

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR ZAHNERHALTUNG UND PARODONTOLOGIE
PROF. DR. W. BUCHALLA
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

In vitro Untersuchung der Randedichtigkeit postendodontischer Kompositrestaurationen zu
Schmelz und Dentin in Abhängigkeit von der Kavitätenvorbehandlung

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Silvio Bopp

2022

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR ZAHNERHALTUNG UND PARODONTOLOGIE
PROF. DR. W. BUCHALLA
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

In vitro Untersuchung der Randdichtigkeit postendodontischer Kompositrestaurationen zu
Schmelz und Dentin in Abhängigkeit von der Kavitätenvorbehandlung

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Silvio Bopp

2022

Dekan:	Prof. Dr. Dirk Helwig
1. Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. Matthias Widbiller
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Carola Kolbeck
Tag der mündlichen Prüfung:	16.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1 Epidemiologie	5
1.2 Parameter für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung	5
1.2.1 Aufbereitung des Wurzelkanalsystems	5
1.2.2 Spüllösungen in der Endodontie.....	6
1.2.3 Qualität der Wurzelkanalfüllung und Abfülltechnik	7
1.3 Entfernung von Sealerresten.....	7
1.4 Koronale Restauration	7
1.4.1 Frakturgefahr in Abhängigkeit von der koronalen Restauration	8
1.5 Bakterielle Rekontamination endodontisch behandelter Zähne	8
1.6 Komposit als Restaurationsmaterial	9
1.7 Simulationsverfahren.....	11
1.8 Penetrationstests	11
1.9 Ziel/Hypothese	11
2. Material und Methoden	12
2.1 Untersuchungsgut	12
2.2 Probenpräparation/Aufbaufüllung	12
2.3 Endodontische Behandlung	13
2.4 Verteilung auf Untersuchungsgruppen.....	14
2.5 Trepanationsverschluss	14
2.6 Radiologische Dokumentation	15
2.7 Verteilung auf Gruppen.....	16
2.8 Silbernitrat-Färbung	16
2.9 Mikrotom-Säge.....	17
2.10 Analyse/Messung	18
2.11 Rasterelektronenmikroskopische Beispielbilder	20
3. Ergebnisse	21
3.1 Gesamtpenetration.....	21
3.2 Vergleich der vestibulären und oralen Penetration	22
3.3 Vergleich der Penetration im Schmelz und Dentin	24
3.4 Rasterelektronenmikroskopie	26
3.5 Details der statistischen Auswertung.....	27

4. Diskussion	30
4.1 Methodik	30
4.1.1 Herstellung der Probekörper.....	30
4.1.2 Versuchsgruppen	30
4.1.3 Thermomechanische Wechselbelastung.....	31
4.1.4 Marginale Penetration	32
4.1.5 Einfluss von TCML.....	33
4.1.6 Einfluss der Vorbehandlung	34
5. Zusammenfassung	36
6. Schlussfolgerung und Ausblick.....	37
7. Literatur	38
8. Danksagungen	
9. Lebenslauf	

1. Einleitung

1.1 Epidemiologie

Die Zahnerhaltung mittels endodontischer Behandlung ist von großer Bedeutung für die konservierende Zahnheilkunde. Dies zeigt unter anderem eine Untersuchung von Weiger, Hitzler *et al.* um endodontischen Behandlungsbedarf einer deutschen Population. Von 323 untersuchten Patienten hatten 182 mindestens einen Zahn mit notwendiger oder bereits erfolgter endodontischer Behandlung (1). Die Autoren eines systematischen Reviews zeigten, dass die Prävalenz von Zähnen mit nicht-chirurgischer endodontischer Behandlung bei 10% lag (2). Schulte, Pieper *et al.* untersuchten das Vorkommen und die Qualität von Wurzelkanalfüllungen in einer deutschen Population und analysierten dabei Orthopantomogramme von 1983 und 1992. Sie stellten fest, dass sich die Prävalenz endodontisch behandelter Zähne in diesem Jahrzehnt von 0,5 (1983) auf 0,8 (1992) pro Person signifikant erhöhte (3). Für den Erfolg einer endodontischen Therapie sind verschiedene Einflussparameter beschrieben (4).

1.2 Parameter für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung

Finales Ziel einer Wurzelkanalbehandlung sind die möglichst vollständige Eliminierung von Mikroorganismen im Wurzelkanalsystem und die anschließende dichte Wurzelkanalfüllung, die einen bakterien- und flüssigkeitsdichten Verschluss in Richtung des periapikalen Gewebes darstellt (4). Auch die bakteriendichte koronale Restauration, die gewährleistet, dass keine Verbindung zwischen der Mundhöhle und dem Wurzelkanalsystem besteht, stellt einen wichtigen Erfolgsparameter dar (5).

1.2.1 Aufbereitung des Wurzelkanalsystems

Eine Reduktion der Mikroorganismen erreicht man laut Hülsmann *et al.* unter anderem durch mechanische Präparation des Wurzelkanals, wodurch eine signifikante Senkung der Bakterienlast, jedoch keine komplette Bakterienfreiheit erreicht werden kann (6). Da das gesamte Kanallumen und auch die Dentintubuli durch Bakterien und deren Stoffwechselprodukte infiltriert werden können, führt ein größerer Aufbereitungsdurchmesser zu Entfernung von mehr kontaminiertem Dentin (7). Beim Vergleich der einfachen Handaufbereitung mit Stahlfeilen mit aufwendigeren Aufbereitungstechniken, zum Beispiel mittels rotierender Systeme, konnten Fleming *et al.* keinen signifikanten Einfluss auf die Überlebensrate endodontisch behandelter Zähne ermitteln (8). Stavileci *et al.* untersuchten die prozentual erreichte Kanaloberfläche 2. Oberer Prämolaren nach Instrumentierung mit dem

rotierenden System ProTaper und der Aufbereitung mittels Handfeilen. Bei der Auswertung im Micro-CT kamen sie zu dem Ergebnis, dass die ProTaper-Feilen zwar weniger unberührte Kanaloberflächen hinterließen, jedoch auch hier die Kanalwand nicht vollständig instrumentiert werden konnte (9). Außerdem stellten Stavileci *et al.* keine eindeutige Überlegenheit einer bestimmten Aufbereitungstechnik (Balanced-force, Step-back etc.) fest. Die Aufbereitungstechnik sollte viel mehr individuell für jedes Wurzelkanalsystem ausgewählt werden. So haben die Balanced-force-Technik oder die Verwendung von Nickel-Titan Feilen beispielsweise bei gekrümmten Kanälen Vorteile (6).

1.2.2 Spüllösungen in der Endodontie

Da bei der mechanischen Aufbereitung Teile des Wurzelkanalsystems nicht berührt werden, spielt die Verwendung von Spüllösungen zur Desinfektion für eine ausreichende Bakterienreduktion eine große Rolle (10). Hierbei bleibt zunächst festzuhalten, dass die Spülflüssigkeit erst bei einem ausreichend großen Aufbereitungsdurchmesser das gesamte System erreichen und somit wirken kann (11). Das Spülen während und nach der Aufbereitung des Wurzelkanalsystems wird als wesentlicher Aspekt für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung angesehen. Die Spüllösung reduziert die Zahl der Mikroorganismen, entfernt nekrotisches Gewebe, löst dieses auf und verbessert die Effektivität der verwendeten Feilen. Außerdem sorgt das Spülen dafür, dass der bei der Instrumentierung des Dentins entstandene Debris nicht apikal verbleibt (12). Natriumhypochlorit ist aktuell die effektivste desinfizierende Spüllösung in der Endodontie, denn sie ist die einzige Spüllösung, die fähig ist, die organische Matrix im Wurzelkanalsystem aufzulösen. Jedoch birgt die Verwendung von Natriumhypochlorit auch Gefahren, vor allem wenn Spülflüssigkeit über den Apex transportiert wird (13). In der Praxis ist die Kombination verschiedener Spüllösungen sinnvoll (12). Basmadjian-Charles *et al.* konnten in ihrer Arbeit keinen eindeutigen Einfluss der verwendeten Spüllösung auf die Langzeiterfolgsrate von endodontisch behandelten Zähnen nachweisen (14). Zu ähnlichem Ergebnis kamen Fedorowicz *et al.* in ihrem systematischen Review. Viele der untersuchten Studien zeigten, dass Spülung mit Natriumhypochlorid oder Chlorhexidin im Vergleich zu Spülung mit Kochsalzlösung das Bakterienvorkommen reduziert. Allerdings konnten die meisten Studien keine klinische Relevanz feststellen. Ebenso konnte keine eindeutige Überlegenheit einer bestimmten Spüllösung festgestellt werden (15, 16) Die Verwendung von Ultraschall- oder Schallaktivierung kann die Wirkung von Spüllösungen verbessern (17).

1.2.3 Qualität der Wurzelkanalfüllung und Abfülltechnik

Die Autoren verschiedener Arbeiten fanden heraus, dass überstopftes Füllmaterial, undichte Wurzelkanalfüllungen und zu kurz kompaktiertes Material zu signifikant schlechterem Erfolg führen (18, 19). Mit welcher Wurzelfülltechnik man zum besten Ergebnis kommt, ist in der Literatur umstritten (20). Zu den gängigsten Methoden bei der Obturation komplexer Kanalsysteme zählen die laterale Kompaktion von Guttapercha-Stiften in Kombination mit Sealer beziehungsweise thermoplastische Füllmethoden. Hierbei bleibt festzuhalten, dass das Abfüllen mit warmen, plastischen Materialien öfter zu überextendierten Wurzelkanalfüllungen führt (22), aber Seitenkanäle besser erreicht werden. Ansonsten sind die Langzeit-Prognosen, Dichtigkeit und die Häufigkeit des Auftretens von postoperativen Sensibilitäten als ähnlich einzustufen (22). Schilder *et al.* stellten fest, dass jede Technik zu gewissen Undichtigkeiten führen kann, aber auch jede Technik bei korrekter Ausführung gute Ergebnisse ermöglicht. Mehr Einigkeit herrscht darüber, dass Länge und Dichtigkeit einer Wurzelkanalfüllung maßgeblich für den Langzeiterfolg einer Wurzelkanalbehandlung und damit der Vermeidung von periapikalen Entzündungsvorgängen sind (4).

1.3 Entfernung von Sealerresten

Als letzter Schritt vor dem koronalen Verschluss eines wurzelkanalbehandelten Zahns sollte die Zugangskavität von Sealerresten gereinigt werden, da diese die koronale Dichtigkeit negativ beeinflussen- oder zu Verfärbungen des Zahns führen könnten (23). Devroey *et al.* untersuchten verschiedene Methoden, Sealerreste zu entfernen und kamen zu dem Ergebnis, dass hierfür eine in Ethanol getränkte Microbrush am besten geeignet ist (24).

1.4 Koronale Restauration

Nach Abschluss der Wurzelkanalfüllung schließt sich die koronale Restauration des Zahns an. Zahlreiche Studien beschreiben, dass die koronale Restauration einen entscheidenden Einfluss auf die Langlebigkeit endodontisch behandelter Zähne hat (25–31). Dabei ist die Häufigkeit des Auftretens einer periapikalen Entzündung bei den Zähnen am geringsten, die eine als gut bewertete Wurzelkanalfüllung und eine als gut bewertete koronale Restauration haben (25–28). Festzuhalten bleibt, dass die koronale Restauration ein entscheidender Parameter für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist (Toronto).

1.4.1 Frakturgefahr in Abhängigkeit von der koronalen Restauration

Die Frage nach der Art der postendodontischen Restauration ist eine zentrale Frage endodontischer Behandlungskonzepte (32). Das Ziel bei der Auswahl der postendodontischen Restauration ist das Vermeiden von Frakturen. Eine Studie von Fennis *et al.* zeigt die Prävalenz dieser Vorkommnisse. Bei einer holländischen Population errechneten die Autoren eine Inzidenz-Rate von 20,5 Fällen pro 1000 Patienten im Jahr für Höckerfrakturen. Molaren (79%) waren dabei öfter betroffen als Prämolaren (21%). Ausschlaggebend scheint auch die Anzahl der Zahnflächen zu sein, die wiederhergestellt werden mussten. Bei 77% der frakturierten Zähne nahm der Substanzverlust 3 oder mehr Flächen des Zahns ein. Fennis *et al.* zeigten auch, dass eine vorausgegangene Wurzelkanalbehandlung Höckerfrakturen begünstigt und häufig zu subgingivaler Frakturlokation führt. Die Schwächung des Zahnes durch die Instrumentierung und Erweiterung des Wurzelkanals ist eine Ursache für diese Frakturen (33). Allerdings spielt die Schwächung durch Substanzverlust z. B. aufgrund von Karies laut Reeh *et al.* hierbei die übergeordnete Rolle (34). Die Autoren zeigten, dass rein endodontische Maßnahmen einen Verlust von 5% gegenüber der Steifheit eines unbehandelten Zahns bedeuteten. Die Zähne wurden gesockelt und die Frakturfestigkeit in einer servo-hydraulischen Prüfmaschine (MTS 858) getestet. Dagegen verloren Zähne mit einer mod-Kavität 63% ihrer Frakturfestigkeit. Es schließt sich also die Frage an, mit welcher Versorgungsform die Überlebensrate endodontisch behandelter Zähne am höchsten ist (35). Suksaphar *et al.* zeigten, dass wurzelkanalbehandelte Zähne, die mit einer Krone versorgt wurden, eine höhere Überlebensrate hatten als Zähne, die lediglich mit einer Kompositfüllung versorgt waren (95,1% gegenüber 77%). Hauptursache für den Misserfolg waren Frakturen. Sobald jedoch der Substanzverlust auf ein bis zwei Flächen reduziert war und zwei Approximalkontakte vorhanden waren, kamen die Überlebensraten gegen Frakturen der mit Komposit versorgten Zähne denen mit einer Krone näher (88,5%). Dieses Resultat unterstützt ein systematischer Review von Suksaphar *et al.* Hier wurden Studien von 1980 bis 2016 analysiert und die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass bei Substanzverlust von höchstens 3 Flächen kein signifikanter Unterschied in der Überlebensrate endodontisch behandelter Zähne zwischen überkronen und mit direktem Komposit versorgten Zähnen bestand (36).

1.5 Bakterielle Rekontamination endodontisch behandelter Zähne

Ziel einer Wurzelkanalbehandlung ist es, sämtliche Bakterien und infiziertes Gewebe aus dem Wurzelkanalsystem zu entfernen, um so eine Abheilung des entzündeten periapikalen Gewebes

zu ermöglichen und um den Zahn schließlich durch den koronalen Aufbau in seiner Funktion wieder herzustellen (37). Es entstehen Grenzflächen mit potentieller Penetration von Bakterien und deren Stoffwechselprodukten zwischen Wurzelkanalfüllmaterial und Zahnhartsubstanz im radikulären Bereich und zwischen Aufbau und Zahnhartsubstanz im koronalen Bereich (34). Trotz der Optimierung von Materialien und Techniken kann eine Rekontamination nicht vollständig ausgeschlossen werden (38). So kann über einen undichten, dem oralen Milieu ausgesetzten koronalen Verschluss letztlich eine Reinfektion des periapikalen Gewebes stattfinden (38). Dies kann dazu führen, dass eine Wurzelkanalbehandlung revidiert, ein koronaler Verschluss erneuert oder im schlimmsten Falle der Zahn extrahiert werden muss. Olcay *et al.* evaluierten in ihrer Studie die Gründe für das Versagen wurzelkanalbehandelter Zähne. Kombiniert endodontisch-restaurative Ursachen, beispielsweise eine insuffiziente Wurzelkanalbehandlung und koronales Leakage, waren mit 43,9% die häufigste Ursache für eine Extraktion (39). Gelangen nach dem Verschluss eines endodontisch behandelten Zahnes erneut Bakterien ins Wurzelkanalsystem birgt das die Gefahr einer erneuten periradikulären Entzündung und damit einem therapeutischen Misserfolg (40).

1.6 Komposit als Restaurationsmaterial

Das Indikationsspektrum für Kompositrestaurationen hat sich durch die verbesserten physikalischen Eigenschaften und die Einführung moderner Adhäsivsysteme in den letzten Jahrzehnten stark erweitert (41). Den Grundstein dafür legte Michael Buonocore mit der Beobachtung, dass Komposit an säuregeätztem Schmelz deutlich besser haftet (42). Im Schmelz wird der Haftverbund zum Komposit über mikromechanische Retention erreicht. Schwieriger gestaltete sich die Haftung im Dentin. Durch eine Vorbehandlung zur Entfernung oder Modifikation der Schmierschicht und Penetration der organischen Materialien mit dem Ziel einer Dentin-Komposit-Diffusionszone konnten auch hier der Haftverbund verbessert werden (43). Allerdings bleibt der dauerhafte Haftverbund am Dentin im Vergleich zum Schmelz problematischer (44, 45). Aufgrund der Feuchtigkeit des Dentins penetriert das Adhäsiv nicht vollständig in die offenen Dentintubuli und die freigelegte Kollagenmatrix. Zudem kann die Feuchtigkeit im freigelegten Kollagennetzwerk nicht vollständig entfernt werden und erschwert die Interaktion mit hydrophoben Materialien. Hierdurch bleiben Teile der Kollagenmatrix ungeschützt, was in einer Aktivierung endogener Proteasen, beispielsweise Matrixmetalloproteinasen, resultiert. Dadurch werden Teile der organischen Matrix des demineralisierten Dentins zerstört. In der Folge kommt es zu Degradationen an der

Hybridschicht und zum Auftreten von Mikroleakage (46). Heutzutage basiert die Interaktion der Adhäsive mit den Zahnhartsubstanzen auf zwei verschiedenen Strategien, die Etch and Rinse (Two-Step) und Self-Etch (One-Step oder Two-Step) Strategie. Self-Etch Adhäsiven wird durch das Wegfallen eines separaten Ätz- und Konditionierungsvorgangs eine geringere Techniksensitivität und höhere Benutzerfreundlichkeit zugeschrieben. Außerdem sollen ob des schonenderen Ätzvorgangs weniger postoperative Hypersensibilitäten auftreten. (43, 44, 47)). Self-Etch Adhäsive werden nach der Anzahl der benötigten Schritte in One Step und Two Step Systeme eingeteilt. Two Step Systeme beinhalten die Benutzung eines hydrophilen Primers der durch seine sauren Monomere die Schritte ätzen und primen kombiniert. One Step Self- Etch- oder auch All-In-One Systeme beinhalten saure funktionelle Monomere, hydrophile und hydrophobe Monomere, Wasser und organische Lösungsmittel und kombinieren so die Schritte Ätzen, Primen und Bonden (47). Besondere Bedeutung für die Haftung an den Zahnhartsubstanzen wird hier den funktionellen, sauren Monomeren wie beispielsweise 10-methacryloyloxydecyl dihydrogenphosphat (10-MDP) zugeschrieben. Diese gehen chemische Verbindungen mit dem Hydroxylapatit ein. Durch diese echte chemische Verbindung wird die Anfälligkeit gegenüber Hydrolyse herabgesetzt und gleichzeitig die mikromechanische Verankerung gegen mechanischen Stress beibehalten (47). Durch diese beiden Mechanismen, mechanische Retention und chemische Bindung, wird die Langlebigkeit von Komposit Restaurationen verbessert (47). Der Haftverbund zwischen Zahnhartsubstanz und Restaurationsmaterialien kann zum Beispiel durch sogenannte Shear-Bond-Strength-Tests untersucht werden (48). Abgesehen von der Art des Füllungsmaterials oder des Adhäsivsystems gibt es noch weitere mögliche Einflussfaktoren auf den Haftverbund zwischen Füllung und Zahn. Beispielsweise haben Colombo *et al.* einen negativen Einfluss von Natriumhypochlorit auf die Haftkraft verschiedener One-Step-Self-etch-Adhäsive am Dentin festgestellt (49). Poggio *et al.* verglichen den Einfluss von verschiedenen Vorbehandlungen des Dentins auf den Haftverbund verschiedener Universaladhäsive am Dentin (50). Unter anderem wurde der Einfluss von Glycin, eingesetzt zur Reinigung der Kavität, in den meisten Fällen als nicht signifikant eingestuft. Nur in Kombination mit dem Adhäsiv G-Premio Bond erhöhte die Vorbehandlung mit Glycin die Haftkraft. Die Vorbehandlung mit 36%iger Phosphorsäure, EDTA oder Aluminiumoxid-Sandstrahlen ergab keinen signifikanten Einfluss auf die Haftkraft verschiedener Adhäsivsysteme zu Dentin (51). Dahingegen schwächte laut Zang *et al.* eine Kontamination mit AH-plus-Sealer diese Haftkraft (52). Bei der Reparatur von Nanopartikel-Kompositen wird Anstrahlen der Kunststoffoberfläche mit Aluminiumoxid zur Erhöhung der Haftkraft angewendet (53). Auch im Schmelz wird die Haftkraft von Komposit durch

vorheriges anstrahlen mit Aluminiumoxid erhöht (54). Neben der Frakturanfälligkeit unter mechanischer Belastung ist die Entstehung von Mikroleakage und letztlich Sekundärkaries die Hauptursache dafür, dass Kompositrestaurationen ersetzt werden müssen (55). Lokale Bereiche des Haftverlusts an den Grenzflächen zwischen Zahn und restaurativen Materialien können ursächlich sein für die Entstehung von Sekundärkaries. Hier können Bakterien und deren Stoffwechselprodukte eindringen und erneut zu kariösen Prozessen führen (55). In der Folge kann es zur Reinfektion eines wurzelkanalbehandelten Zahns kommen, was die Langzeit-Überlebensrate desselben negativ beeinflusst (56).

1.7 Simulationsverfahren

Für die Entstehung solcher Spalten können unter anderem Kaubelastung und Temperaturunterschiede in der Mundhöhle verantwortlich sein. Mit dem sog. Thermal cycling and mechanical loading (TCML) steht ein Verfahren zur Verfügung, um die Bedingungen in der Mundhöhle *in vitro* zu simulieren. Hierbei werden extrahierte Zähne sowohl einer okklusalen Belastung als auch Wasserbädern verschiedener Temperatur ausgesetzt. Eine Studie von Friedl *et al.* zeigte, dass TCML die Entstehung marginaler Spalten zwischen Restaurationsmaterialien (hier Komposit und Hybridionomer) und Zahnhartsubstanzen beeinflusst (57).

1.8 Penetrationstests

Um die Tiefe der Penetration an Grenzflächen evaluieren zu können, stehen Farbpenetrationstests zur Verfügung. Die Analyse der marginalen Penetration mittels Silbernitrat-Lösung ist eine verbreitete Methode, um die marginale Adaptation restaurativer Materialien zu testen (58–62).

1.9 Ziel/Hypothese

Ziel der vorliegenden *in-vitro*-Studie war es, die Randdichtigkeit zwischen postendodontischen Kompositrestaurationen und der Zahnhartsubstanz in Abhängigkeit von der Kavitätenvorbehandlung zu untersuchen. Die Null-Hypothese war, dass unterschiedliche Vorbehandlungen der endodontischen Zugangskavität vor dem postendodontischen Verschluss die marginale Penetration zwischen Schmelz, Dentin und postendodontischem Verschluss nicht signifikant beeinflussen.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgut

In der vorliegenden *in-vitro*-Untersuchung dienten 84 extrahierte, kariesfreie humane Molaren als Untersuchungsgut. Nach der Extraktion erfolgte die sofortige Lagerung in Chloramin T 0,1% (Merck KGaA, Darmstadt, Deutschland). Die Lagerungszeit betrug weniger als 6 Monate. Gewebereste wurden entfernt und die Zähne wurden nach Oberkiefer beziehungsweise Unterkiefer unterschieden. Die Verwendung anonymisierter humaner Zähne unter mündlicher Aufklärung jedes Patienten bei der Extraktion wurde von der Ethikkommission der Universität Regensburg genehmigt (Ref.:19-1327-101).

2.2 Probenpräparation/Aufbaufüllung

Die Zähne wurden trepaniert und das Pulpagewebe entfernt. Überhänge wurden abgetragen, um einen geradlinigen Zugang zum Wurzelkanalsystem zu gewährleisten. Anschließend wurde ausgehend von der Trepanationsöffnung die Kavität nach mesial und distal erweitert (diamantierter Bohrer, 802LG, Meisinger, Deutschland bei 40.000 rpm, Wasserkühlung 50ml/min). Approximale Kästen wurden bis knapp unter die Schmelz-Zement-Grenze präpariert und proximale Schmelzbereiche um 0,5mm angeschragt. Es entstand eine mod-Kavität, in der mittig die Trepanationsöffnung lag. Die Ausdehnung der proximalen Kästen betrug in oro-vestibulärer Richtung 4 mm.

Zunächst wurden das Pulpenkavum und die Kanäle mit einem Schaumstoffpellet abgedeckt, um Kontamination zu vermeiden. Dann wurde eine Toffelmire-Matrize (Kerr dental, Rastatt, Deutschland) gelegt und selektiv für 20 Sekunden der Zahnschmelz geätzt (Total etch, Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein). Als Adhäsivsystem diente ein Two-Step-Self-Etch Adhäsiv (Clearfill SE, Kuraray, Chiyoda, Japan). Mesial und distal wurden die Zähne mit Restaurationen (Filtek Supreme XTE, Farbe: C4D; 3M Espe, Saint-Paul, Minnesota, USA) im Sinne eines präendodontischen Aufbaus mit okklusalem Zugang versorgt. Es wurde in Inkrementen von 2mm geschichtet und jeweils 40 Sekunden lichtgehärtet (Satelec Mini LED, Aceton Group, Merignac Cedex, France; 1.250 mW/cm²). Der Arbeitsabstand (WD) betrug 5mm und zur Qualitätssicherung diente das System Cure right, mit dem die Polymerisationslampe hinsichtlich ihrer Leistung von über 1.000 mW/cm² nach jeweils 20 Zähnen überprüft wurde. Abschließend wurde die Trepanationsöffnung erneut dargestellt und finiert mittels eines Batt-Bohrers bei 20.000 rpm und Wasserkühlung.

2.3 Endodontische Behandlung

Nach Auffinden aller Kanäle wurden diese vorsichtig instrumentiert. Zunächst wurden die Kanäleingänge mit der SX-Feile (Dentsply Sirona, York, USA) koronal erweitert. Alle maschinellen Aufbereitungsschritte wurden nach Herstellerangaben durchgeführt (X-Smart Plus, Dentsply Sirona, York, USA; 300rpm, 2 Ncm). Mit ISO 06-20 Handfeilen (K-Feilen, Dentsply Sirona, York, USA) wurde der manuelle Gleitpfad präpariert. Die Kanalsuche sowie die Gleitpfadpräparation fanden unter Verwendung eines OP-Mikroskops (ProErgo, Zeiss GmbH, Oberkochen, Deutschland) statt. Anschließend wurde mit dem ProTaper Next System (Dentsply Sirona, York, USA) aufbereitet (63). Es wurde mit den Feilen X1 bis X4 jeweils 2mm über den Apex instrumentiert. Die Überinstrumentierung wurde durchgeführt, um einheitlich große Austrittsflächen der Kanäle am Übergang zum Pulpenkammerboden zu erhalten. Gespült wurde während der Aufbereitung mit 5 ml Natriumhypochloritlösung (2%, Speiko, Bielefeld, Deutschland) pro Kanal und Schallaktivierung (Eddy 30 s, 195.000 rpm). Insgesamt wurde bei jedem Zahn eine NaOCl-Einwirkzeit von 30 min eingehalten. Als Abschlusspülung wurden zunächst pro Kanal 5 ml 20%iger EDTA-Lösung (1 min Einwirkzeit, keine Schallaktivierung, AppliChem, Darmstadt, Deutschland) und abschließend erneut 5 ml Natriumhypochloritlösung (2%) pro Kanal unter Schallaktivierung (30s), verwendet.

Vor der thermoplastischen Obturation der Wurzelkanäle wurden die apikalen Kanalausgänge zunächst mit einem mikroinvasiven Diamantschleifer (MI 830 009 FG MICRO PREP DIAMANT, Busch Dental AG, Thun, Schweiz) erweitert und im apikalen Bereich mit Fuji II LC (GC Corporation, Tokyo, Japan) gefüllt. Somit wurde ein apikaler Stopp gegen den kondensiert werden kann, geschaffen. Das Back-Fill wurde mit erhitzter Guttapercha (Sybron Endo Elements free Guttapercha, Kerr, Schweiz; 200°C) durchgeführt. Die Kanalwände wurden mit AH Plus Sealer (Dentsply Sirona, York, USA) beschickt. Zum Beschicken der Wände wurden Papierspitzen (Coltene, Holding AG, Aichstätten, Schweiz) verwendet. Die Guttapercha wurde bis auf den Kanaleingang kompaktiert zur Entfernung von Überschüssen bis dorthin mittels eines Rosenbohrers (8.000 rpm) eingebnet.

Danach fand, mithilfe eines Endofrost-Pellets (Coltene Holding AG, Aichstätten, Schweiz), eine gezielte, einheitliche Kontamination aller Wände der endodontischen Zugangskavität mit 0,05 ml AH-Plus Sealer pro Kavität statt. Die Kavität wurde dann mit AH-Plus Sealer Cleaner

(Dentsply Sirona, York, USA) gereinigt und die endodontische Behandlung somit abgeschlossen.

2.4 Verteilung auf Untersuchungsgruppen

Die Zähne wurden auf sieben verschiedene Untersuchungsgruppen verteilt. Dabei wurde darauf geachtet, dass Unterkiefer- beziehungsweise Oberkiefermolaren möglichst gleichmäßig in jeder Gruppe vertreten waren. Es gab zwei Kontrollgruppen C0 und C1, sowie fünf weitere Versuchsgruppen T1-T5 (Abb. 1).

Gruppe C0 war die Kontrolle ohne Kontamination, bei der jegliche Kontamination durch Natriumhypochlorit, EDTA, Sealer und Sealer Cleaner vermieden wurde. Diese Zähne wurden lediglich koronal aufbereitet und mit NaCl-Lösung (0,9%) gespült. Vor dem Verschluss der Trepanationsöffnung wurde wie bei den präendodontischen Aufbauten selektiv Schmelz (20 s) geätzt und als Adhäsivsystem Clearfill SE verwendet.

Bei der zweiten Kontrollgruppe C1 und allen weiteren Gruppen wurde aufbereitet wie beschrieben. Bei C1, der Kontrolle ohne Adhäsiv, wurde dann vor Verschluss der Kavität lediglich selektiv Schmelz geätzt. Die Verwendung eines Adhäsivsystems blieb aus.

Die Testgruppen T1-T5 unterschieden sich lediglich in der Art ihrer Vorbehandlung. So wurden die Zähne der Gruppe T1 ohne weitere Vorbehandlung verschlossen. Bei Gruppe T2 wurden die Kavitäten mit Glycin (Clinpro, 25 µm, 1 bar, 10 Sek, Arbeitsabstand 20 mm, 3M, Saint Paula, USA) (7) angestrahlt. Auch Gruppe T3 wurde angestrahlt mit Aluminiumoxid (27µm, 1 bar, 10 Sek, Arbeitsabstand 20mm) (8). Die Kavitätenwände der Untersuchungsgruppe T4 wurden mechanisch gereinigt mittels eines Rosenbohrers bei 5.000 rpm. Zähne der Untersuchungsgruppe T5 wurden zunächst provisorisch mit Fuji II LC für 24 h verschlossen. Anschließend wurden die Kavitäten mit einem Rosenbohrer gereinigt.

2.5 Trepanationsverschluss

Nun wurden alle Trepanationsöffnungen verschlossen. Zunächst wurde selektiv der Zahnschmelz mittels Phosphorsäure geätzt (37%, 20 s). Dann wurde das Adhäsiv Clearfil SE (Kuraray, Chiyoda, Japan) außer bei Gruppe C1, nach Herstellerangaben aufgetragen. Anschließend wurde die Guttapercha an den Kanaleingängen mit Venus Baseline (Kulzer Mitsui Chemicals Group, Hanau, Deutschland) überdeckt und polymerisiert. Die okklusale Kavität wurde mit Filtek Supreme XTE (Farbe: WD; 3M Espe, Saint-Paul, Minnesota, USA)

verschlossen. Es wurden Inkremente von 2 mm appliziert und bei einem Arbeitsabstand von 5 mm je 20 Sekunden polymerisiert. Die Kompositfüllung wurde abschließend mit einem Arkansas-Stein und Komposit-Polierern (Busch Dental AG, Thun, Schweiz) ausgearbeitet.

2.6 Radiologische Dokumentation

Es folgte ein orthoradialer Zahnröntgenfilm, der der Beurteilung und Dokumentation von eventuell auftretenden Poolings, Blasen oder Unterschüssen diente. Ebenso konnte die Qualität der Wurzelkanalfüllung dokumentiert werden.

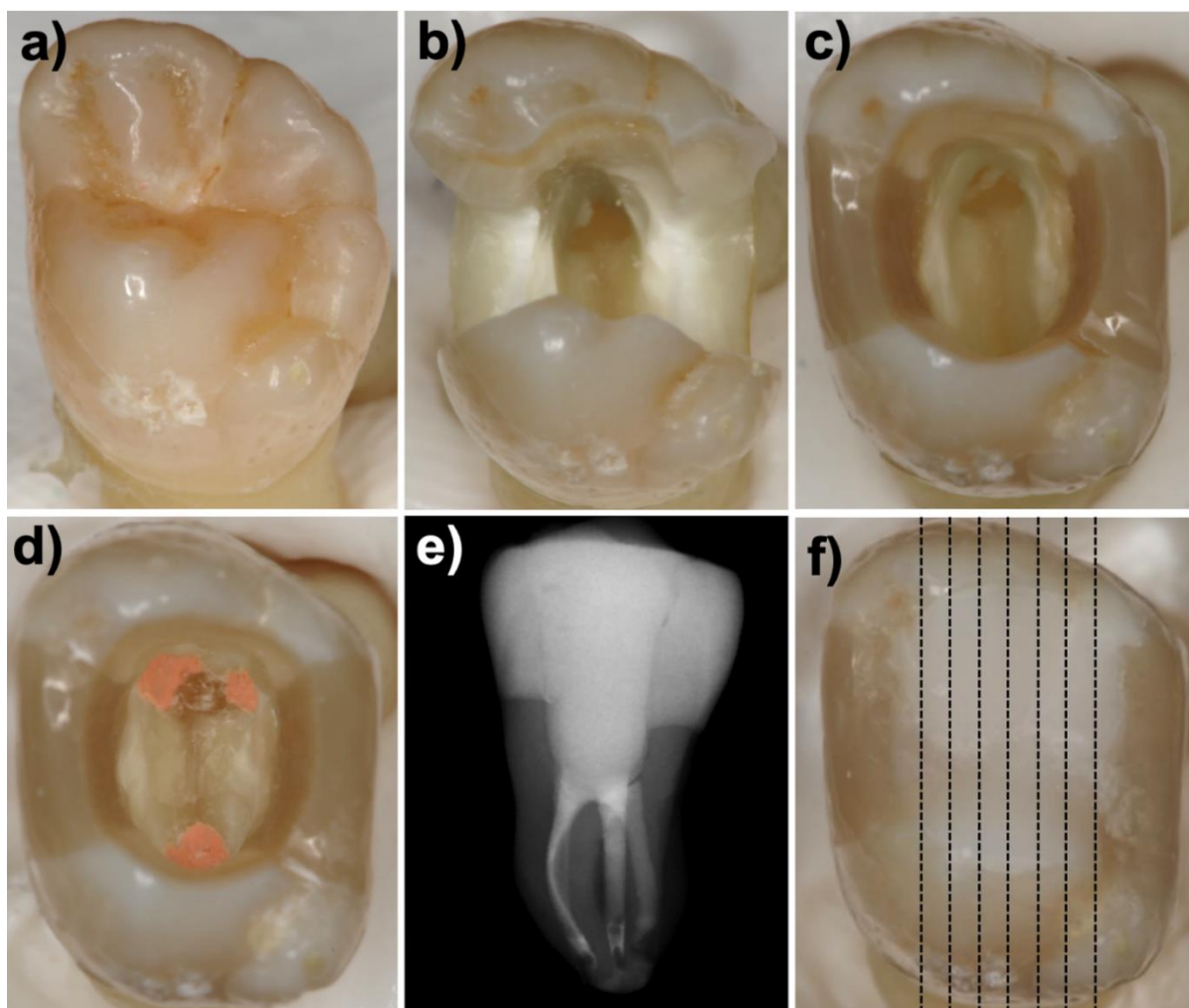


Abb. 1: a) Ausgangszustand b) Trepanation und mod-Kavität c) Präendodontischer Aufbau d) Obturation der Wurzelkanäle e) Röntgenkontrolle nach postendodontischem Verschluss f) Postendodontischer Verschluss und orovestibuläre Schnitttrichtung

2.7 Verteilung auf Gruppen

Jeweils die Hälfte der Zähne einer Gruppe wurde einer thermomechanischen Wechselbelastung (TCML) nach bewährtem Protokoll (57, 60) ausgesetzt. Die Zähne durchliefen 5.000 Zyklen, in denen sie je 30 Sekunden in 2 verschiedenen Wasserbädern mit 5 beziehungsweise 55 °C verweilten. Währenddessen fand eine zentrale okklusale Belastung statt (500,000 x 72,5 N, 1,6Hz). Die andere Hälfte der Zähne wurde für die Dauer des TCML in Aqua demin gelagert.

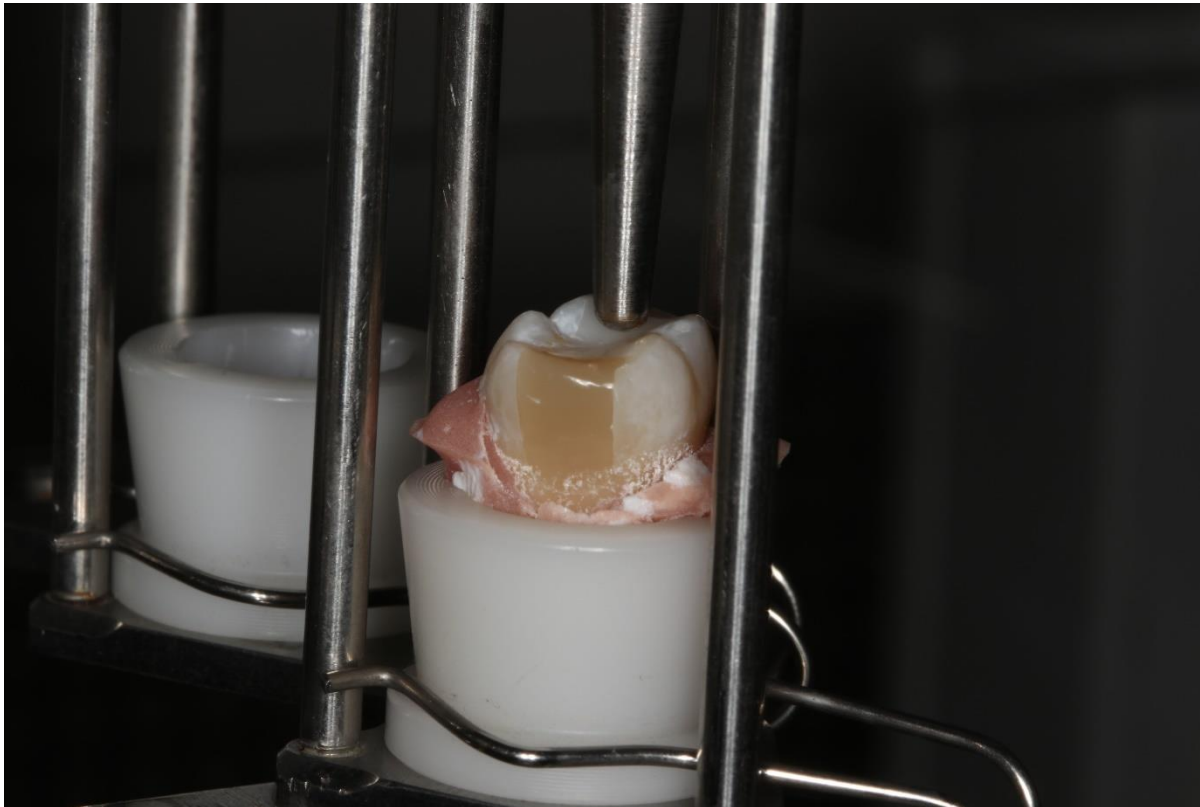


Abb. 2: Zahnposition während TCML

2.8 Silbernitrat-Färbung

Die Zähne wurden vor der Färbung gesockelt. Dazu wurden die Wurzeln in Kunststoff eingebettet (Paladur, Kulzer, Hanau, Deutschland). Zusätzlich wurden sämtliche Zahnoberflächen jeweils bis an die Füllungsänder heran mit Nagellack versiegelt (Abb. 4).



Abb. 3: Gesockelter Zahn mit Nagellackversiegelung (blau)

Anschließend wurden die Zähne für 120 min lichtisoliert in eine 50 Gew.-%ige Silbernitratlösung (S-6506: Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Deutschland) gegeben. Nach einer ausführlichen Spülung mit Aqua demin folgte eine Lagerung in einer Fotoentwicklerlösung für weitere sechs Stunden (Tetenal Ultrafin plus, Tetenal AG & Co. KG, Norderstedt, Deutschland) unter Fluoreszenz-Licht (Philips Master PL-S 840/2P, 11 W= 900 Lumen, Abstand= 10cm). Abschließend wurden die Zähne erneut gründlich abgespült und bis zur weiteren Verarbeitung in einer feuchten Kammer gelagert.

2.9 Anfertigung der Schnitte

Die Zähne wurden mit Kunststoff auf dem Halter befestigt (Paladur, Kulzer, Hanau, Deutschland) (Abb. 5). Die orale und vestibuläre Seite wurde vermerkt. Von jedem Zahn wurden eine Maximalzahl an Schnitten in oro-vestibulärer Richtung angefertigt (Leitz 1600, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland; 300 µm dickes Sägeblatt) (Abb. 6). In einer weiteren Arbeit werden die Zähne in mesio-distaler Richtung geschnitten, um den Verbund der postendodontischen Füllung zum Komposit zu untersuchen. Jeder Schnitt hatte eine Dicke von etwa 300 µm. Hierbei wurde auf mehrmaliges Schneiden der Bereiche ohne postendodontische Füllung verzichtet. Die Schnitte wurden in mit feuchtem Zellstoff ausgelegten Petrischalen aufbewahrt (Abb. 7).

Unmittelbar nach dem Schneiden wurden die Schnitte in immer gleichem Abstand (60mm) und Vergrößerung (6,3-fach) von vorne und von hinten fotografiert (MakroskopM420; Wild,

Heerbrugg, Axiocam 105 color, Zeiss, Deutschland), was zu einem Abschnitt zwischen den Einzelschnittbildern von 300 µm führte.

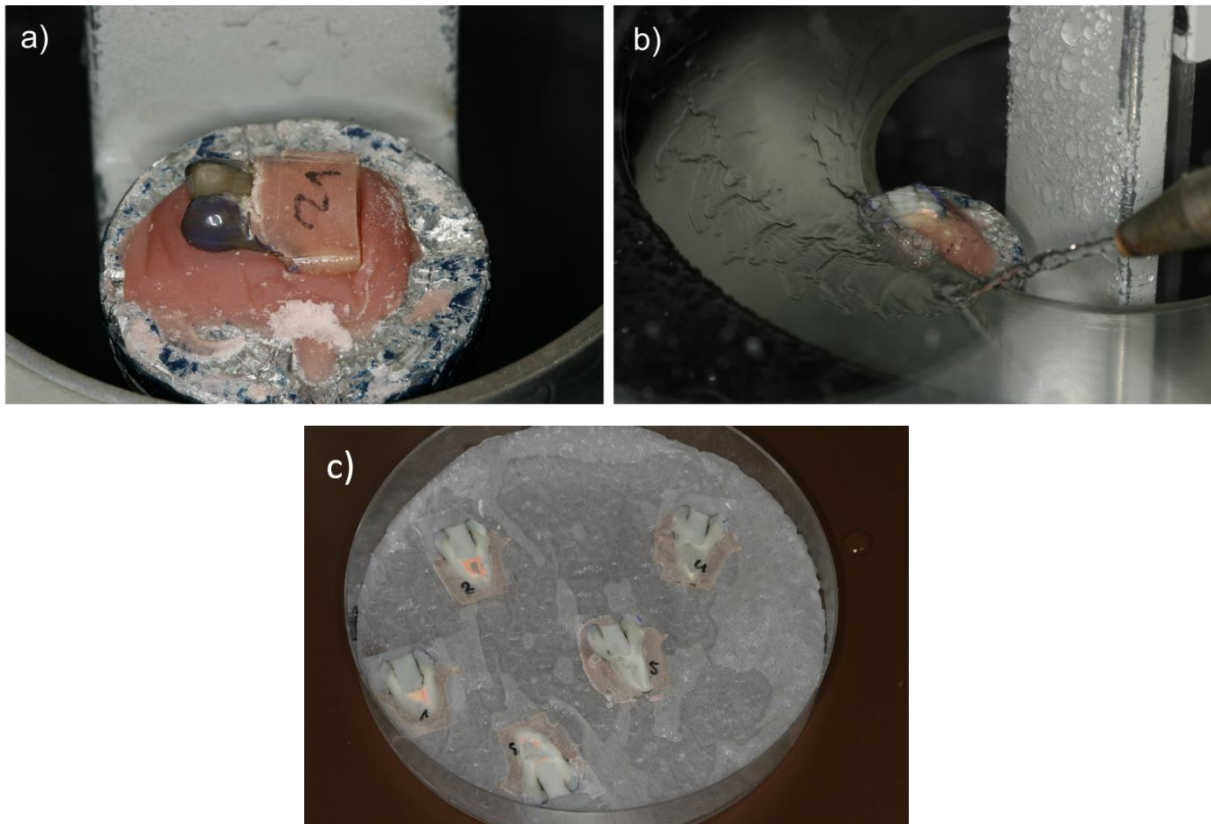


Abb. 4: a) auf Halter befestigter Zahn b) Zahn während des Schneidevorgangs c) Schnitte eines Zahns in einer Petrischale

2.10 Analyse und Vermessung

Die Penetrationstiefe der Silbernitratlösung wurde anhand der Fotos mit der Optimas 6.51 Software (Bioscan, USA) gemessen. Hierbei wurde der prozentuale Anteil eingefärbter Einzelstrecken bestimmt. Unterschieden wurden bei jedem Zahn verschiedene Grenzflächen. Zum einen gab es die Grenzflächen am Schmelz beziehungsweise Dentin. Es wurde unterschieden, ob es sich um die vestibuläre oder orale Fläche des Zahns handelte. Dazu wurden die Zähne vor dem Schneiden stets in gleicher Art eingebettet (Paladur, Kulzer, Hanau, Deutschland), geschnitten und beidseits fotografiert. So war immer die rechte Seite einer fotografierten Schnitt-Vorderseite die vestibuläre usw. Zum anderen wurden die Grenzfläche

zwischen Komposit und Guttapercha beziehungsweise zwischen Komposit und Pulpakammerboden gemessen (Abb. 8).

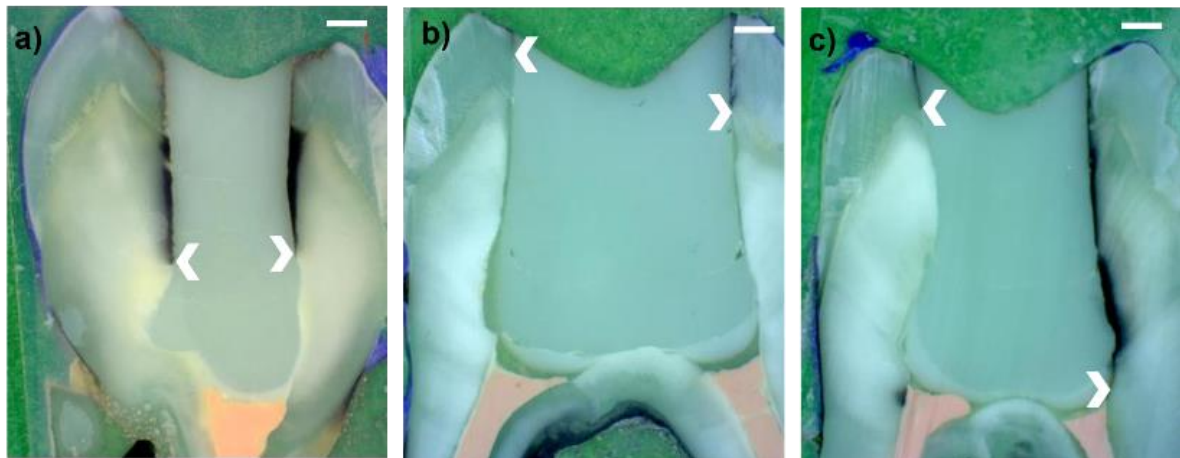


Abb. 5: Beispielbilder verschiedener Schnitte; weiße Pfeile: Ende der Penetration und damit der gemessenen Strecke; Maßstabsbalken: 1 mm; a) Die Penetration endet etwa in der Mitte der Grenze Dentin-Komposit. b) Die Penetration endet bereits im Schmelz. c) Die Penetration endet auf der einen Seite im Schmelz und auf der anderen Seite reicht die Penetration bis zum Ende der Grenze Dentin-Komposit.

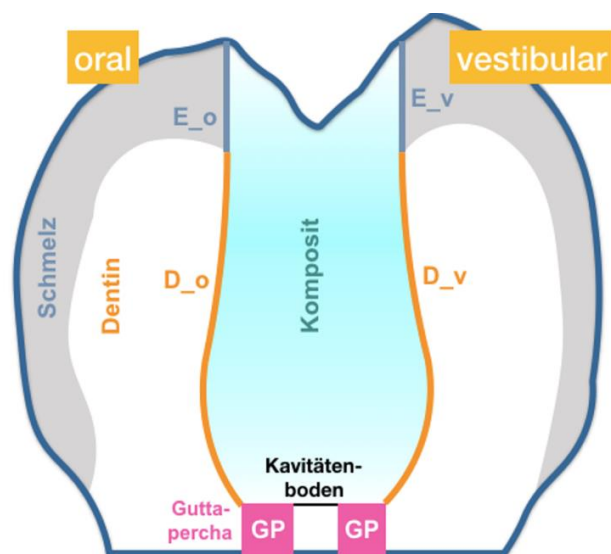


Abb. 6: Auswerteschema Farbpenetration in orovestibulärer Schnittrichtung. E-o: Grenzfläche oral Schmelz-Komposit; E-v: Grenzfläche vestibulär

Schmelz-Komposit; D-o: Grenzfläche oral Dentin-Komposit; D-v: Grenzfläche vestibulär Dentin-Komposit; GP: Grenzfläche Guttapercha-Komposit; Kavitätenboden: Grenzfläche Kavitätenboden-Komposit.

Für jeden Zahn wurde pro Strecke das Maximum an Farbpenetration (Prinzip Maximum) ermittelt. Die Daten wurden schließlich nicht-parametrisch ($\alpha = 0,05$) analysiert. Der Mann-Whitney-U-Test wurde zum paarweisen Vergleich zwischen den einzelnen Gruppen angewendet. Der Einfluss von TCML wurde mittels Error-Rates-Methode untersucht. SPSS Version 25.0 (SPSS, Inc, USA) diente als Auswertungssoftware.

2.11 Rasterelektronenmikroskopie

Je ein Zahn pro Versuchsgruppe wurde nach Durchlaufen der thermomechanischen Wechselbelastung im Rasterelektronenmikroskop dokumentiert und exemplarisch dargestellt (Niedrigvakuum 1,50 Torr, LFD+EDX-PLA, 4kV, spot 3, WD 10mm, ap 30 μ m).

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Penetrationstests nach Gruppen und Grenzflächen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die maximale Penetration aller Schnitte pro Zahn wurden als repräsentativer Wert verwendet. Pro Zahn wurden im Median 4 Schnitte angefertigt und da Vorder- und Rückseite fotografiert wurden entstanden also im Median (25-75% Percentile) 8 (7,25-10,0) Bilder. Die Analyse der Ergebnisse erfolgte durch non-parametrische Tests (Mann-Whitney U- Test) mit $\alpha=0,05$ als Signifikanzlevel und der Error-Rates Methode.

3.1 Gesamtpenetration

Ohne TCML zeigten alle Gruppen gegenüber der Kontrollgruppe C1 eine signifikant ($p < 0,05$) geringere Gesamtpenetration. Die Gesamtpenetration für die Gruppen C0 und T1-T5 betrug im Median zwischen 11,9 und 22,2 %. Bei Gruppe C1 kam es im Median zu einer Penetration von 52,9 %. Mit TCML waren keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Die Werte für die Gruppen C0, T1-T5 bewegten sich im Median zwischen 48,2 und 62,0 %. Für C1 betrug der Wert 55,9 %. TCML zeigte bei allen Versuchsgruppen außer C1 einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtpenetration (Abb. 7).

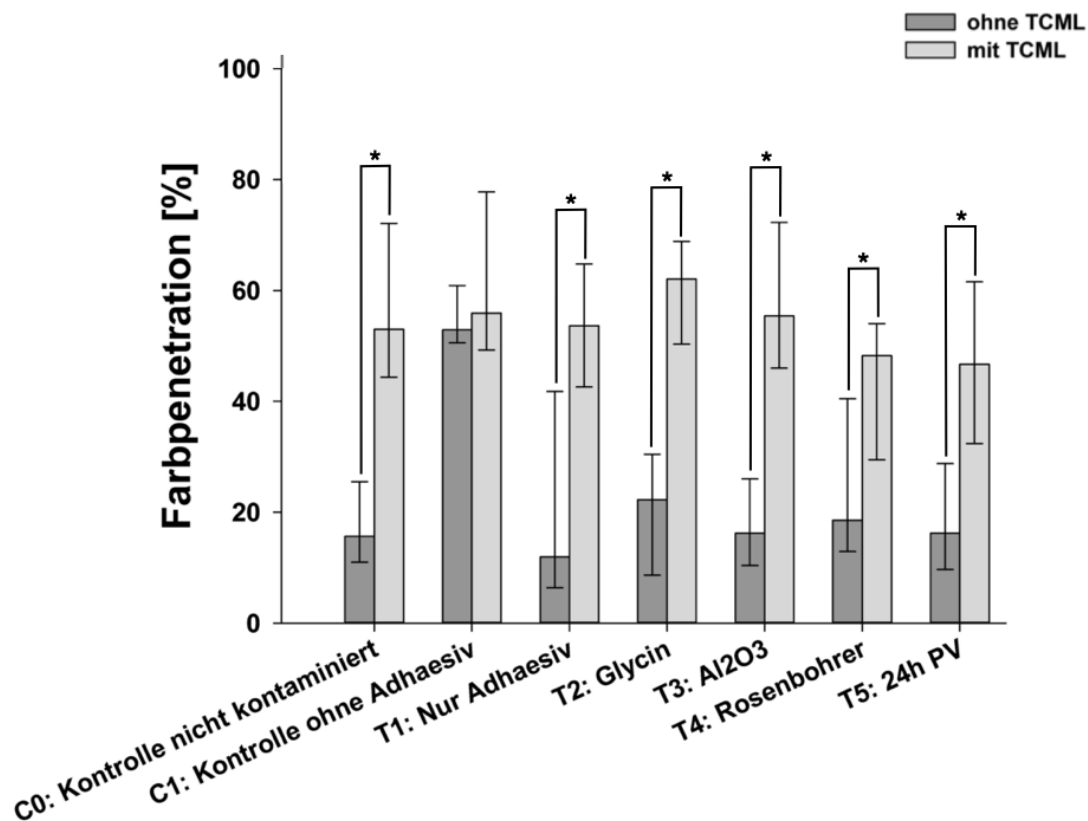


Abb. 7 Gesamtpenetration nach Versuchsgruppen in Prozent mit und ohne TCML im Median mit Perzentilen (25-75%); *=signifikante Unterschiede

3.2 Vergleich der vestibulären und oralen Penetration

Ohne TCML war bei keiner Gruppe ein signifikanter Unterschied im Hinblick auf die Farbpenetration zwischen der oralen und vestibulären Seite eines Zahnes erkennbar. Sowohl oral als auch vestibulär zeigen sich signifikant höhere Penetrationstiefen bei der Untersuchungsgruppe C1 im Vergleich zu allen anderen Gruppen. Vestibulär beträgt die Penetrationstiefe im Median 61,7 % und oral 65,2 % während bei allen anderen Gruppen Werte zwischen 11,3-28,5 % bzw. 13,6-26,2 % im Median auftraten (Abb 8).

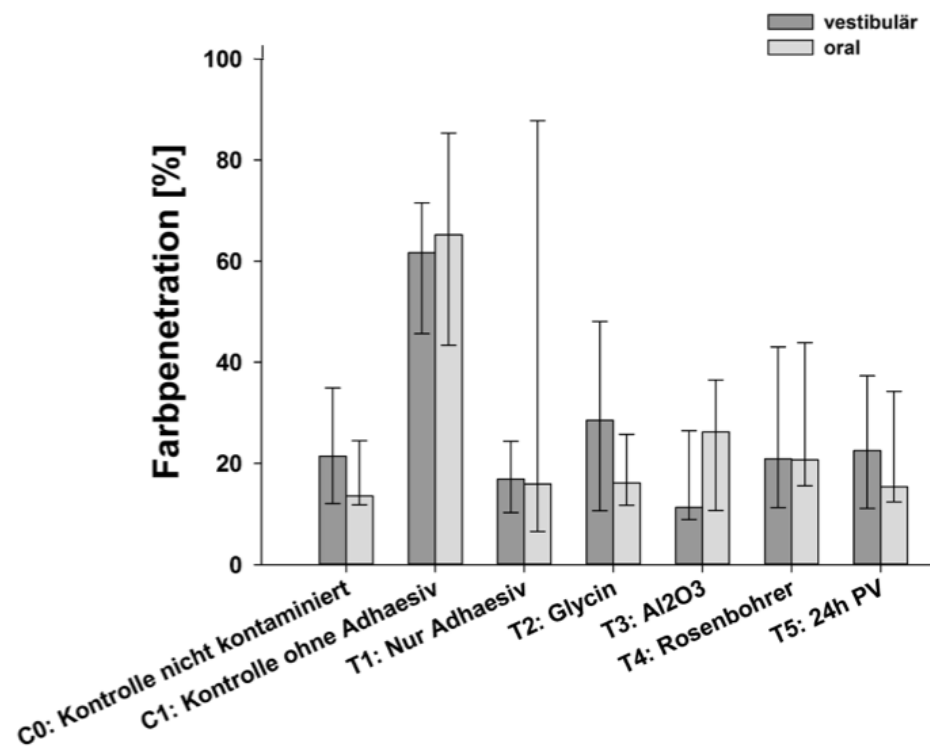


Abb. 8: Penetration vestibulär und oral in Prozent nach Versuchsgruppen ohne TCML. Im Median mit Perzentilen (25-75%)

Auch mit TCML gab es zwischen der vestibulären und der oralen Penetration keine signifikanten Unterschiede im paarweisen Vergleich der Gruppen untereinander. Die Mediane für die vestibuläre Seite lagen zwischen 47,1-97,0 %, die für die orale Seite zwischen 39,3-98,3 % (Abb. 9).

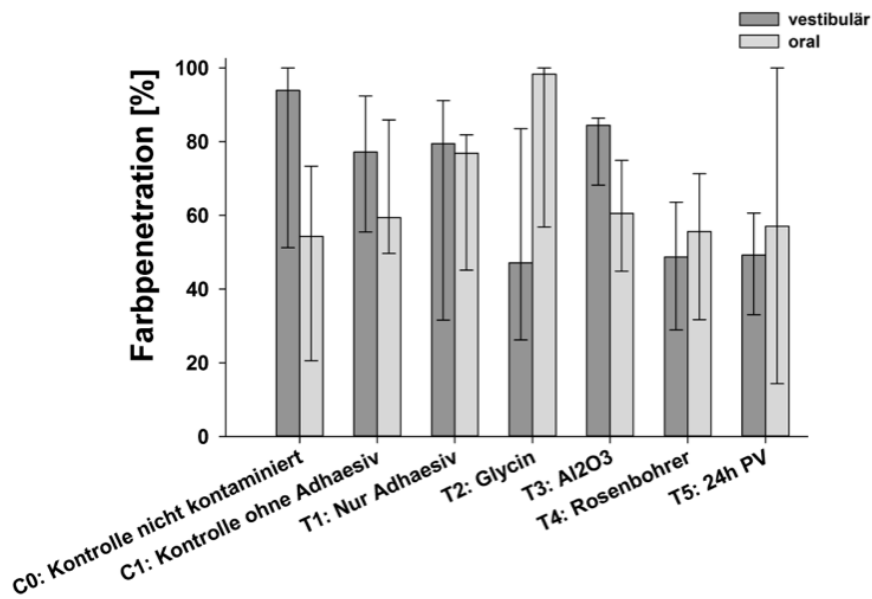


Abb.9: Penetration vestibulär und oral in Prozent nach Versuchsgruppen mit TCML. Im Median mit Perzentilen (25%-75%)

3.3 Vergleich der Penetration im Schmelz und Dentin

Lediglich die Kontrollgruppe C1 zeigt signifikant höhere Penetrationswerte im Schmelz und Dentin im Vergleich zu den restlichen Versuchsgruppen. Im Schmelz betrug die Penetration im Median 100 %, im Dentin 46,2 %. Die restlichen Gruppen zeigten im Median für den Schmelz zwischen 51,0 und 65,8 % und im Dentin zwischen 4,1 und 11,1 %. Ansonsten traten keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die Penetration am Schmelz beziehungsweise am Dentin zwischen den Gruppen auf (Abb. 10).

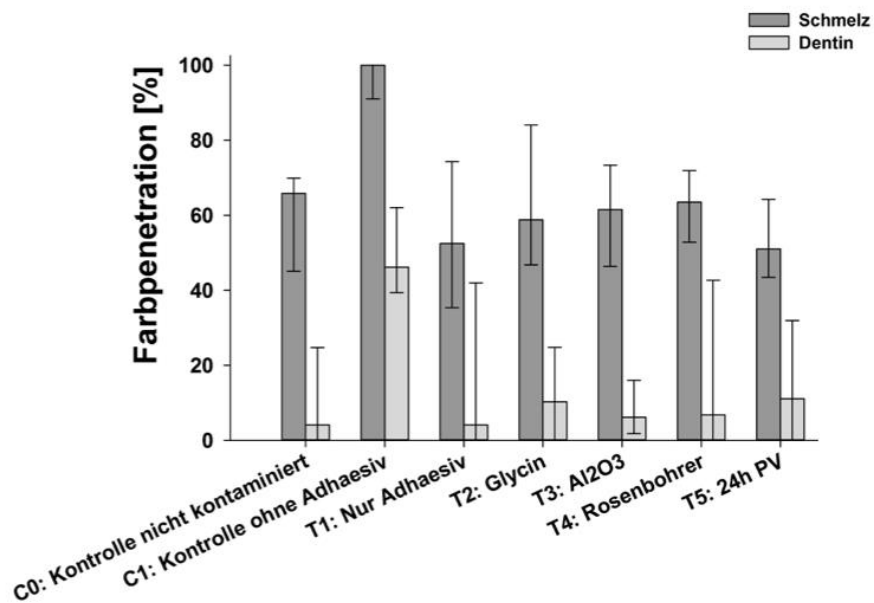


Abb. 10: Penetration an den Grenzen zum Schmelz und Dentin in Prozent nach Versuchsgruppen ohne TCML. Im Median mit Perzentilen (25%.75%)

Unter dem Einfluss von TCML gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen. Im Schmelz betrug die Farbpenetration außer bei den Gruppen C0 (94,0 %) und T5 (92,2 %) im Median 100 Prozent. Im Dentin bewegten sich die Werte zwischen 28,8-52,1 % (Abb. 11).

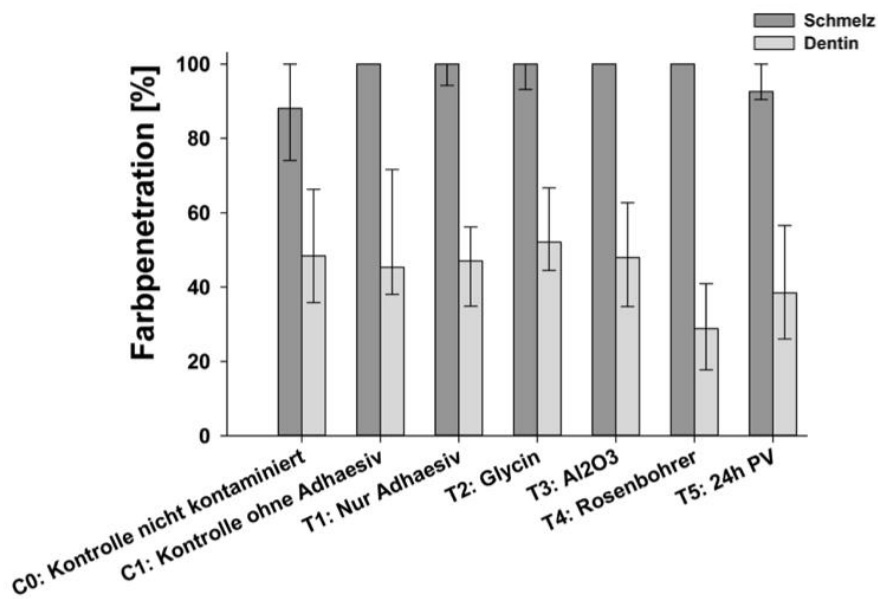


Abb. 11: Penetration an den Grenzen zum Schmelz und Dentin in Prozent nach Versuchsgruppen mit TCML. Im Median mit Perzentilen (25%-75%).

3.4 Rasterelektronenmikroskopie

Die Abbildung 12 zeigt exemplarisch die typische Grenzflächenmikromorphologie von koronal nach pulpal am Beispiel zweier verschiedener Gruppen. Bei Bild a), welches ein Ausschnitt aus dem koronalen Anteil des Zahns ist sieht man lediglich die Komposit Schicht. Die Adhäsivschicht ist hier wegen des Verblasens nicht so ausgeprägt wie in weiter apikal gelegenen Regionen des Zahns (b und c).

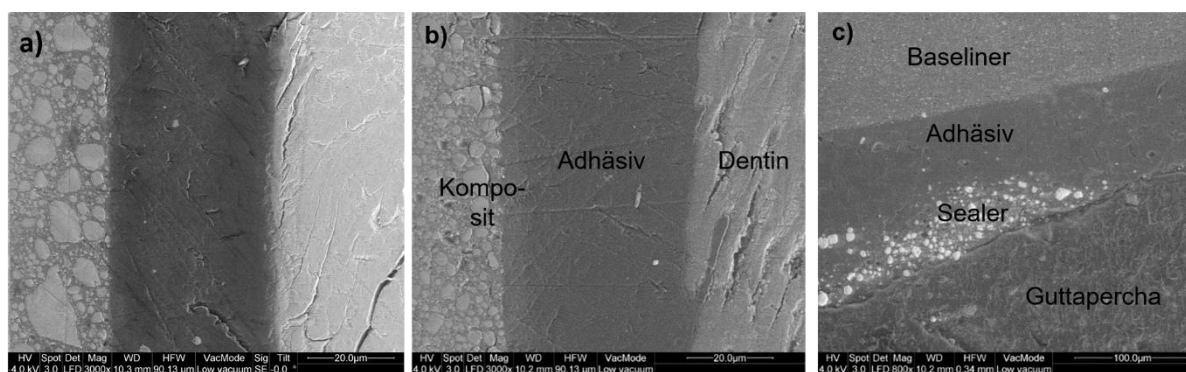


Abb. 12: Rasterelektronenmikroskopische Beispielbilder. a) Grenze Schmelz-Adhäsiv-Komposit (Gruppe T1). b) Grenze Dentin-Komposit mit deutlich erkennbarer Adhäsivschicht (Gruppe T2). c) Guttapercha, Sealer, Adhäsiv und Baseline (Gruppe T2)

3.5 Details der statistischen Auswertung

Tabelle 1: Farbpenetration in Prozent für alle Gruppen mit und ohne TCML. Gesamtpenetration, Penetration an den Grenzen zum Schmelz beziehungsweise zum Dentin/Guttapercha und Penetration an der vestibulären beziehungsweise oralen Seite eines Zahnes wurden evaluiert; Median (25%-75% Perzentile)

	TCML	C0	C1	T1	T2	T3	T4	T5
Gesamt-penetration	Ohne	15.7 (11-25.5)	52.9 (50.6-60.9)	11.9 (6.4-41.8)	22.2 (8.6-30.5)	16.2 (10.4-26)	18.6 (12.9-40.5)	16.2 (9.7-28.8)
	Mit	50.7 (44.2-72.1)	55.9 (49.3-77.8)	53.6 (42.6-64.8)	62 (50.3-68.9)	55.4 (46-72.3)	48.2 (29.4-54)	49.1 (32.2-64.6)
Schmelz	Ohne	65.8 (45.1-69.9)	100 (91-100)	52.4 (35.4-74.3)	58.8 (46.8-84.1)	61.5 (46.4-73.3)	63.5 (52.8-71.9)	51 (43.5-64.3)
	Mit	94 (76-100)	100 (100-100)	100 (94.3-100)	100 (93.1-100)	100 (100-100)	100 (100-100)	92.2 (87.1-100)
Dentin	Ohne	4.1 (0-24.7)	46.2 (39.3-62)	4.1 (0-42)	10.3 (0-24.8)	6.1 (1.8-16)	6.8 (0-42.7)	11.1 (0-31.9)
	Mit	44.6 (35.6-68)	45.3 (38-71.6)	47 (34.8-56.2)	52.1 (44.4-66.7)	47.9 (34.7-62.7)	28.8 (17.7-40.9)	38.5 (24.2-58.7)
Vestibulär	Ohne	21.4 (12.1-34.9)	61.7 (45.7-71.5)	16.9 (10.3-24.4)	28.5 (10.6-48.1)	11.3 (8.9-26.5)	20.9 (11.3-43.1)	22.5 (11.1-37.3)
	Mit	97 (46.2-100)	77.2 (55.5-92.4)	79.5 (31.6-91.2)	47.1 (26.2-83.5)	84.5 (68.2-86.4)	48.7 (28.9-63.6)	52.2 (31.6-68.2)

Oral	Ohne	13.6 (11.9-24.5)	65.2 (43.4-85.3)	15.9 (6.6-87.8)	16.2 (11.8-25.8)	26.2 (10.7-36.5)	20.7 (15.6-43.9)	15.4 (12.4-34.3)
	Mit	39.3 (20.3-72.6)	59.4 (49.6-85.9)	76.9 (45.1-81.9)	98.3 (56.9-100)	60.6 (44.9-74.9)	55.6 (31.7-71.3)	58 (13.3-100)

Für beinahe alle Gruppen und Grenzflächen ohne TCML außer C1 wurden signifikant geringere Penetrationstiefen gemessen als mit TCML. Lediglich an einzelnen Grenzen einiger Gruppen gab es nur schwach signifikante ($p=0.065$) beziehungsweise nicht signifikante (n.s.) Werte. Die Error-Rates-Methode (Anzahl der paarweisen Tests $k = 7$) zeigte einen signifikanten Einfluss von TCML auf die Penetrationstiefe an allen Grenzen (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Signifikanzwerte der paarweisen Tests, die den Einfluss von TCML auf die Untersuchungsgruppen an verschiedenen Grenzflächen zeigen.

Einfluss von TCML	C0	C1	T1	T2	T3	T4	T5
Gesamtpenetration	0.002	n.s..	0.015	0.002	0.002	0.041	0.009
Schmelz	0.009	n.s..	0.004	0.009	0.002	0.002	0.002
Dentin + Guttapercha	0.002	n.s.	0.041	0.002	0.002	n.s.	0.065*
Vestibulär	0.009	n.s.	0.002	n.s.	0.004	0.065*	0.026
Oral	0.015	n.s.	n.s.	0.002	0.009	0.065*	n.s..

Im paarweisen Vergleich aller Gruppen mit Versuchsgruppe C1 vor TCML bestehen signifikante Unterschiede. Nach TCML gibt es lediglich einen signifikanten Unterschied zwischen der Gruppe T2 und T4 (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Signifikanzwerte des paarweisen Vergleichs der Versuchsgruppen untereinander im Hinblick auf die Gesamtpenetration mit und ohne TCM

Ohne TCML mit TCML	C0	C1	T1	T2	T3	T4	T5
C0		0.002	N.S.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
C1	n.s.		0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

T1	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
T2	n.s.	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.
T3	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.
T4	n.s.	n.s.	n.s.	0.041	n.s.		n.s.
T5	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

4. Diskussion

4.1 Methodik

4.1.1 Herstellung der Probekörper

Das Ziel von *in-vitro*-Studien ist es, die Situation *in vivo* möglichst realitätsnah zu simulieren (64). Deshalb dienen häufig extrahierte humane Zähne als Untersuchungsgut. Werden für die Studie gesunde, kariesfreie Zähne benötigt eignen sich insbesondere humane Molaren, da diese unter Einschluss der Weisheitszähne in ausreichender Anzahl vorhanden sind. Deshalb dienen diese in vielen Arbeiten als Untersuchungsgut (64–66). Es wurden zwei approximale Kästen präpariert, um typische Defekte bei endodontisch zu behandelnden Zähnen zu simulieren (67, 68). Die chemomechanische Reinigung und die verwendeten Agenzien und Solventien wurden nach klinisch-etabliertem Protokoll angewendet und wirken sich auf das Dentin und den Haftverbund zu diesem aus. So setzt die Verwendung von Natriumhypochlorid beispielsweise die Biegefestigkeit und das Elastizitätsmodul des ausgesetzten Dentins herab (69). Desweiteren entsteht durch Entfernung der organischen Matrix eine weniger empfindliche Klebefläche und das Entstehen einer Hybridschicht kann durch Auflösung der Kollagenfibrillen gestört sein (70). Durch die Anfertigung und Auswertung möglichst vieler 300 µm entfernter Schnittbilder und der Verwendung des Prinzip Maximums bei der Auswertung nähert man sich immer dem schwächsten Punkt der Restauration an.

4.1.2 Versuchsgruppen

Es wurden zwei Kontrollgruppen gewählt. Eine Kontrolle, bei der kein Adhäsiv aufgetragen wurde, um eine ungehinderte Penetration zu erreichen. Bei der zweiten Kontrollgruppe, der Kontrolle ohne Kontamination, wurde die Trepanationsöffnung nicht durch Spüllösungen oder Sealer kontaminiert, die den Haftverbund beziehungsweise die Randdichtigkeit beeinflussen könnten (23, 70, 71). Die beiden Gruppen, bei denen die Trepanationsöffnungen mikroabrasiv angestrahlt wurden, wurden gewählt, da sowohl Aluminiumoxid als auch Glycin eine Auswirkung auf den Haftverbund dentaler Komposite haben können (50, 51). Eine *in vitro* Arbeit aus dem Bereich der Kieferorthopädie zeigte, dass das Sandstrahlen des Schmelzes mit Glycin oder Aluminiumoxid oberer Inzisiven keine Verbesserung der Haftkraft von Brackets hat, wenn der Schmelz anschließend geätzt wurde (72). Im Dentin soll die Haftkraft von Komposit Disks, die mittels RelyX unicem befestigt wurden, laut Santos, M J M C, Bapoo *et al.* signifikant höher sein wenn die Dentinoberfläche vorher mit Aluminiumoxid angestrahlt wurde (73). Das vorherige Anstrahlen des Dentins mit Glycin soll in einer Arbeit keine (74), in

einer anderen eine negative Auswirkung auf die Haftkraft von Komposit am Dentin haben (74, 75). In jedem Fall verändert die Verwendung von Sandstrahlen aus Glycin oder Aluminiumoxid die angestrahlte Oberfläche (76). Das Anrauen von Oberflächen durch einen Rosenbohrer kann ebenfalls einen Effekt auf die Oberflächen der Zahnhartsubstanzen haben. In der Theorie wird die Oberfläche durch Anrauen vergrößert und die Oberflächenenergie dadurch gesteigert. Laut einer Meta-Analyse von Heintze *et al.*, die die Retention von zervikalen Kompositrestaurationen untersuchte, wird die Retention der Restauration verbessert wenn Schmelz und Dentin vorher angeraut beziehungsweise präpariert, also mit diamantierten Bohrern beschliffen wurden (77). Der definitive adhäsive Verschluss unter Verwendung eines Adhäsivs (Gruppen C0, T1-T5), unter Umständen auch nach provisorischem Verschluss während der Abbindezeit der Wurzelfüllmaterialien (Gruppe T5), wurden lege artis durchgeführt. Ziel der verzögerten Entfernung von Sealerresten in Gruppe T5 war die gezieltere Entfernung nach der vollständigen Abbindezeit des Sealers. Nachteil dieses Vorgehens ist die Notwendigkeit zweier Termine.

4.1.3 Thermomechanische Wechselbelastung

In der Mundhöhle sind die Zähne verschiedenen Belastungen ausgesetzt. Zum einem einer mechanischen Kaubelastung, zum anderen einer Belastung durch wechselnde Temperaturen, unter anderem beim Einnehmen warmer beziehungsweise kalter Speisen und Getränke. Es ist bekannt, dass derartiger thermaler und mechanischer Stress Auswirkungen auf die marginale Integrität verschiedener Restaurationsmaterialien hat (78–80). Es wurde ein Simulator verwendet, bei dem die Zähne einem punktuellen Druck von 72,5 N und abwechselnd zwei Wasserbädern mit Temperaturen von 5 °C beziehungsweise 55°C ausgesetzt waren. Vorbild hierfür ist das von Krejci *et al.* beschriebene Verfahren (81). Reich *et al.* untersuchten 1990 die Randqualität von Keramik- und Kompositinlays und erreichten mit dieser Methode *in vitro* ähnliche Ergebnisse wie *in vivo* und empfanden diese Simulation als geeignet für die Untersuchung adhäsiver Füllungsmaterialien (82). In einer Studie zur selektiven Kariesexkavation führte die verwendete thermomechanische Wechselbelastung zu signifikant höherer Farbpenetration in allen Untersuchungsgruppen (83). *In vitro* versucht man sich den oralen Bedingungen so weit wie möglich anzunähern. Anatomische Gegebenheiten wie interindividuelle Unterschiede von Kaukräften, Nachbarzahnkontakt und Variationen der Interkuspitation können *in vitro* nicht vollständig abgebildet werden (84).

4.1.4 Marginale Penetration

Die marginale Adaptation ist ein wichtiges Kriterium für die Langlebigkeit von Kompositrestaurationen. Entstehen kleine Spalten zwischen Restaurationsmaterial und Zahnhartsubstanz, ist Mikroleakage von Flüssigkeiten und kleinen Molekülen die Folge. Dies kann Plaqueretention, bakterielle Besiedlung der Restaurationsgrenzen und schließlich Sekundärkaries sowie Hypersensibilitäten zur Folge haben (55). Bei wurzelkanalbehandelten Zähnen kann dasselbe Phänomen zur Reinfektion des Wurzelkanalsystems führen. So kann eine periapikale Entzündung entstehen oder eine bestehende Entzündung nicht abheilen, was weiteren Therapiebedarf dieses Zahns nach sich ziehen kann. Koronales gilt als eine der Hauptursachen für den Misserfolg einer endodontischen Behandlung (85). Die Untersuchung der marginalen Integrität restaurativer Materialien und deren Verbesserung ist deshalb Gegenstand vieler Forschungsarbeiten (86–88). Viele dieser Studien evaluieren dabei den Einfluss verschiedener Materialien, Präparations- und Restaurationsparameter. Inwieweit die Vorbehandlung der Oberflächen einer Eingangskavität die marginale Adaptation des Verschlusses beeinflusst, sollte die vorliegende Arbeit untersuchen. Zur Untersuchung der Randdichtigkeit dentaler Restaurationsmaterialien eignen sich Farbpenetrationstests. In dieser Arbeit diente hierzu, wie in vielen Arbeiten zuvor, eine 50 %ige Silbernitratlösung (23, 58, 59, 61, 62, 79). Die penetrierte Strecke kann anschließend gemessen werden. In dieser Arbeit wurden die gemessenen Strecken prozentual in Bezug auf die Gesamtstrecke angegeben. Um Verfälschungen durch Ausbleichen oder zu langer Diffusionszeit vorzubeugen, wurden die gefärbten Zähne nach spätestens 24 Stunden geschnitten und die Schnitte sofort fotografiert und digital gespeichert. Bei der Interpretation der Farbpenetrationstests muss jedoch die geringe Partikelgröße der Farbstoffe beachtet werden (89). So muss das Vorhandensein einer Farbpenetration nicht mit klinischen Befunden wie Sekundärkaries, Hypersensibilitäten, Retentionsverlust oder wie hier mit einer Reinfektion eines Zahnes korrelieren (90). Da es bei vitalen Zähnen durch den Flüssigkeitsstrom in und aus den Dentintubuli zur Entstehung zusätzlicher Spalten kommen kann (91) eignen sich zur Durchführung von Farbpenetrationstests besonders endodontisch vorbehandelte Zähne, da der ursächliche Druckgradient nur bei vitalen Zähnen vorhanden ist. (92). Neben den Farbpenetrationstests existieren noch weitere Verfahren um die Randdichtigkeit von dentalen Restaurationsmaterialien zu untersuchen. So zum Beispiel die konfokale Laserscanningmikroskopie (CLSM). Hier wird die Oberfläche einer Probe mittels Laserstrahl abgerastert, so dass ein topographisches Fluoreszenzbild entsteht. Vemisetty *et al.* untersuchten so die marginale Adaptation von drei Wurzelendfüllmaterialien (93). In der vorliegenden Studie

sollten jedoch nicht das Vorkommen und die Detektion von Spalten im Mittelpunkt stehen. Vielmehr sollten nur Spalten dargestellt werden entlang derer Stoffe penetrieren konnten, da der bakteriendichte Verschluss bei wurzelbehandelten Zähnen von großer Bedeutung für den klinischen Langzeiterfolg ist (5). Eine weitere, nondestruktive Methode die marginale Integrität von Restaurationsmaterialien zu untersuchen und darzustellen stellt die optische Kohärenztomografie (OCT) dar. Schneider, Steigerwald-Otremba *et al.* zeigten, dass es sich dabei um eine valide Methode sowohl *in vitro* als auch *in vivo* handelt. Allerdings können nur Strukturen bis zu einer Tiefe von 2 bis 2,5 mm dargestellt werden (94). Diese Limitation schließt eine Anwendung im Modell der vorliegenden Studie aus.

Eine weitere Möglichkeit zur Analyse der marginalen Integrität stellt die rasterelektronenmikroskopische Analyse von Replica dar. Al-Harbi, Kaisarly *et al.* verglichen die marginale Integrität von Füllungen, die mit einem Bulkfill Komposit gelegt wurden und Füllungen, die aus Inkrementen in Schichttechnik gelegt wurden. Hierzu wurden Silikonabdrücke der zu untersuchenden Zähne genommen und sogenannte Replicas aus Epoxidharz erstellt. Diese wurden dann unter dem Elektronenmikroskop untersucht (95). Mit dieser Technik wurden Klasse II Kavitäten untersucht. Studien mit hochauflösender Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zur Analyse der marginalen Integrität unter Verwendung von Replica und SEM-Bildern der adhäsiven Grenzfläche ermöglichen eine Randspaltanalyse im äußersten Teil der Grenzflächen Zahn-Restoration oder am Querschnitt einer Probe. Ohne die Proben zu schneiden können jedoch keine Informationen über die tatsächliche Tiefe der Spalten erworben werden (96). Mit modernen Adhäsivtechniken konnte die marginale Adaptation so weit verbessert werden, dass Spalten an Restaurationsrändern kaum noch direkt zu identifizieren sind. Die direkte Visualisierung durch rasterelektronenmikroskopische Bilder ohne die Verwendung von Replicas ermöglicht zwar eine Randanalyse mit hoher Auflösung (97), wird aber durch die wegen der Vakuumexposition entstehenden Artefakte beeinträchtigt. Diese Problematiken bestehen bei den Farbpenetrationstests nicht.

4.1.5 Einfluss von TCML

Wie den Ergebnissen zu entnehmen ist, hatte TCML einen entscheidenden Einfluss auf die marginale Penetration. Während ohne TCML ein signifikanter Unterschied zwischen allen Versuchsgruppen und der Kontrollgruppe C1, bei der ohne Adhäsiv gearbeitet wurde, im Hinblick auf die Penetrationstiefe erkennbar war, war nach dem Durchlaufen einer thermomechanischen Wechselbelastung kein signifikanter Unterschied mehr vorhanden. Sowohl die Studie von Ebert, Löffler *et al.* (98) als auch die von Erdilek, Dörter *et al.* (99)

kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Beide zeigten, dass TCML die Randspaltbildung von direkten Versorgungungen begünstigt. In der Arbeit von Friedl, Schmalz *et al.* (57) hingegen, kam es nur bei einem der getesteten Materialien zu vermehrter Randspaltbildung nach TCML. Alle anderen Materialien zeigten keine signifikanten Unterschiede vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung. Die Kaubelastung scheint also vor allem bei direkten Restaurationen und deren defektorientierten Präparationsform einen Einfluss auf die Bildung marginaler Randspalten zu haben.

Weiter wurde untersucht, an welcher Grenze (Schmelz-Komposit, Dentin-Komposit) Farbpenetration stattfand. Wie in den Ergebnissen bereits beschrieben, fand im Schmelz sowohl ohne als auch mit thermomechanischer Wechselbelastung eine deutlich höhere Penetration statt. Zu gegenteiligen Ergebnissen kamen Krifka *et al.* (79) in ihrer Arbeit. In der Studie von Krifka *et al.* wurden jedoch Klasse V Kavitäten präpariert, die koronal im Schmelz und weiter apikal im Dentin endeten. Die Restaurationsfläche selbst war hierbei nicht direkt von der okklusalen Belastung betroffen. In der vorliegenden Studie handelt es sich um Trepanationsöffnungen, die zwar ins Dentin reichen, aber koronal von Schmelz begrenzt sind und hier die einzig analysierbare Eintrittspforte für die Farblösung liegt. Mit anderen Worten, die Silbernitratlösung muss zunächst die Grenzflächen zum Schmelz penetrieren, bevor sie auf Dentin trifft, was höhere prozentuale Penetration für die Grenze zwischen Schmelz und Komposit zur Folge hat. Desweiteren entstanden keine höheren Penetrationswerte für eine bestimmte Seite (vestibulär oder oral) was eine Art Qualitätsmerkmal darstellt.

4.1.6 Einfluss der Vorbehandlung

Die Vorbehandlung der Trepanationsöffnung hatte lediglich bei den Zähnen einen Einfluss, die keiner thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt waren. Hier zeigte sich jedoch nur ein signifikanter Unterschied aller Gruppen gegenüber der Gruppe C1, also der Kontrollgruppe ohne Vorbehandlung und ohne Adhäsiv. Unterliefen die Zähne eine thermomechanische Wechselbelastung, gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Wurde ein self-etch-Adhäsivsystem verwendet, hatte die Kavitätenvorbehandlung keinen Einfluss auf die Randdichtigkeit direkter, postendodontischer Restaurationen. Die Null-Hypothese, dass unterschiedliche Vorbehandlungen der endodontischen Zugangskavität vor dem postendodontischen Verschluss die marginale Penetration zwischen Schmelz, Dentin und postendodontischem Verschluss nicht beeinflussen, kann aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Studie nicht verworfen werden.

In der Literatur finden sich kaum Studien mit ähnlichem Aufbau. Die Arbeit von Ebert, Löffler *et al.* (98) zeigt jedoch einzelne Parallelen. Sie behandelten ebenfalls die endodontischen Zugangskavitäten unterschiedlich vor und haben Penetrationstiefen gemessen. Die Gruppe mit der Etch and Rinse-Technik zeigte die geringste Penetration. Die Gruppen ohne weitere Vorbehandlung zeigten die höchste Penetration. Allerdings wurden andere Restaurationsmaterialien verwendet, lediglich Adhäsivstrategien variiert und im Vergleich zur vorliegenden Studie mit horizontalen Schnitten gearbeitet, was eine Analyse der gesamten Grenzfläche unter Berücksichtigung verschiedener Zahnhartsubstanzen erschwert. Abschließend muss auch festgehalten werden, dass es in der vorliegenden Arbeit immer zu einer zumindest geringfügigen Penetration gekommen ist. Bei der Gesamtpenetration ohne den Einfluss von TCML lag der Wert der Gruppe, die am besten abgeschnitten hatte im Median bei 11,9 %.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden *in-vitro*-Studie sollte der Frage nachgegangen werden, ob die Vorbehandlung einer Zugangskavität nach endodontischer Behandlung einen Einfluss auf die Randdichtigkeit des postendodontischen Verschlusses mit Komposit hat. Hierzu wurden 84 kariesfreie humane Molaren als Untersuchungsgut herangezogen. Zunächst wurden bei allen Zähnen beidseits proximale Kästen präpariert und im Sinne eines präendodontischen Aufbaus direkt versorgt. Anschließend wurde eine Wurzelkanalbehandlung durchgeführt und die Zähne schließlich auf sieben Versuchsgruppen aufgeteilt. Bei der Kontrollgruppe C1 wurde kein Adhäsiv appliziert. Bei der Kontrollgruppe C0 wurde Kontamination durch Spüllösungen, Sealer und Reinigungsalkohol vermieden und das Self-Etch Adhäsivsystem entsprechend den Testgruppen T1-T5 appliziert. T1 wurde ausschließlich mit einem Adhäsiv vorbehandelt. T2 wurde vor der Adhäsivapplikation mit Glycinpulver, T3 mit Aluminiumoxidpulver mikroabrasiv vorbehandelt. Die Zugangskavitäten der Gruppe T4 wurden mit einem Rosenbohrer mechanisch gereinigt. Diese mechanische Reinigung erfolgte in Gruppe T5 nach 24 Stunden provisorischem Verschluss. Alle Zähne wurden anschließend mit Komposit verschlossen. Die Hälfte der Zähne unterlief einer thermomechanischen Wechselbelastung. Anschließend wurden alle Zähne nach der Silbernitratfärbung in oro-vestibulärer Richtung mit einer Mikrotom Säge in 300 µm dicke Schnitte gesägt. Die Schnitte wurden unter einem Makroskop fotografiert und die Penetrationsstrecken nach dem Prinzip Maximum analysiert. Die Daten wurden nichtparametrisch mittels Mann-Whitney-U Test und Error-Rates-Methode analysiert ($\alpha=0,05$). Bei Betrachtung der Farbpenetrationswerte der Zähne ohne thermomechanische Wechselbelastung zeigte sich für alle Gruppen im Vergleich zur Kontrollgruppe C1 signifikant weniger Farbpenetration. Keine der Vorbehandlungen führte zu signifikant geringerer Penetration. Mit TCML gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen allen Gruppen.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Den Resultaten dieser *in vitro* Studie nach können zwei Hauptaussagen getroffen werden. Verwendet man ein Self-Etch Adhäsivsystem hat die Vorbehandlung einer Zugangskavität keinen Einfluss auf die marginale Integrität eines direkten postendodontischen Verschlusses zur Zahnhartsubstanz. Nach der Entfernung von Sealerresten mit Alkohol führten weder die zusätzliche zeitaufwändige mikroinvasive Reinigung in Form von Abstrahlen noch ein Substanzabtrag mittels Rosenbohrern zu einer Verbesserung der marginalen Integrität. Thermische und mechanische Belastungen beeinflussen die Randdichtigkeit eines direkten postendodontischen Verschlusses negativ.

Da die Zähne *in vivo* thermischen wie mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, stellt sich die Frage, ob eine Reinfektion durch eine andere, z.B. indirekte Versorgungsform, vermieden werden kann und die Langzeitprognosen endodontischer Zähne dadurch verbessert werden können. Das zu untersuchen, sollte Inhalt weiterer Studien sein.

7. Literatur

1. Weiger R, Hitzler S, Hermle G, Lost C. Periapical status, quality of root canal fillings and estimated endodontic treatment needs in an urban German population. *Endod Dent Traumatol* 1997; 13(2):69–74. doi: 10.1111/j.1600-9657.1997.tb00013.x.
2. Pak JG, Fayazi S, White SN. Prevalence of Periapical Radiolucency and Root Canal Treatment: A Systematic Review of Cross-sectional Studies. *Journal of Endodontics* 2012; 38(9):1170–6. doi: 10.1016/j.joen.2012.05.023.
3. Schulte A, Pieper K, Charalabidou O, Stoll R, Stachniss V. Prevalence and quality of root canal fillings in a German adult population. A survey of orthopantomograms taken in 1983 and 1992. *Clin Oral Investig* 1998; 2(2):67–72. doi: 10.1007/s007840050047.
4. Kirkevang L-L, Hørsted-Bindslev P. Technical aspects of treatment in relation to treatment outcome. *Endodontic Topics* 2002; 2(1):89–102. doi: 10.1034/j.1601-1546.2002.20106.x.
5. Dietschi D, Duc O, Krejci I, Sadan A. Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: a systematic review of the literature, Part II (Evaluation of fatigue behavior, interfaces, and in vivo studies). Germany; 2008 Feb.
6. Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH. Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics* 2005; 10(1):30–76. doi: 10.1111/j.1601-1546.2005.00152.x.
7. Dalton BC, Orstavik D, Phillips C, Pettiette M, Trope M. Bacterial reduction with nickel-titanium rotary instrumentation. *Journal of Endodontics* 1998; 24(11):763–7. doi: 10.1016/S0099-2399(98)80170-2.
8. Fleming CH, Litaker MS, Alley LW, Eleazer PD. Comparison of classic endodontic techniques versus contemporary techniques on endodontic treatment success. *Journal of Endodontics* 2010; 36(3):414–8. doi: 10.1016/j.joen.2009.11.013.
9. Stavileci M, Hoxha V, Gorduysus O, Tatar I, Laperre K, Hostens J et al. Evaluation of Root Canal Preparation Using Rotary System and Hand Instruments Assessed by Micro-Computed Tomography. *Med Sci Monit Basic Res* 2015; 21:123–30. doi: 10.12659/MSMBR.893950.
10. Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Br Dent J* 2014; 216(6):299–303. doi: 10.1038/sj.bdj.2014.204.
11. Falk KW, Sedgley CM. The influence of preparation size on the mechanical efficacy of root canal irrigation in vitro. *Journal of Endodontics* 2005; 31(10):742–5. doi: 10.1097/01.don.0000158007.56170.0c.
12. Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Br Dent J* 2014; 216(6):299–303. doi: 10.1038/sj.bdj.2014.204.
13. Guivarc'h M, Ordioni U, Ahmed HMA, Cohen S, Catherine J-H, Bukiet F. Sodium Hypochlorite Accident: A Systematic Review. United States; 2017 Jan.

14. Basmadjian-Charles CL, Farge P, Bourgeois DM, Lebrun T. Factors influencing the long-term results of endodontic treatment: a review of the literature. *Int Dent J* 2002; 52(2):81–6. doi: 10.1111/j.1875-595x.2002.tb00605.x.
15. Fedorowicz Z, Nasser M, Sequeira-Byron P, Souza RF de, Carter B, Heft M. Irrigants for non-surgical root canal treatment in mature permanent teeth. England; 2012 Sep 12.
16. Ruksakiet K, Hanák L, Farkas N, Hegyi P, Sadaeng W, Czumbel LM et al. Antimicrobial Efficacy of Chlorhexidine and Sodium Hypochlorite in Root Canal Disinfection: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Endodontics* 2020; 46(8):1032-1041.e7. doi: 10.1016/j.joen.2020.05.002.
17. Mozo S, Llena C, Forner L. Review of ultrasonic irrigation in endodontics: increasing action of irrigating solutions. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 2012; 17(3):e512-6. doi: 10.4317/medoral.17621.
18. Nitzan DW, Stabholz A, Azaz B. Concepts of accidental overfilling and overinstrumentation in the mandibular canal during root canal treatment. *Journal of Endodontics* 1983; 9(2):81–5. doi: 10.1016/S0099-2399(83)80081-8.
19. Orstavik D, Qvist V, Stoltze K. A multivariate analysis of the outcome of endodontic treatment. *Eur J Oral Sci* 2004; 112(3):224–30. doi: 10.1111/j.1600-0722.2004.00122.x.
20. Fracassi LD, Ferraz EG, Albergaria SJ, Veeck EB, da Costa NP, Sarmento VA. Evaluation of the quality of different endodontic obturation techniques by digital radiography. *Clin Oral Investig* 2013; 17(1):97–103. doi: 10.1007/s00784-012-0675-7.
21. Fracassi LD, Ferraz EG, Albergaria SJ, Veeck EB, da Costa NP, Sarmento VA. Evaluation of the quality of different endodontic obturation techniques by digital radiography. *Clin Oral Investig* 2013; 17(1):97–103. doi: 10.1007/s00784-012-0675-7.
22. Peng L, Ye L, Tan H, Zhou X. Outcome of root canal obturation by warm gutta-percha versus cold lateral condensation: a meta-analysis. United States; 2007 Feb.
23. Križnar I, Zanini F, Fidler A. Presentation of gaps around endodontic access cavity restoration by phase contrast-enhanced micro-CT. *Clin Oral Investig* 2019; 23(5):2371–81. doi: 10.1007/s00784-018-2680-y.
24. Devroey S, Calberson F, Meire M. The efficacy of different cleaning protocols for the sealer-contaminated access cavity. *Clin Oral Investig* 2020. doi: 10.1007/s00784-020-03283-8.
25. Kirkevang LL, Orstavik D, Horsted-Bindslev P, Wenzel A. Periapical status and quality of root fillings and coronal restorations in a Danish population. *Int Endod J* 2000; 33(6):509–15. doi: 10.1046/j.1365-2591.2000.00381.x.
26. Ray HA, Trope M. Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration. *Int Endod J* 1995; 28(1):12–8. doi: 10.1111/j.1365-2591.1995.tb00150.x.

27. Moreno JO, Alves FRF, Goncalves LS, Martinez AM, Rocas IN, Siqueira JF, JR. Periradicular status and quality of root canal fillings and coronal restorations in an urban Colombian population. *Journal of Endodontics* 2013; 39(5):600–4. doi: 10.1016/j.joen.2012.12.020.
28. Thampibul P, Jantarat J, Arayasantiparb R. Post-treatment apical periodontitis related to the technical quality of root fillings and restorations in Thai population. *Aust Endod J* 2019; 45(2):163–70. doi: 10.1111/aej.12302.
29. Siqueira JF, JR, Rocas IN, Alves FRF, Campos LC. Periradicular status related to the quality of coronal restorations and root canal fillings in a Brazilian population. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005; 100(3):369–74. doi: 10.1016/j.tripleo.2005.03.029.
30. Tronstad L, Asbjornsen K, Doving L, Pedersen I, Eriksen HM. Influence of coronal restorations on the periapical health of endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol* 2000; 16(5):218–21. doi: 10.1034/j.1600-9657.2000.016005218.x.
31. Craveiro MA, Fontana CE, Martin AS de, Bueno, Carlos Eduardo da Silveira. Influence of coronal restoration and root canal filling quality on periapical status: clinical and radiographic evaluation. *Journal of Endodontics* 2015; 41(6):836–40. doi: 10.1016/j.joen.2015.02.017.
32. Zarow M, Ramírez-Sebastià A, Paolone G, Ribot Porta J de, Mora J, Espona J et al. A new classification system for the restoration of root filled teeth. *Int Endod J* 2018; 51(3):318–34. doi: 10.1111/iej.12847.
33. Fennis WMM, Kuijs RH, Kreulen CM, Roeters FJM, Creugers NHJ, Burgersdijk RCW. A survey of cusp fractures in a population of general dental practices. *Int J Prosthodont* 2002; 15(6):559–63.
34. Reeh ES, Douglas WH, Messer HH. Stiffness of endodontically-treated teeth related to restoration technique. *J Dent Res* 1989; 68(11):1540–4. doi: 10.1177/00220345890680111401.
35. Suksaphar W, Banomyong D, Jirathanyanatt T, Ngoenwiwatkul Y. Survival Rates from Fracture of Endodontically Treated Premolars Restored with Full-coverage Crowns or Direct Resin Composite Restorations: A Retrospective Study. *Journal of Endodontics* 2018; 44(2):233–8. doi: 10.1016/j.joen.2017.09.013.
36. Suksaphar W, Banomyong D, Jirathanyanatt T, Ngoenwiwatkul Y. Survival rates against fracture of endodontically treated posterior teeth restored with full-coverage crowns or resin composite restorations: a systematic review. *Restor Dent Endod* 2017; 42(3):157–67. doi: 10.5395/rde.2017.42.3.157.
37. Friedman S, Mor C. The success of endodontic therapy--healing and functionality. *J Calif Dent Assoc* 2004; 32(6):493–503.
38. Korasli D, Ziraman F, Ozyurt P, Cehreli SB. Microleakage of self-etch primer/adhesives in endodontically treated teeth. *J Am Dent Assoc* 2007; 138(5):634–40. doi: 10.14219/jada.archive.2007.0235.

39. Olcay K, Ataoglu H, Belli S. Evaluation of Related Factors in the Failure of Endodontically Treated Teeth: A Cross-sectional Study. *Journal of Endodontics* 2018; 44(1):38–45. doi: 10.1016/j.joen.2017.08.029.
40. Siqueira JF, JR. Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail. *Int Endod J* 2001; 34(1):1–10. doi: 10.1046/j.1365-2591.2001.00396.x.
41. Assif D, Gorfil C. Biomechanical considerations in restoring endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* 1994; 71(6):565–7. doi: 10.1016/0022-3913(94)90438-3.
42. BUONOCORE MG. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 1955; 34(6):849–53. doi: 10.1177/00220345550340060801.
43. van Meerbeek B, Vanherle G, Lambrechts P, Braem M. Dentin- and enamel-bonding agents. *Curr Opin Dent* 1992; 2:117–27.
44. Munck J de, van Meerbeek B, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Suzuki K et al. Four-year water degradation of total-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res* 2003; 82(2):136–40. doi: 10.1177/154405910308200212.
45. Tezvergil A, Lassila LVJ, Vallittu PK. Strength of adhesive-bonded fiber-reinforced composites to enamel and dentin substrates. *J Adhes Dent* 2003; 5(4):301–11.
46. Betancourt DE, Baldion PA, Castellanos JE. Resin-Dentin Bonding Interface: Mechanisms of Degradation and Strategies for Stabilization of the Hybrid Layer. *Int J Biomater* 2019; 2019:5268342. doi: 10.1155/2019/5268342.
47. Giannini M, Makishi P, Ayres APA, Vermelho PM, Fronza BM, Nikaido T et al. Self-etch adhesive systems: a literature review. *Braz Dent J* 2015; 26(1):3–10. doi: 10.1590/0103-6440201302442.
48. Gupta S, Vellanki VK, Shetty VK, Kushwah S, Goyal G, Chandra SMS. In vitro evaluation of shear bond strength of nanocomposites to dentin. *J Clin Diagn Res* 2015; 9(1):ZC09-11. doi: 10.7860/JCDR/2015/11463.5386.
49. Colombo M, Beltrami R, Chiesa M, Poggio C, Scribante A. Shear bond strength of one-step self-etch adhesives to dentin: Evaluation of NaOCl pretreatment. *J Clin Exp Dent* 2018; 10(2):e127-e133. doi: 10.4317/jced.54552.
50. Poggio C, Beltrami R, Colombo M, Chiesa M, Scribante A. Influence of dentin pretreatment on bond strength of universal adhesives. *Acta Biomater Odontol Scand* 2017; 3(1):30–5. doi: 10.1080/23337931.2017.1305273.
51. Chaves P, Giannini M, Ambrosano GMB. Influence of smear layer pretreatments on bond strength to dentin. *J Adhes Dent* 2002; 4(3):191–6.
52. Zang HL, Wang Y, Liang YH. Cleaning efficacy of different solvents on sealer-contaminated dentin surface. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban* 2018; 50(1):63–8.

53. Fornazari IA, Wille I, Meda EM, Brum RT, Souza EM. Effect of Surface Treatment, Silane, and Universal Adhesive on Microshear Bond Strength of Nanofilled Composite Repairs. *Oper Dent* 2017; 42(4):367–74. doi: 10.2341/16-259-L.
54. Espinar-Escalona E, Barrera-Mora JM, Llamas-Carreras JM, Solano-Reina E, Rodríguez D, Gil FJ. Improvement in adhesion of the brackets to the tooth by sandblasting treatment. *J Mater Sci Mater Med* 2012; 23(2):605–11. doi: 10.1007/s10856-011-4509-y.
55. Ferracane JL. Models of Caries Formation around Dental Composite Restorations. *J Dent Res* 2017; 96(4):364–71. doi: 10.1177/0022034516683395.
56. Howdle MD, Fox K, Youngson CC. An in vitro study of coronal microleakage around bonded amalgam coronal-radicular cores in endodontically treated molar teeth. *Quintessence Int* 2002; 33(1):22–9.
57. Friedl KH, Schmalz G, Hiller KA, Mortazavi F. Marginal adaptation of composite restorations versus hybrid ionomer/composite sandwich restorations. *Oper Dent* 1997; 22(1):21–9.
58. Gale MS, Darvell BW. Controlling dentine penetration in computer microleakage tracer mapping. *J Dent* 1997; 25(2):129–36. doi: 10.1016/s0300-5712(96)00020-6.
59. Heintze SD. Clinical relevance of tests on bond strength, microleakage and marginal adaptation. *Dent Mater* 2013; 29(1):59–84. doi: 10.1016/j.dental.2012.07.158.
60. Krifka S, Federlin M, Hiller K-A, Schmalz G. Microleakage of silorane- and methacrylate-based class V composite restorations. *Clin Oral Investig* 2012; 16(4):1117–24. doi: 10.1007/s00784-011-0619-7.
61. Redwan H, Bardwell DN, Ali A, Finkelman M, Khayat S, Weber H-P. Composite Replacement of Amalgam Restoration Versus Freshly Cut Dentin: An In Vitro Microleakage Comparison. *Oper Dent* 2016; 41(3):E73-82. doi: 10.2341/14-278-L.
62. Wu W, Cobb E, Dermann K, Rupp NW. Detecting margin leakage of dental composite restorations. *J Biomed Mater Res* 1983; 17(1):37–43. doi: 10.1002/jbm.820170104.
63. Gallottini L. Shaping of the Root Canal System: A Multistep Technique. *J Contemp Dent Pract* 2017; 18(9):851–5. doi: 10.5005/jp-journals-10024-2138.
64. Söderholm KJ. Correlation of in vivo and in vitro performance of adhesive restorative materials: a report of the ASC MD156 Task Group on Test Methods for the Adhesion of Restorative Materials. *Dent Mater* 1991; 7(2):74–83. doi: 10.1016/0109-5641(91)90049-5.
65. Krifka S, Anthofer T, Fritzsich M, Hiller K-A, Schmalz G, Federlin M. Ceramic inlays and partial ceramic crowns: influence of remaining cusp wall thickness on the marginal integrity and enamel crack formation in vitro. *Oper Dent* 2009; 34(1):32–42. doi: 10.2341/08-34.
66. Federlin M, Krifka S, Herpich M, Hiller K-A, Schmalz G. Partial ceramic crowns: influence of ceramic thickness, preparation design and luting material on fracture resistance and marginal integrity in vitro. *Oper Dent* 2007; 32(3):251–60. doi: 10.2341/06-70.

67. Dioguardi M, Di Gioia G, Illuzzi G, Arena C, Caponio VCA, Caloro GA et al. Inspection of the Microbiota in Endodontic Lesions. *Dent J (Basel)* 2019; 7(2). doi: 10.3390/dj7020047.
68. Kwang S, Aminoshariae A, Harding J, Montagnese TA, Mickel A. The critical time-lapse between various restoration placements and subsequent endodontic intervention. *Journal of Endodontics* 2014; 40(12):1922–6. doi: 10.1016/j.joen.2014.08.005.
69. Sim TP, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K. Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *Int Endod J* 2001; 34(2):120–32. doi: 10.1046/j.1365-2591.2001.00357.x.
70. Abuhaimeed TS, Abou Neel EA. Sodium Hypochlorite Irrigation and Its Effect on Bond Strength to Dentine. *Biomed Res Int* 2017; 2017:1930360. doi: 10.1155/2017/1930360.
71. Alshaikh KH, Hamama HHH, Mahmoud SH. Effect of smear layer deproteinization on bonding of self-etch adhesives to dentin: a systematic review and meta-analysis. *Restor Dent Endod* 2018; 43(2):e14. doi: 10.5395/rde.2018.43.e14.
72. Daratsianos N, Schütz B, Reimann S, Weber A, Papageorgiou SN, Jäger A et al. The influence of enamel sandblasting on the shear bond strength and fractography of the bracket-adhesive-enamel complex tested in vitro by the DIN 13990:2017-04 standard. *Clin Oral Investig* 2019; 23(7):2975–85. doi: 10.1007/s00784-018-2692-7.
73. Santos, M J M C, Bapoo H, Rizkalla AS, Santos GC. Effect of dentin-cleaning techniques on the shear bond strength of self-adhesive resin luting cement to dentin. *Oper Dent* 2011; 36(5):512–20. doi: 10.2341/10-392-L.
74. Flury S, Peutzfeldt A, Schmidlin PR, Lussi A. Exposed Dentine: Influence of Cleaning Procedures and Simulated Pulpal Pressure on Bond Strength of a Universal Adhesive System. *PLoS One* 2017; 12(1):e0169680. doi: 10.1371/journal.pone.0169680.
75. Tamura Y, Takamizawa T, Shimamura Y, Akiba S, Yabuki C, Imai A et al. Influence of air-powder polishing on bond strength and surface-free energy of universal adhesive systems. *Dent Mater J* 2017; 36(6):762–9. doi: 10.4012/dmj.2016-185.
76. Falkensammer F, Arnetzl GV, Wildburger A, Krall C, Freudenthaler J. Influence of different conditioning methods on immediate and delayed dentin sealing. *J Prosthet Dent* 2014; 112(2):204–10. doi: 10.1016/j.prosdent.2013.10.028.
77. Heintze SD, Ruffieux C, Rousson V. Clinical performance of cervical restorations--a meta-analysis. *Dent Mater* 2010; 26(10):993–1000. doi: 10.1016/j.dental.2010.06.003.
78. Cenci MS, Pereira-Cenci T, Donassollo TA, Sommer L, Strapasson A, Demarco FF. Influence of thermal stress on marginal integrity of restorative materials. *J Appl Oral Sci* 2008; 16(2):106–10. doi: 10.1590/s1678-77572008000200005.
79. Krifka S, Federlin M, Hiller K-A, Schmalz G. Microleakage of silorane- and methacrylate-based class V composite restorations. *Clin Oral Investig* 2012; 16(4):1117–24. doi: 10.1007/s00784-011-0619-7.

80. Momoi Y, Iwase H, Nakano Y, Kohno A, Asanuma A, Yanagisawa K. Gradual increases in marginal leakage of resin composite restorations with thermal stress. *J Dent Res* 1990; 69(10):1659–63. doi: 10.1177/00220345900690100601.
81. Krejci I, Reich T, Lutz F, Albertoni M. An in vitro test procedure for evaluating dental restoration systems. 1. A computer-controlled mastication simulator. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1990; 100(8):953–60.
82. Reich E, Schmalz G, Federlin M. Marginal fit of ceramic and composite inlays in vitro. *Dtsch Zahnarztl Z* 1990; 45(10):656–60.
83. Scholz KJ, Hinderberger M, Widbiller M, Federlin M, Hiller K-A, Buchalla W. Influence of selective caries excavation on marginal penetration of class II composite restorations in vitro. *Eur J Oral Sci* 2020. doi: 10.1111/eos.12726.
84. Katona TR, Eckert GJ. The mechanics of dental occlusion and disclusion. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2017; 50:84–91. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2017.10.009.
85. Muliyar S, Shameem KA, Thankachan RP, Francis PG, Jayapalan CS, Hafiz KAA. Microleakage in endodontics. *J Int Oral Health* 2014; 6(6):99–104.
86. Khier S, Hassan K. Efficacy of composite restorative techniques in marginal sealing of extended class v cavities. *ISRN Dent* 2011; 2011:180197. doi: 10.5402/2011/180197.
87. Khosravi K, Mousavinasab S-M, Samani MS. Comparison of microleakage in Class II cavities restored with silorane-based and methacrylate-based composite resins using different restorative techniques over time. *Dent Res J (Isfahan)* 2015; 12(2):150–6.
88. Jia S, Chen D, Wang D, Bao X, Tian X. Comparing marginal microleakage of three different dental materials in veneer restoration using a stereomicroscope: an in vitro study. *BDJ Open* 2017; 3:16010. doi: 10.1038/bdjopen.2016.10.
89. Roulet JF. Marginal integrity: clinical significance. *J Dent* 1994; 22 Suppl 1:S9-12. doi: 10.1016/0300-5712(94)90164-3.
90. Heintze SD. Clinical relevance of tests on bond strength, microleakage and marginal adaptation. *Dent Mater* 2013; 29(1):59–84. doi: 10.1016/j.dental.2012.07.158.
91. Ratih DN, Palamara JEA, Messer HH. Minimizing dentinal fluid flow associated with gap formation. *J Dent Res* 2006; 85(11):1027–31. doi: 10.1177/154405910608501110.
92. Mjör IA. Dentin permeability: the basis for understanding pulp reactions and adhesive technology. *Braz Dent J* 2009; 20:3–16.
93. P V R, Vemisetty H, K D, Reddy S J, D R, Krishna M JN et al. Comparative Evaluation of Marginal Adaptation of Biodentine(TM) and Other Commonly Used Root End Filling Materials-An Invitro Study. *J Clin Diagn Res* 2014; 8(3):243–5. doi: 10.7860/JCDR/2014/7834.4174.

94. Schneider H, Steigerwald-Otremba AS, Häfer M, Krause F, Scholz M, Haak R. Is Optical Coherence Tomography a Potential Tool to Evaluate Marginal Adaptation of Class III/IV Composite Restorations In Vivo? *Oper Dent* 2019; 44(3):242–53. doi: 10.2341/17-192-C.
95. Al-Harbi F, Kaisarly D, Bader D, El Gezawi M. Marginal Integrity of Bulk Versus Incremental Fill Class II Composite Restorations. *Oper Dent* 2016; 41(2):146–56. doi: 10.2341/14-306-L.
96. Federlin M, Sipos C, Hiller K-A, Thonemann B, Schmalz G. Partial ceramic crowns. Influence of preparation design and luting material on margin integrity--a scanning electron microscopic study. *Clin Oral Investig* 2005; 9(1):8–17. doi: 10.1007/s00784-004-0276-1.
97. Bortolotto T, Bahillo J, Richoz O, Hafezi F, Krejci I. Failure analysis of adhesive restorations with SEM and OCT: from marginal gaps to restoration loss. *Clin Oral Investig* 2015; 19(8):1881–90. doi: 10.1007/s00784-015-1402-y.
98. Ebert J, Löffler C, Roggendorf MJ, Petschelt A, Frankenberger R. Clinical adhesive sealing of the pulp chamber following endodontic treatment: influence of thermomechanical loading on microleakage. *J Adhes Dent* 2009; 11(4):311–7.
99. Erdilek D, Dörter C, Koray F, Kunzelmann K-H, Efes BG, Gomec Y. Effect of Thermo-mechanical Load Cycling on Microleakage in Class II Ormocer Restorations. *Eur J Dent* 2009; 3(3):200–5.

8. Danksagungen

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater PD. Dr. Matthias Widbiller und meinem Betreuer Dr. Konstantin Scholz, die mich während der Bearbeitung meiner Dissertation in allen Bereichen tatkräftig unterstützt haben.

Ebenso danken möchte ich Dr. Karl-Anton Hiller für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Dissertation sowie Helga Ebensberger und Gerlinde Ferstl für die Hilfe bei der Laborarbeit.

Zu guter Letzt möchte ich mich auch bei meinen Eltern Katja und Florian Bopp bedanken, die mich auf meinem Weg durch das Studium begleitet haben.

9. Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Silvio Bopp

Geboren am 17.12.1993 in Stuttgart

Wohnort: Kanalstraße 10 in 80538 München

Mobil: 015254644716

Email: silvio.bopp1993@gmail.com

Geschlecht: männlich

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulische und universitäre Ausbildung:

09/2004-06/2012: Allgemeine Hochschulreife im Max-Planck-Gymnasium in Nürtingen

10/2013-12/2018: Studium der Zahnmedizin an der Universität Regensburg

03/2019: Approbation als Zahnarzt

Berufserfahrung:

07/2019-07/2020: Vorbereitungsassistent in der Zahnarztpraxis Dr. von Wenz in Neunburg vorm Wald

09/2020-heute: Vorbereitungsassistent/angestellter Zahnarzt bei den Zahnärzten am Schönen Turm in Erding