SS, Cesar PF, Swain MV. Direct comparison of the bond strength results of the different test methods: a critical literature review. *Dent Mater.* 2010 Feb;26(2):e78-93.
95. Seidberg BH, Schilder H. An evaluation of EDTA in endodontics. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1974 Apr;37(4):609–20.
96. Serafino C, Gallina G, Cumbo E, Ferrari M. Surface debris of canal walls after post space preparation in endodontically treated teeth: a scanning electron microscopic study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2004 Mar;97(3):381–7.
97. Short JA, Morgan LA, Baumgartner JC. A comparison of canal centering ability of four instrumentation techniques. *J Endod.* 1997 Aug;23(8):503-7.
98. Smatt Y, Browaeys H, Genay A, Raoul G, Ferri J. Iatrogenic pneumomediastinum and facial emphysema after endodontic treatment. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2004 Apr;42(2):160–2.
99. Soares LES, Santo AM do E. Morphological and chemical comparative analysis of the human and bovine dentin-adhesive layer. *Microsc Microanal.* 2015 Feb;21(1):204–13.
100. Sulkala M, Larmas M, Sorsa T, Salo T, Tjäderhane L. The localization of matrix metalloproteinase-20 (MMP-20, enamelysin) in mature human teeth. *J Dent Res.* 2002 Sep;81(9):603–7.
101. Takeda FH, Harashima T, Kimura Y, Matsumoto K. A comparative study of the removal of smear layer by three endodontic irrigants and two types of laser. *Int Endod J.* 1999 Jan;32(1):32–9.
102. Taschner M, Nato F, Mazzoni A, Frankenberger R, Krämer N, Di Lenarda R, et al. Role of preliminary etching for one-step self-etch adhesives. *Eur J Oral Sci.* 2010 Oct;118(5):517–24.

103. Tezvergil-Mutluay A, Agee KA, Hoshika T, Uchiyama T, Tjäderhane L, Breschi L, et al. Inhibition of MMPs by alcohols. *Dent Mater*. 2011 Sep;27(9):926–33.
104. Thompson SA, Dummer PM. Shaping ability of Lightspeed rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 1. *J Endod*. 1997 Nov;23(11):698–702.
105. Toman M, Toksavul S, Tamaç E, Sarikanat M, Karagözoğlu I. Effect of chlorhexidine on bond strength between glass-fiber post and root canal dentine after six month of water storage. *Eur J Prosthodont Restor Dent*. 2014 Mar;22(1):29–34.
106. Tuncdemir AR, Yildirim C, Ozcan E, Polat S. The effect of a diode laser and traditional irrigants on the bond strength of self-adhesive cement. *J Adv Prosthodont*. 2013 Nov;5(4):457–63.
107. Turk T, Kaval ME, Şen BH. Evaluation of the smear layer removal and erosive capacity of EDTA, boric acid, citric acid and desy clean solutions: an in vitro study. *BMC Oral Health*. 2015 Sep 3;15:104.
108. Turssi CP, Messias DF, Corona SM, Serra MC. Viability of using enamel and dentin from bovine origin as a substitute for human counterparts in an intraoral erosion model. *Braz Dent J*. 2010;21(4):332–6.
109. Van Meerbeek B, De Munck J, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Vijay P, et al. Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent*. 2003 Jun;28(3):215–35.
110. Violich DR, Chandler NP. The smear layer in endodontics - a review. *Int Endod J*. 2010 Jan;43(1):2–15.
111. Visse R, Nagase H. Matrix metalloproteinases and tissue inhibitors of metalloproteinases: structure, function, and biochemistry. *Circ Res*. 2003 May 2;92(8):827–39.
112. Weston CH, Ito S, Wadgaonkar B, Pashley DH. Effects of time and concentration of sodium ascorbate on reversal of NaOCl-induced reduction in bond strengths. *J Endod*. 2007 Jul;33(7):879–81.

113. Yamaguchi M, Yoshida K, Suzuki R, Nakamura H. Root canal irrigation with citric acid solution. *J Endod.* 1996 Jan;22(1):27–9.
114. Yesilsoy C, Whitaker E, Cleveland D, Phillips E, Trope M. Antimicrobial and toxic effects of established and potential root canal irrigants. *J Endod.* 1995 Oct;21(10):513–5.
115. Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod.* 2006 May;32(5):389–98.
116. Zhang S, Kern M. The role of host-derived dentinal matrix metalloproteinases in reducing dentin bonding of resin adhesives. *Int J Oral Sci.* 2009 Dec;1(4):163–76.
117. Zhang Y, Li Y, Yao K, Liang G. [Effect of concentration of chlorhexidine on bonding durability of dentine and resin]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* 2010 Feb;45(2):94–7.

11 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Begriffserklärung
Aqua dest.	Destilliertes Wasser
CHX	Chlorhexidindigluconat
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
ER:YAG	Erbium: Yttrium-Aluminium-Granat
ESE	European Society of Endodontology
et.al.	Und andere
evtl.	eventuell
ISO	International Organisation for Standardization
LPS	Lipopolysaccharide
Max	Maximum
MDP	10-Methacryloyloxydecyl dihydrogenphosphat
Min	Minimum
min	Minute
ml	Mililiter
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
MMPs	Matrix-Metalloproteinasen
MPa	Megapascal
MW	Mittelwert
N	Newton
n	Probenzahl
NaOCl	Natriumhypochlorit
N/cm	Newton/Zentimeter
pH	pondus Hydrogenii
u.a.	unter anderem
U/Min	Umdrehungen/Minute
#	Größe
%	Prozent
z.B.	zum Beispiel

12 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

12.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einteilung der experimentellen Gruppen	24
Tabelle 2:	Versuchseinstellungen für die <i>Zwick-1120</i> Prüfmaschine	28
Tabelle 3:	Deskriptive Auswertung der Scherfestigkeit (MPa) von <i>SpeedCEM Plus</i> für die einzelnen Spülflüssigkeiten	30
Tabelle 4:	Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Spülflüssigkeit (Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney-Test).....	32
Tabelle 5:	Prozentuale Verteilung der verschiedenen Frakturmodi in den experimentellen Gruppen	36

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>SpeedCEM Plus</i> in der Doppelkartuschenapplikationsspritze ...	20
Abbildung 2: Fließdiagramm des Versuchsaufbaus	21
Abbildung 3: Röntgenaufnahme eines Versuchszahns vor der Dekapitierung	22
Abbildung 4: Röntgenaufnahme eines Versuchszahns mit eingepasstem Spreader	23
Abbildung 5: Eingespannter Probezahn in der Zwick-Universaltestmaschine	26
Abbildung 6: Situation nach Extrusion des Spreaders aus einem Probezahn nach Rückkehr in die Ausgangsposition	27
Abbildung 7: Boxplot-Diagramm der Scherfestigkeitswerte von <i>SpeedCEM Plus</i> in Abhängigkeit von der Spülflüssigkeit.....	31
Abbildung 8: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout- Analyse mit einem adhäsiven Versagen am Stift	33
Abbildung 9: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout-Analyse mit einem kohäsiven Versagen am Stift	34
Abbildung 10: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout-Analyse mit einem adhäsiven Versagen am Dentin	34
Abbildung 11: Exemplarisches Beispiel eines Spreaders nach der Pullout-Analyse mit einem gemischten Frakturmodus	35

13 Materialliste

Artikel	Hersteller
Natriumacid-Lösung 0,001 %	Wissenschaftliches Labor der Abteilung für Zahnerhaltung der Phillips-Universität Marburg
Destilliertes Wasser	Wissenschaftliches Labor der Abteilung für Zahnerhaltung der Phillips-Universität Marburg
Zitronensäure 40 %	Wissenschaftliches Labor der Abteilung für Zahnerhaltung der Phillips-Universität Marburg
EDTA-Lösung 16 %	Wissenschaftliches Labor der Abteilung für Zahnerhaltung der Phillips-Universität Marburg
Natriumhypochlorit 3%	Wissenschaftliches Labor der Abteilung für Zahnerhaltung der Phillips-Universität Marburg
Ethanol 70 %	Wissenschaftliches Labor der Abteilung für Zahnerhaltung der Phillips-Universität Marburg
CHX 2 %	Wissenschaftliches Labor der Abteilung für Zahnerhaltung der Phillips-Universität Marburg
Zwick-1120 Universalprüfmaschine	ZwickRoell, Ulm, Deutschland
Papierspitzen	Pluradent AG&Co KG, Offenbach, Deutschland
Spülkanüle	Transcojet, Neumünster, Deutschland
Einmalspritze	Omnifix, B.Braun, Melsungen, Deutschland
Scaler	Hu-Friedy, Leimen, Deutschland
Rotes Winkelstück	KaVo, Bieberach, Deutschland
Diamantbohrer LOT 618021	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland
Diamanttrennscheibe/ 22mm	Scheu, Iserlohn, Deutschland
<i>VDW Endo IT control</i>	VDW GmbH, München, Deutschland
<i>SpeedCEM Plus</i>	Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Jagst, Deutschland
<i>BioRace (Niti-Rotary-System)</i>	FKG Dentaire, SA, Schweiz
<i>F360 Nickel-Titan-Aufbereitungssystem</i>	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland
Lentulo	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland
Edelstahlspreader ID10003499	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland

14 Rohdaten

Gruppe	Probe	Spüllösung	Frakturmodus
1	2	Aqua dest	G
1	3	Aqua dest	AS
1	4	Aqua dest	G
1	6	Aqua dest	G
1	7	Aqua dest	G
1	8	Aqua dest	AS
1	9	Aqua dest	AS
1	10	Aqua dest	G
1	11	Aqua dest	G
1	12	Aqua dest	G
2	14	NaOCl	G
2	15	NaOCl	G
2	16	NaOCl	G
2	17	NaOCl	G
2	18	NaOCl	G
2	19	NaOCl	G
2	21	NaOCl	G
2	23	NaOCl	G
2	24	NaOCl	AS
2	25	NaOCl	G
3	26	EDTA	G
3	27	EDTA	G
3	28	EDTA	AD
3	33	EDTA	AD
3	34	EDTA	G
3	35	EDTA	G
3	36	EDTA	G
3	37	EDTA	G
3	38	EDTA	G
3	39	EDTA	G

Gruppe	Probe	Spüllösung	Frakturmodus
4	40	Zitronensäure	G
4	42	Zitronensäure	G
4	43	Zitronensäure	G
4	44	Zitronensäure	G
4	45	Zitronensäure	G
4	46	Zitronensäure	G
4	47	Zitronensäure	G
4	51	Zitronensäure	G
4	52	Zitronensäure	G
4	55	Zitronensäure	G
5	56	Alkohol	K
5	58	Alkohol	G
5	59	Alkohol	G
5	60	Alkohol	G
5	61	Alkohol	G
5	62	Alkohol	G
5	63	Alkohol	G
5	64	Alkohol	AD
5	65	Alkohol	G
5	66	Alkohol	G
6	67	CHX	G
6	68	CHX	G
6	70	CHX	AD
6	71	CHX	G
6	72	CHX	G
6	73	CHX	G
6	74	CHX	G
6	77	CHX	AS
6	78	CHX	G
6	80	CHX	AS

15 Verzeichnis der akademischen Lehrer

In der Vorklinik waren meine akademischen Lehrer in Leipzig die Damen und Herren Professoren und Dozenten:

Brylla, Donath, Eilers, Gebhardt, Hirsemann, Jackstat, Löffler, Poeggel, Riha, Raßler, Zimmermann

In der Klinik waren meine akademischen Lehrer in Marburg die Damen und Herren Professoren und Dozenten:

Arweiler, Braun, Frankenberger, Gloerfeld, Himpel, Jablonski-Momeni, Korbmacher-Steiner, Lotzmann, Mittag, Neff, Nonnenmacher, Pieper, Roggendorf, Teymoortash

16 Danksagung

Herrn Prof. Dr. Roland Frankenberger danke ich herzlich für die Möglichkeit diese Dissertation an der Zahnklinik der Philips-Universität Marburg durchführen zu können.

Herrn Priv.-Doz. Dr. Matthias Roggendorf danke ich herzlich für die Überlassung des Themas der Dissertation. Des Weiteren danke ich ihm besonders für die Unterstützung und Hilfe während der gesamten Zeit.

Der Universität Köln und Herrn Dr. Franz-Josef Faber danke ich für die Möglichkeit der Nutzung der Universaltestmaschine.

18 Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel „Analyse der Extrusionskraft mittels *SpeedCEM Plus* selbstadhäsiv intraradikulär inserierter Metallstifte nach Irrigation der Stiftkanäle mit verschiedenen endodontischen Spüllösungen“ in der Abteilung für Zahnerhaltungskunde unter Leitung von Prof. Dr. Roland Frankenberger mit Unterstützung von Priv.-Doz. Dr. Matthias Roggendorf ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe. Ich habe bisher an keinem in- oder ausländischen Medizinischen Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Ich versichere, dass ich sämtliche wörtlichen oder sinngemäßen Übernahmen und Zitate kenntlich gemacht habe.

Mit dem Einsatz von Software zur Erkennung von Plagiaten bin ich einverstanden.

Ort, Datum, Unterschrift Doktorandin/Doktorand

Die Hinweise zur Erkennung von Plagiaten habe ich zur Kenntnis genommen.

Ort, Datum, Unterschrift Referentin/Referent
