

**Aus der Klinik und Poliklinik für Zahnerhaltung und
Parodontologie**

der Universität Würzburg

Direktor: Professor Dr. med. dent. Gabriel Krastl

**Computergestützte Entfernung von Glasfaserstiften:
Substanzverlust und Komplikationen
– eine ex-vivo-Vergleichsstudie**

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der

Medizinischen Fakultät

der

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Fabian Toni Schwarz

aus Wonsees

Würzburg, Juni 2023

Referent: Priv.-Doz. Dr. Ralf Krug

Korreferent: Prof. Dr. Marc Schmitter

Dekan: Prof. Dr. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2023

Der Promovend ist Zahnarzt

Diese Arbeit ist meiner Familie gewidmet

1 Inhaltsverzeichnis

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
1.1	DIE WURZELKANALBEHANDLUNG	2
1.2	POSTENDODONTISCHE VERSORGUNG	4
1.3	DIE WURZELKANALREVISION	5
1.4	GUIDED ENDODONTICS	6
1.5	ARBEITSHYPOTHESEN	8
2	<u>MATERIAL UND METHODEN</u>	9
2.1	VORVERSUCHE	9
2.2	ARBEITSFLUSSDIAGRAMM ZUR VERANSCHAULICHUNG DES STUDIENABLAUFS	11
2.3	AUSWAHL DER ZÄHNE	11
2.4	VORBEREITUNG DER ZÄHNE	13
2.4.1	WURZELKANALAUFBEREITUNG UND FÜLLUNG	13
2.4.2	STIFTBETTAUFBEREITUNG	14
2.5	PRÄ-MIKRO-CT AUFNAHMEN	16
2.6	EINSETZEN DER GLASFASERSTIFTE	18
2.7	MODELLHERSTELLUNG	20
2.7.1	HERSTELLUNG DER MODELLE FÜR DEN PHANTOMKOPF	20
2.7.2	HERSTELLUNG DER BOHRSCHABLONEN	21
2.8	ENTFERNUNG DES GLASFASERSTIFTS	26
2.8.1	KONVENTIONELLE METHODE	27
2.8.2	SCHABLONENGEFÜHRTE METHODE	28
2.9	POST-MIKRO-CT AUFNAHMEN	29
2.10	MIKRO-CT AUSWERTUNG	29
2.10.1	DREIDIMENSIONALE REGISTRIERUNG	29
2.10.2	BESTIMMUNG DES POSTOPERATIVEN VOLUMENS, DES DENTINABTRAGS UND DER KOMPOSITRESTE	29
2.10.3	BESTIMMUNG VON VIAE FALSAE UND PERFORATIONEN	32
2.11	STATISTISCHE AUSWERTUNG	33
3	<u>ERGEBNISSE</u>	35
3.1	DENTINABTRAG	35
3.2	KOMPOSITRESTE	36
3.3	VIAE FALSAE	38
3.4	PERFORATIONEN	39
3.5	ZEIT	41
3.5.1	ZEIT BIS ZUM ERREICHEN DER GUTTAPERCHA	41
3.5.2	ZEIT BIS ZUR VOLLSTÄNDIGEN ENTFERNUNG DES KOMPOSIT	43
4	<u>DISKUSSION</u>	44
4.1	DISKUSSION MATERIAL UND METHODEN	44
4.1.1	HUMANE ZÄHNE VERSUS KUNSTSTOFFREPLIKA	44
4.1.2	LAGERUNG UND ENDODONTISCHES PROTOKOLL	45
4.1.3	AUSWAHL HUMANER ZÄHNE UND ANZAHL	46
4.1.4	AUSWAHL UND VORBEHANDLUNG DES GLASFASERSTIFTS	47
4.1.5	PROCEDERE GLASFASERSTIFTENTFERNUNG BEZÜGLICH BILDGEBENDER DIAGNOSTIK	47

4.1.6	PROCEDERE GLASFASERSTIFTENTFERNUNG BEZÜGLICH PRAKTISCHER DURCHFÜHRUNG	48
4.1.7	SOFTWARE GUIDED ENDODONTICS	49
4.1.8	INDIKATIONEN GUIDED ENDODONTICS	49
4.1.9	EINFLUSS DES BEHANDLERS BEI GUIDED ENDODONTICS	50
4.1.10	BILDGEBUNG MITTELS MIKRO-CT	50
4.2	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	51
4.2.1	DENTINABTRAG	51
4.2.2	KOMPOSITRESTE	53
4.2.3	PERFORATIONEN UND VIAE FALSAE	55
4.2.4	ZEIT	57
5	ZUSAMMENFASSUNG	59
6	LITERATURVERZEICHNIS	61

Appendix

- I Abkürzungsverzeichnis
- II Abbildungsverzeichnis
- III Tabellenverzeichnis
- IV Danksagung
- V Lebenslauf
- VI Eigene Veröffentlichungen und Kongressteilnahme

1 Einleitung

Die Endodontologie ist eine Subdisziplin des Fachgebietes Zahnerhaltung und zielt darauf ab pulpale und periapikale Erkrankungen zu therapieren. Ausgangspunkt sind oftmals ausgedehnte kariöse Läsionen, die mit beträchtlichen Zahnhartsubstanzdefekten einhergehen können (European Society of Endodontology, 2006). Insbesondere bei pulpanaher Karies erreichen Mikroorganismen und deren Stoffwechselprodukte die Pulpa und verursachen eine Entzündungsreaktion im endodontischen System. Bei irreversibler Schädigung der Pulpa ist eine Wurzelkanalbehandlung indiziert. Diese zielt auf Beseitigung der Infektion und Verhinderung einer Rekolonisation des endodontischen Systems mit Mikroorganismen ab. Im Anschluss muss die Form und Funktion des betroffenen Zahnes wiederhergestellt werden. Je mehr Substanz durch kariöse Destruktionsprozesse und die Trepanation bei endodontischer Therapie verlorengegangen ist, desto umfangreicher gestaltet sich die sogenannte postendodontische restaurative Versorgung (Mannocci et al., 2021). Sie ist ein wichtiger postoperativer Faktor, der entscheidend zum Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung beiträgt und den langfristigen Erhalt des endodontisch behandelten Zahnes in Form und Funktion ermöglicht.

Bei umfangreichen Zahnhartsubstanzdefekten an mittleren Oberkieferfrontzähnen werden hierzu oftmals Glasfaserstifte in den Wurzelkanal adhäsiv eingesetzt, um einen langfristigen retentiven Verbund zwischen Wurzel, Aufbaufüllung und Restauration zu erzielen (Naumann et al., 2016). Treten Misserfolge von endodontischen Primärbehandlungen mit den Folgen der Ausbildung einer Läsion endodontischen Ursprungs auf, kann im Sinne einer endodontischen Zweitbehandlung eine sogenannte Revision mit Entfernung der Wurzelfüllung und nochmaliger Beseitigung der mikrobiellen Besiedelung erforderlich sein (European Society of Endodontology, 2006, Başaran et al., 2012). Wurde ein adhäsiv befestigter Glasfaserstift eingebracht, verhindert er initial die unmittelbare Entfernung der zumeist mikrobiell besiedelten Wurzelkanalfüllung. Glasfaserstifte werden auf verschiedene Art und Weisen entfernt. In der Regel werden sie unter direkter Sicht zerspannt und zerkleinert. Je weiter apikal sie allerdings in den Wurzelkanal eingebracht worden sind, desto langwieriger und vor allem komplikationsbehafteter kann sich dies gestalten. Es bestehen Risiken wie z.B. ein übermäßiger Zahnhartsubstanzabtrag oder es treten Komplikationen wie *Viae falsae* bis Perforationen, die eine Verbindung zum Parodont aufweisen, auf.

In einer dieser Arbeit zugrundeliegenden ex-vivo Vergleichsstudie sollte ein modernes, gemeinhin als komplikationsarm angesehenes Verfahren der computergestützten Entfernung von Glasfaserstiften mit einer konventionellen und etablierten Methodik verglichen werden. Es wurden folgende Parameter erfasst: Zahnhartsubstanzabtrag, Anteil an im Wurzelkanal verbliebenem Befestigungskomposit, Häufigkeit von Komplikationen sowie die für die jeweilige Technik erforderliche Behandlungszeit.

1.1 Die Wurzelkanalbehandlung

Indikationen für eine Wurzelkanalbehandlung sind zum Beispiel eine nekrotische Pulpa mit einer apikalen Entzündung, eine irreversible Pulpitis oder die traumatische Eröffnung der Pulpa, um eine bakterielle Invasion zu vermeiden oder falls schon stattgefunden diese zu beseitigen (European Society of Endodontology, 2006). Nach korrekter Indikationsstellung für eine Wurzelkanalbehandlung sollte vor Therapiebeginn immer ein Ausgangsröntgenbild vorliegen, um den präoperativen Zustand bewerten zu können. Ein besonderes Augenmerk ist hier auf die apikalen Strukturen, den Verlauf der Wurzelkanäle und die Achse von klinischer Krone zu Zahnwurzel zu legen. Besonderheiten wie stark gekrümmte Wurzeln oder obliterierte Wurzelkanäle müssen erkannt werden, um der Situation angepasst und schwierigkeitsadaptiert agieren zu können (Venskutonis et al., 2014). Eine Anästhesie des betroffenen Zahnes ist nicht zwingend und nur bei Symptomatik notwendig. Während im Falle einer nekrotischen Pulpa kein vitales Nervengewebe mehr vorliegt, kann bei einer irreversiblen Pulpitis eine ausreichend wirksame Anästhesietiefe aufgrund des Milieus im entzündeten Gebiet oftmals nur schwierig erreicht werden. Nach gelungener Trepanation sollte der Zahn mit einem Kofferdam für die weitere endodontische Behandlung isoliert werden. Dies erleichtert das fokussierte Arbeiten am entsprechenden Zahn, schützt ihn vor bakterieller Kontamination aus dem Speichel und verhindert, dass gewebssauflösende Spüllösungen in Kontakt mit den Mundschleimhäuten kommen können. Mit der Trepanation soll das Pulpakammerdach vollständig abgetragen und ein gerader Zugang zu den Wurzelkanälen geschaffen werden, um letztlich eine optimale Sicht auf die Orifizien gewährleisten zu können. Nach ihrer Darstellung und koronalen Erweiterung kann die Arbeitslänge elektrometrisch bestimmt und gegebenenfalls mit einer Röntgenmessaufnahme verifiziert werden. Ein anerkannter Endpunkt der Arbeitslänge liegt etwa ein bis zwei Millimeter vor dem röntgenologischen Apex. Dies soll sicherstellen, den apikalen Konstriktionsbereich im Wurzelkanal während der Präparation nicht mehr als nötig zu erweitern bzw. vielmehr bestmöglich zu erhalten. Die

endodontische Aufbereitung geschieht einerseits mechanisch mit speziellen Feilen und andererseits chemisch unter Anwendung einer Spüllösung wie z.B. Natriumhypochlorid mit einem gewebsauflösenden Effekt (Byström and Sundqvist, 1983). Die zu verwendenden Feilen für die Wurzelkanalaufbereitung werden idealerweise gemäß den jeweiligen anatomischen Besonderheiten des Zahnes und der Wurzelkanalmorphologie ausgewählt. In der Fachliteratur liegen allgemein anerkannte, zahntypspezifische Aufbereitungsgrößenbereiche an den apikalen Endpunkten der jeweiligen Wurzelkanäle. Eine Aufbereitung bis zur ISO-Größe 35 (dies entspricht einem Durchmesser von 0,35 mm an der Instrumentenspitze) scheint eine suffiziente Spülwirkung erzielen zu können (Boutsioukis et al., 2010). Die bisher herkömmlichen Hand-Stahlfeilen wurden in den letzten zwei Jahrzehnten um eine große Auswahl an maschinell rotierenden Nickel-Titan-Feilen (Abb. 1) ergänzt. Letztere besitzen spezifische Eigenschaften wie z.B. die Pseudoelastizität oder den Memory-Effekt und unterscheiden sich durch vielfältige Feilengeometrien mit teils regressiven Tapern und unterschiedlichen Konizitäten.

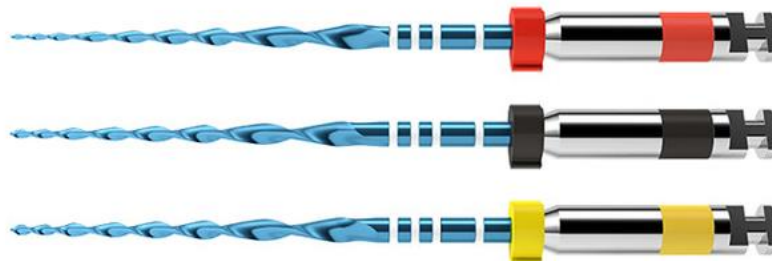


Abbildung 1: Nickel-Titan-Feilen (Reciproc Blue, Fa. VDW, München, Deutschland) in drei ISO-Größen R25, R40 und R50.

Der Einsatz dieser Feilen soll eine möglichst formkongruente Präparation des Wurzelkanals ermöglichen. Zudem werden vor allem im unteren, ausreichend präpariertem Wurzelkanaldrittel die Voraussetzungen für das Erzielen ausreichender Spüleffekte geschaffen. Dabei werden im endodontischen System Debris, nekrotische Zellbestandteile und Mikroorganismen entfernt sowie zersetzt. Nach adäquater Aufbereitung werden die Wurzelkanälwände mit Sealer benetzt und mit Guttapercha

gefüllt, um das Lumen möglichst dicht zu verschließen und ein erneutes Besiedeln mit Mikroorganismen zu verhindern. Der Obturation des endodontischen Systems schließen sich stets ein dichter Verschluss der Zugangskavität mit einer postendodontischen suffizienten Versorgung an.

1.2 Postendodontische Versorgung

Eine adäquate postendodontische Versorgung des betroffenen Zahnes ist ein wesentlicher Bestandteil der Wurzelkanalbehandlung und mitverantwortlich für ein positives Therapieresultat (Mannocci et al., 2021). Voraussetzung dafür ist eine technisch erfolgreich abgeschlossene Wurzelkanalbehandlung gemäß den geltenden ESE-Richtlinien (European Society of Endodontology, 2006) und ein Zahn, welcher sich röntgenologisch und klinisch symptomlos darstellt. Empfohlen wird ein Stiftaufbau vor allem bei ausgedehnten Zahnhartsubstanzdefekten, bei denen eine suffiziente adhäsive Retention des Aufbaus nicht mehr gegeben ist. Es gibt eine große Vielfalt an Stiftsystemen, welche sich bezüglich des verwendeten Materials, des Stiftdesigns und des Befestigungsmaterials unterscheiden. In der hier vorliegenden Arbeit wird auf die modernen, allgemein akzeptierten, adhäsiv befestigten Glasfaserstifte fokussiert.

Ein Stiftaufbau soll generell eine langfristige Retention des Aufbaus zur Zahnwurzel sicherstellen und auf diese Weise zur Stabilität des Zahnes beitragen (Marchionatti et al., 2017). Glasfaserstifte bestehen aus einer Harzmatrix, in der zur Strukturarmierung Glasfasern eingebettet sind. Dadurch besitzen sie eine hohe Bruchfestigkeit bei gleichzeitig Dentin ähnlichen Elastizitätseigenschaften, mit dem Ziel die Gefahr einer Wurzelfraktur durch die bei Belastung eingeleiteten Scher- und Kaukräfte zu reduzieren und folglich sogenannte Spannungsspitzen im Material zu minimieren (Cagidiaco et al., 2008). Des Weiteren überzeugen die optischen Eigenschaften von zahnfarbenen Glasfaserstiften unter einer transluzenten definitiven Restauration. In der hier vorliegenden Arbeit wurden Glasfaserstifte des D.T. Light-Post Systems mit dem dazugehörigen Bohrer (Fa. VDW) (Abb. 2) verwendet, welcher in vier verschiedenen Größen erhältlich ist.

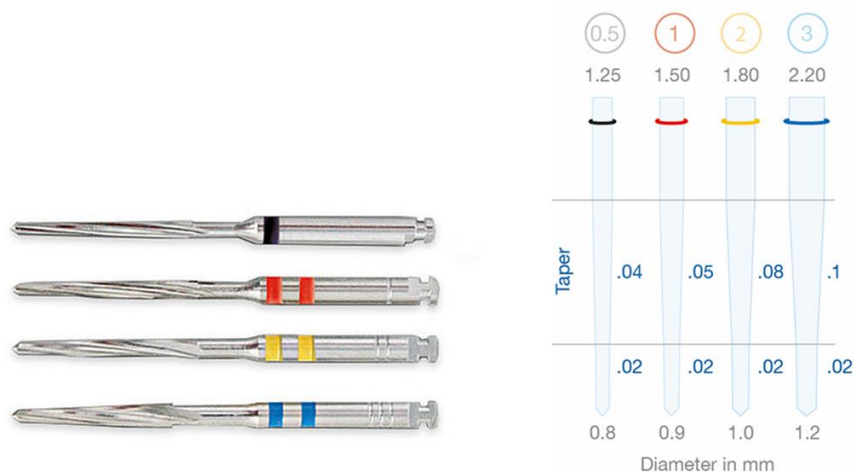


Abbildung 2: Stiftbohrer (sog. Finishing Drills) und D.T. Light Posts (Fa. VDW).

Alternativ zur laborgefertigten Restauration ist ein direkter Aufbau der Zahnkrone mit Komposit in einer einzigen Sitzung möglich. Dies erspart sowohl Kosten als auch weiteren Aufwand im Dentallabor. Generell besteht immer ein gewisses Restrisiko, dass es nach einer endodontischen Therapie - unabhängig davon, ob ein Stiftaufbau verwendet wurde oder nicht - zu einer Reinfektion des endodontischen Systems kommen kann. Meist manifestiert sich dies unter Ausbildung einer charakteristischen Läsion endodontischen Ursprungs am Periapex. In diesem Fall kann eine erneute endodontische Behandlung (sog. endodontische Revision) unumgänglich sein (Başaran et al., 2012).

1.3 Die Wurzelkanalrevision

Liegt ein endodontisch revisionsbedürftiger Zahn mit Wurzelkanalfüllung und inseriertem Stift vor, muss bei orthograder Revision zuerst stets der Stift entfernt werden. Erst nach der Stiftenfernung kann die in der Regel im apikalen Bereich aus Guttapercha bestehende Obturation revidiert, schließlich der Apex erreicht und diese Region erneut desinfiziert werden. Konventionell zementierte Metallstifte lassen sich relativ sicher und effizient mit speziellen Systemen oder durch das zirkuläre Freipräparieren mit Ultraschallinstrumenten lösen und somit entfernen. Bei adhäsiv an das Dentin befestigten Glasfaserstiften erfolgt die Entfernung mit rotierenden Instrumenten, zumeist intermittierend unter direkter Sicht mit geeigneten Hartmetall-Bohrern. Dies ist für gewöhnlich auch für ungeübte Behandler bis zu einer Tiefe von wenigen Millimetern im Wurzelkanal gut praktikabel. Es kann sich jedoch mit zunehmender Tiefe innerhalb der

Zahnwurzel im klinischen Alltag als komplikationsbehaftet und sehr zeitintensiv erweisen (Haupt et al., 2022). Bei der Anwendung von sog. Langschaftrosenbohrern ist die direkte Sicht auf das Arbeitsfeld durch den Kopf des Winkelstückes limitiert und lässt somit kein kontrolliertes Bohren unter direkter Sicht auf die Glasfaser mehr zu. Es kommt unter Umständen zur wesentlichen Abweichung der Bohrachse in Relation zur Achse des Wurzelkanals. Führt die Abweichung sogar bis hin zur Perforation des Zahnes, kann dies neben einem technisch aufwendigen Perforationsdeckungsversuch im schlimmsten Falle den Zahnverlust nach sich ziehen.

1.4 Guided Endodontics

Die Erschließung apikaler Wurzelkanalanteile von obliterierten Zähnen mithilfe von individuell hergestellten Bohrschablonen ist mittlerweile eine erprobte alternative Methode mit dem Ziel, Risiken wie unnötigen Substanzverlust oder Perforation erheblich zu reduzieren. Die Methodik des sog. Guided Endodontics Konzepts wurde 2016 eingeführt und basiert auf der schablonengeführten Implantatbettbohrung in der Implantologie (Kraatz et al., 2016). Mehrere Fallberichte und Studien konnten zeigen, dass sich mit dieser Technik Wurzelkanäle sehr sicher und innerhalb von wenigen Minuten erschließen lassen (Connert et al., 2019, Kraatz et al., 2016, Zehnder et al., 2016, Buchgreitz et al., 2019). In der Studie von Connert et al. wurde eine konventionelle Technik mit der schablonengeführten Technik zur Erschließung von simulierten kalzifizierten Wurzelkanälen verglichen. Mit der schablonengeführten Technik konnten 22 von 24 Kanälen sicher erschlossen werden, wohingegen mit der konventionellen Technik nur 10 von 24 Kanäle erschlossen werden konnten (Connert et al., 2019). Für die Herstellung der Bohrschablonen wird ein digitales Volumetomogramm (DVT) der entsprechenden Region im DICOM-Format und der Datensatz eines Oberflächenscans (im STL-Format) des Kiefers benötigt. Beide Datensätze werden in einer speziellen 3D-Planungssoftware abgeglichen. Bei der Behandlung eines einzigen Zahnes genügt meist eine kleinvolumige DVT-Aufnahme mit der Erfassung von jeweils zwei Nachbarzähnen zu beiden Seiten. Es stehen derzeit zwei kommerziell erhältliche Softwaresysteme zur Verfügung: coDiagnostiX (Fa. Dental Wings GmbH, Chemnitz, Deutschland) und SICAT Endo (Fa. Dentsply Sirona, Charlotte, USA). In der jeweiligen Software erfolgt stets die Planung des Bohrpfads mit Ausrichtung auf den erkennbaren Anteil des Wurzelkanals. Bei coDiagnostiX muss zusätzlich die Bohrschablone selbst designed werden. Der finale Datensatz wird anschließend aus der Software exportiert, um letztlich eine Bohrschablone fabrizieren zu lassen (Abb. 3). Zusätzlich werden dem Behandler die im

jeweiligen System hinterlegte Bohrhülse und Bohrer mitgeliefert, die schließlich am Patienten mit der Schablone als sog. statische Navigation zum Einsatz kommen. In der Praxis führt vor allem ein sukzessives Vorgehen unter steter Wasserkühlung beim Bohren zum Erfolg. Die Bohrung wird so lange im Intervall in Richtung zum apikalen Wurzelanteil wiederholt bis der Wurzelkanal z.B. mit einer K-Feile ISO-Größe 10 sondiert werden kann.



Abbildung 3: Guided Endodontics Behandlung exemplarisch für Zahn 21 mit eingesetzter Bohrschablone und Hülse.

Es gibt inzwischen zahlreiche Anwendungsbereiche für das Guided Endodontics Konzept. Hierzu gehören neben der Wurzelkanalerschließung an Zähnen mit Pulpaobliteration infolge von Trauma (Kraatzl et al., 2016, Buchgreitz et al., 2019, Fonseca Tavares et al., 2018) auch die Behandlung von Dens in-/evaginatus (Mittal et al., 2016) und Dentindysplasien (Krug et al., 2020b) sowie die Lokalisation des Apex bei apikal-chirurgischen Eingriffen oder einer zu entfernenden Wurzel bei Zahnfusion (Sato et al., 2021). Strbac G et al. zeigte in einem klinischen Fall, dass die Osteotomie und Resektion einer Wurzelspitze mit der schablonengeführten Methode sicher gelingt und eine Alternative zur konventionellen Methode darstellt (Strbac et al., 2017). In einer Studie von Ackerman et al. wurde die Genauigkeit des apikal-chirurgischen Zugangs an 48 Zähnen verglichen. Bei der freihändigen Methode stellten sich nur 11 von 24 Zugänge als erfolgreich heraus, wohingegen bei der schablonengeführten Methode alle 24 Zugänge als erfolgreich angesehen wurden (Ackerman et al., 2019).

Wenige Berichte verweisen auf die experimentelle, technisch erfolgreiche Entfernung von Glasfaserstiften aus Wurzelkanälen auf Basis der Guided Endodontics Systematik (Maia et al., 2022, Alfadda et al., 2022, Cho et al., 2021, Perez et al., 2021, Perez et al., 2020). Erstmalig soll deshalb in der hier vorliegenden Arbeit die Entfernung von Glasfaserstiften mittels Guided Endodontics so standardisiert wie möglich untersucht und mit einer konventionellen Methodik verglichen werden.

1.5 Arbeitshypothesen

In der vorliegenden Untersuchung soll die Entfernung adhäsiv eingesetzter Glasfaserstifte aus extrahierten humanen Zähnen mittels des Guided Endodontics Verfahrens mit der konventionellen Technik verglichen werden. Gleichzeitig soll der Einfluss der Erfahrung des Behandlers (Spezialist für Endodontie vs. Generalist) mit untersucht werden.

Folgende Arbeitshypothesen wurden formuliert:

H 1: Es gibt zwischen den drei Entfernungsmethoden (Konventionell Spezialist, Konventionell Generalist und Guided) einen Unterschied im Volumen am Dentinabtrag.

H 2: Es gibt zwischen den drei Entfernungsmethoden einen Unterschied im Volumen der verbliebenen Kompositreste.

H 3: Es gibt einen Unterschied in der Verteilung der Anzahl an *Viae falsae* zwischen den drei Entfernungsmethoden.

H 4: Es gibt einen Unterschied in der Verteilung der Anzahl an Perforationen zwischen den drei Entfernungsmethoden.

H 5.1: Es gibt einen Unterschied in der Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha zwischen den drei Entfernungsmethoden.

H 5.2: Es gibt einen Unterschied in der Zeit bis zur vollständigen Entfernung von Guttapercha, Glasfaser und Befestigungskomposit zwischen den drei Entfernungsmethoden.

2 Material und Methoden

2.1 Vorversuche

Um die Machbarkeit dieser Studie zu prüfen, wurden im Vorfeld Versuche zu unterschiedlichen Stifitentfernungsmethoden durchgeführt. Anhand von Zahnmodellen, die aus mit Glasfaserstiften versorgten, extrahierten humanen Zähnen bestanden, wurde die Eignung verschiedener Bohrer für das Entfernen der Glasfaserstifte aus dem Wurzelkanal überprüft. Zusätzlich wurden alle Bohrer auf ihre Schnitffreudigkeit und Abnutzung an einem für die Modellbautechnik geeignetem Glasfaserstab mit einem Durchmesser von 10 mm getestet.

Zu Beginn der simulierten endodontischen Trepanation wurde die Kavität stets mit einer diamantierten Kugel präpariert und der in das Kronenlumen ragende Glasfaserstiftanteil dargestellt.

Für die konventionelle Methode erwiesen sich Munce Bohrer (vom Typ Langschaftrosenbohrer) der Firma CJM Engineering, Santa Barbara, USA in vier verschiedenen Größen und einer Länge von 34mm als geeignet (Abb. 4). Diese finden auch klinisch im Praxisalltag Anwendung. Munce Bohrer sind Spezialinstrumente für endodontische Behandlungen und weisen einen extra langen und schmalen Schaft mit einem Durchmesser von nur 1 mm auf. Dies ermöglicht eine gute Sicht auf das Arbeitsfeld. Trotz schmalen Schaft sind diese Bohrer ausreichend stabil, aufgrund der Hartmetallausführung langlebig und sie besitzen eine hohe Toleranz gegenüber Hitzeentwicklung.

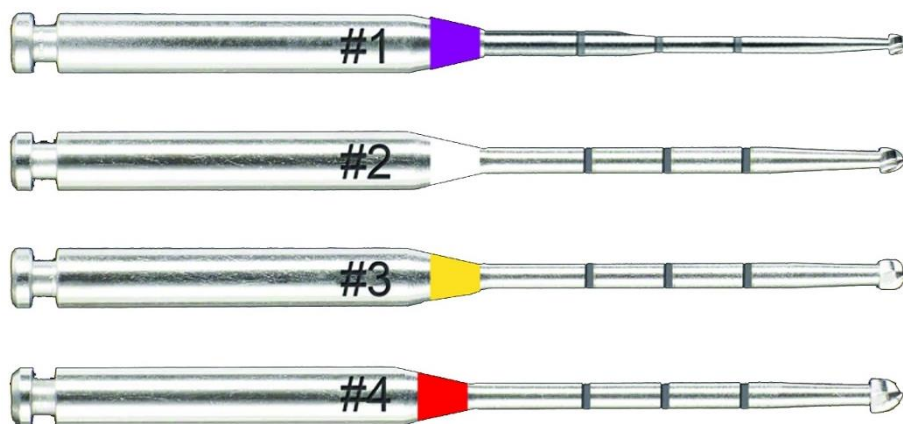


Abbildung 4: Munce Bohrer der Firma CJM Engineering in den Größen #1 - #4.

Die schablonengeführte Methode wurde nach Planung der Bohrachse, Design und Druck der Bohrschablone mit Anwendung des passenden Bohrers und unter Einsatz der passenden Bohrhülse auf ihre Eignung überprüft. Der geeignete Spiralbohrer der Firma atec Dental, Ebringen, Deutschland wies eine Länge von 28 mm und einen Durchmesser von 1 mm auf (Abb. 5). Erste Pilotversuche resultierten in der Erkenntnis, dass nach erfolgreicher Darstellung des Glasfaserstiftes innerhalb der Zahnkrone ein zur Glasfaser gerades Plateau mit einem Diamantbohrer geschaffen werden muss, um einen Ansatzpunkt ohne Abgleiten des Spiralbohrers von der geplanten Bohrachse zu definieren. In einer anderen Studie mit Fokus auf dem Vergleich zweier verschiedener Planungssoftwares hinsichtlich der Genauigkeit bei der statischen Navigation wurde das Abgleiten der Bohrer bei zunehmenden Gradzahlen der Plateauneigung untersucht (Krug et al., 2020a). Um eine Überhitzung des Bohrers zu vermeiden, sollte auf eine suffiziente Wasserkühlung geachtet und der Bohrkanal durch regelmäßige Zwischenspülungen von Bohrspänen befreit werden. Dies soll nicht nur ein Verblocken des Bohrkanals, sondern auch übermäßige Hitzeentwicklung und Verglühen des Bohrers verhindern. Trotz dieser beschriebenen Maßnahmen unterliegt jeder Bohrer einem gewissen Verschleiß, weshalb für die folgenden Untersuchungen für jeden Zahn und Wurzelkanal ein neuer unversehrter Bohrer verwendet wurde.

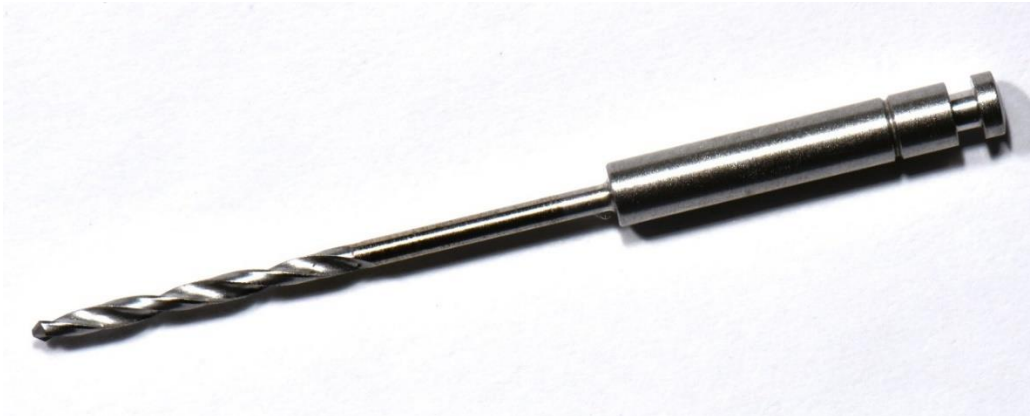


Abbildung 5: Spiralbohrer der Firma steco für Guided Endodontics.

2.2 Arbeitsflussdiagramm zur Veranschaulichung des Studienablaufs

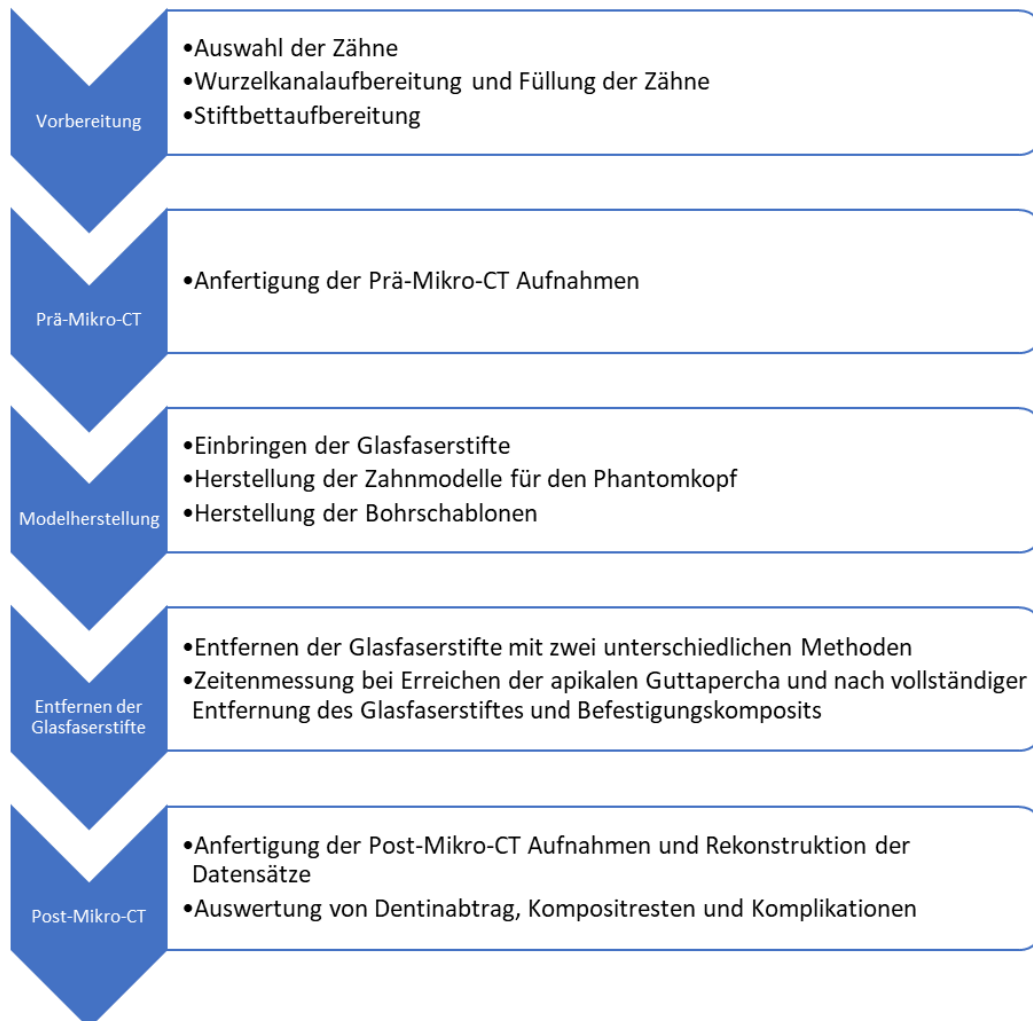


Abbildung 6: Arbeitsflussdiagramm zur Veranschaulichung des Studienablaufs

2.3 Auswahl der Zähne

Es wurden 110 extrahierte humane mittlere Oberkieferfrontzähne gesammelt, markiert und in 1%iger Chloramin T Lösung gelagert. Ihre bakteriziden und oxidierenden Eigenschaften prädestinieren sie für die Aufbewahrung und Konservierung von extrahierten Zähnen (Lee et al., 2007). Nach jedem Arbeitsschritt wurden die Zähne wieder in das Lagerungsmedium zurückgelegt.

Die Ethik-Kommission erhebt keine Einwände gegen die Verwendung von extrahierten Zähnen für Laborstudien, siehe Antrag vom 26.01.2015 mit dem Aktenzeichen 15/15.

Folgende Kriterien galten für die Zahnauswahl:

- mittlere Oberkieferfrontzähne mit einem möglichst runden, geraden und unbehandelten Wurzelkanal
- klinisch intakte Krone
- ohne umfangreiche kariöse Defekte oder Füllungen jeglicher Art
- gesamte Zahnlänge (Schneidekante bis Apex) im Bereich zwischen 20 und 24mm, gesamte Wurzellänge (Schmelzzementgrenze bis Apex) mindestens 12mm

Die Länge der Zahnwurzel war besonders relevant, um bei der Stiftinsertion eine einheitliche Stiftlänge von 7mm und eine Obturationslänge mit Guttapercha von etwa 4 mm erzielen zu können. Die Längen wurden sowohl klinisch mit einer Messlehre als auch röntgenologisch gemessen und kontrolliert.

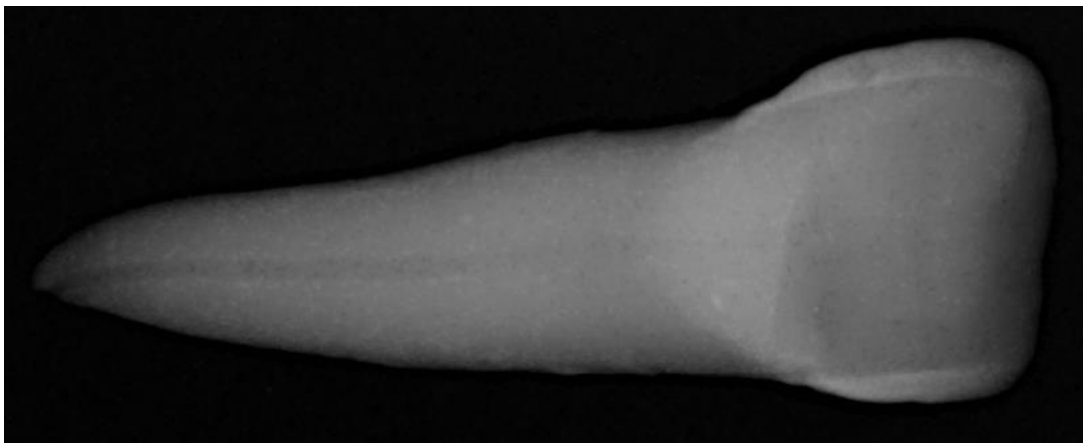


Abbildung 7: Ausgangszahnfilm eines repräsentativen Zahnes.

Von allen Zähnen wurde jeweils ein Ausgangszahnfilm von bukkaler und approximaler Achse angefertigt, um zu überprüfen, ob die Kriterien erfüllt sind (Abb.7). Anhand der Röntgenbilder wurden Zahn- sowie Wurzellängen ermittelt und ihre Werte für alle Zähne in eine Tabelle übertragen. Von den 110 gesammelten Zähnen erfüllten 90 Zähne die genannten Einschlusskriterien. Die übrigen Zähne wurden von der Studie ausgeschlossen.

2.4 Vorbereitung der Zähne

Zunächst erfolgte eine grobe Reinigung für alle Zähne, indem mit einem Scaler Reste des Parodonts und Konkremeente entfernt wurden. Zusätzlich wurde jeder Zahn auf der Labialfläche der Krone und auf der Wurzel mit einem wasserfesten Stift numerisch beschriftet.

2.4.1 Wurzelkanalaufbereitung und Füllung

Die Zähne wurden in der Hand mit einer diamantierten Kugel trepaniert und nach Erreichen der Pulpakammer das Kavum mit einem Battbohrer erweitert, so dass ein geradliniger Zugang zum Wurzelkanal gewährleistet war. Mit Gates-Glidden-Bohrern der Größe 1-5 (Dentsply Sirona) wurden die Orifizien erweitert, die Wurzelkanäle mit K-Feilen der ISO-Größen 10 und 15 (VDW Dental) instrumentiert und zwischendurch immer wieder intensiv mit Natriumhypochlorit gespült, um eine Verblockung zu vermeiden.

Unter dem Dentalmikroskop (Carl Zeiss GmbH, Oberkochen, Deutschland) wurde optisch die Arbeitslänge der Zähne bestimmt, indem eine K-Feile der ISO-Größe 15 bis zum Austritt aus dem Foramen am Apex vorgeschoben und von diesem gemessenen Wert ein Millimeter abgezogen wurde (Abb. 8).

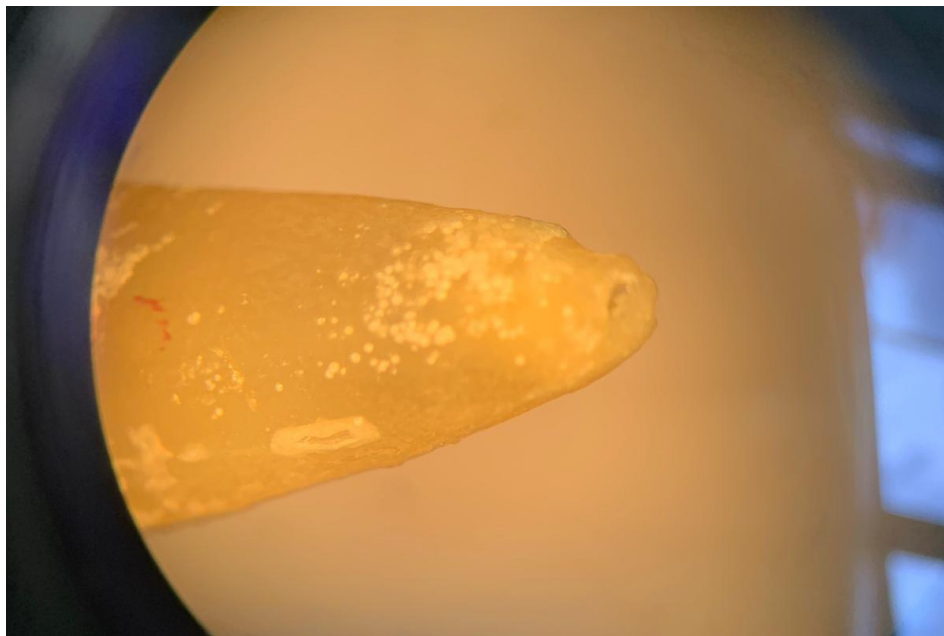


Abbildung 8: Repräsentative Darstellung des apikalen Foramens unter dem Dentalmikroskop.

Anschließend wurden die Wurzelkanäle mit Nickel-Titan-Instrumenten, in diesem Falle mit RECIPROC blue R50 (VDW Dental) und dem VDW Silver Reciproc Endodontiemotor (VDW Dental), unter Einhaltung der jeweiligen Arbeitslänge präpariert. Dies erfolgte mit in den Wurzelkanal eingebrachtem NaOCl schrittweise bis die definierte Arbeitslänge erzielt wurde. Es wurde zusätzlich intermittierend gespült und die Gängigkeit des Lumens mit einer K-Feile ISO-Größe 10 sichergestellt. Nach Erreichen der Arbeitslänge wurde nochmals mit 5ml NaOCl gespült und der Wurzelkanal mit Papierspitzen getrocknet.

Die Wurzelkanalfüllung erfolgte mittels Kaltfülltechnik mit einem RECIPROC Guttaperchastift R50 (VDW Dental) und AH Plus Root Canal Sealer (Dentsply Sirona). Die Masterpoints wurden individuell für jeden Zahn auf korrekte Arbeitslänge mit apikaler Klemmpassung im apikalen Wurzel Drittel so angepasst, sodass eine Länge von SZG bis zum Beginn der Wurzelkanalfüllung von 7mm erzielt werden konnte. Dies sollte eine möglichst einheitliche Stiftlänge sicherstellen. Der Sealer wurde nach Herstelleranleitung angemischt, der individualisierte Masterpoint damit benetzt und mit einer Sonde in den Wurzelkanal eingebracht. Mit einem Condenser der ISO-Größe 60 wurde der Masterpoint auf die Ziellänge vorgeschoben und der korrekte Sitz röntgenologisch überprüft. Überschüsse vom Sealer wurden mit Ethanol entfernt und die übrigen Dentinareale nochmals mit Wasser gespült.

2.4.2 Stiftbettauflbereitung

Respektive der anatomischen Begebenheiten von Oberkieferfrontzähnen wurden die Glasfaserstifte D.T. Light-Posts der Größe #3 (VDW Dental) im Folgenden verwendet. Die Wurzelkanäle wurden hierfür mit dem passenden D.T. Light-Post Finishing Drill der Größe #3 (VDW Dental) bis zum Beginn der Guttaperchafüllung erweitert. Dies geschah mit maximal 2000 Umdrehungen pro Minute unter sanftem Druck bis eine definierte Länge von etwa 7mm erreicht wurde (Abb. 9).

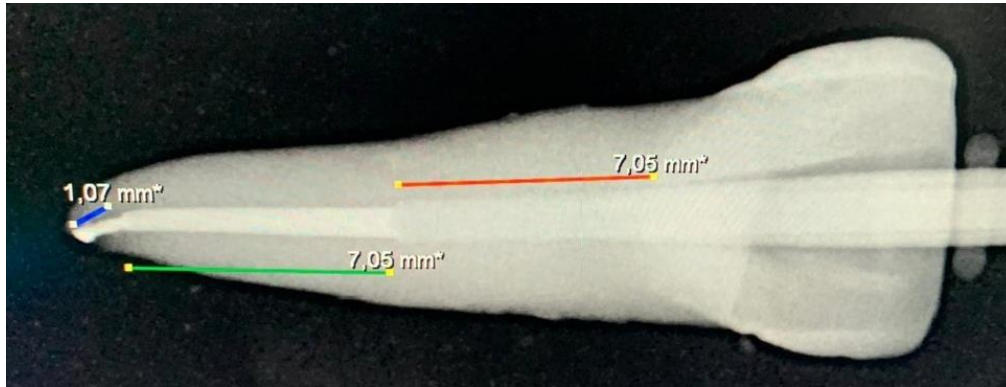


Abbildung 9: Aufbereiteter wurzelkanalgefüllter Zahn mit lose eingebrachtem Glasfaserstift.

Anschließend wurden die Wurzelkanäle mit Wasser gespült und mit Papierspitzen getrocknet. Um noch verbliebene Reste an Sealer zu entfernen, wurden die Kavitäten und Orifizen mit Aluminiumoxidpulver der Körnung $50\mu\text{m}$ mittels RONDOflex (KaVo Dental) sandgestrahlt und anschließend nochmals mit Wasser gespült getrocknet (Abb. 10).

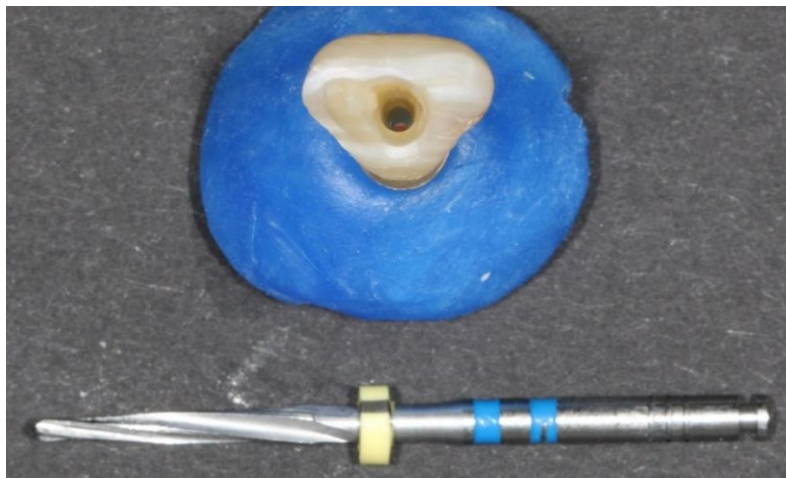


Abbildung 10: Mit D.T. Light-Post Finishing Drill #3 präparierter Zahn mit Wurzelkanalfüllung im apikalen Wurzel Drittel und sauberer Kavität.

2.5 Prä-Mikro-CT Aufnahmen

Um die Ausgangsvolumina der für die Stiftsetzung vorbereiteten Zähne zu bestimmen, wurde von jedem Zahn eine Prä-Mikro-CT Aufnahme angefertigt. Dies geschah in Kooperation mit der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie sowie dem Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie der Universitätsmedizin Göttingen. Mit den quantifizierten Lumina sollte auch die homogene Verteilung der Zähne auf drei Gruppen sichergestellt werden. Für die Mikro-CT Aufnahmen wurden jeweils zwei Zähne auf einer Schiebevorrichtung aus Plexiglas im Mikro-CT (QuantumFX, Perkin Elmer, Waltham, USA) positioniert (Abb. 11). Ein Stück Schaumstoff stellte hierbei eine sichere Positionierung der Zähne sicher.



Abbildung 11: Mikro-CT Quantum FX links im Bild mit der dazugehörigen Schiebevorrichtung. Rechts im Bild der Steuerungscomputer.

Das *Field-of-View* wurde auf 20mm festgelegt und die Zähne im Livemodus so ausgerichtet, dass die präparierten Wurzelkanäle im Zentrum der Aufnahme­region lagen (Abb. 12). Mit einer Spannung von 90kV, einer Stromstärke von 200 μ A und einer Pixelgröße von 40 μ m wurden die Aufnahmen mit einer Umlaufzeit von jeweils zwei Minuten und einer Drehung von 360 Grad um die vertikale Achse durchgeführt. Nach automatisierter Ringartefaktreduktion wurde ein isotroper 3D-Datensatz mit einer Matrixgröße von 512 x 512 x 512 generiert. Insgesamt entstanden pro Scan 512 zweidimensionale Querschnittsbilder im Tiff-Format.

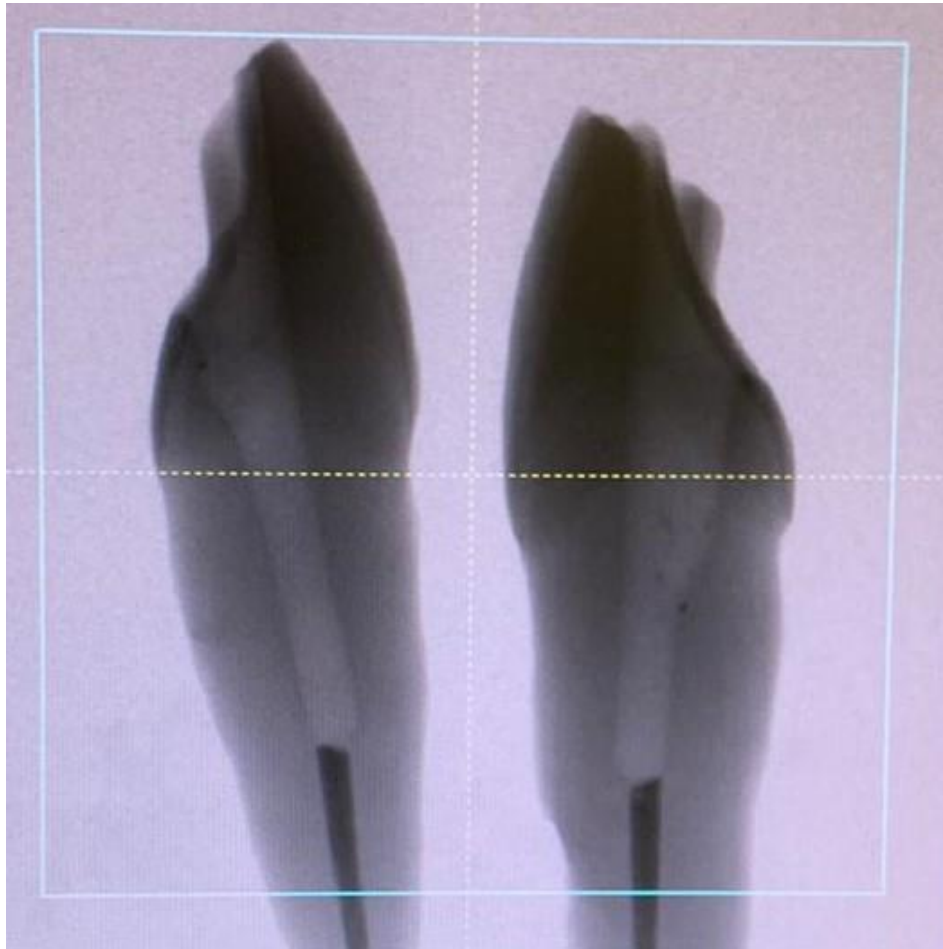


Abbildung 12: Repräsentative Mikro-CT Aufnahmeschicht zweier wurzelkanalgefüllter Zähne.

Für die Bestimmung der präoperativen Wurzelkanalvolumina wurden die rekonstruierten Datensätze mit Hilfe der Software CTAn v.1.20.3.0 (Bruker Corporation) ausgewertet. Hierfür wurde zuerst der zu analysierende Bildausschnitt von 10mm festgelegt: Das letzte Schnittbild ohne vollständige Wurzelkanalfüllung stellte hierbei die apikale Begrenzung dar (*bottom of selection*). Für die koronale Begrenzung (*top of selection*) wurde das Schnittbild gewählt, welches eine Wurzelkanallänge von 10mm markierte. Für die Berechnung der Wurzelkanalvolumina wurde eine *Tasklist* erstellt, mit Hilfe derer alle Datensätze gleichermaßen bearbeitet wurden: Binarisierung des Datensatzes (Lower grey threshold: 1, upper grey threshold: 80), Entfernung aller umgebenden Strukturen (*Despeckle, Sweep 2D, Remove the largest object; Despeckle, Sweep 3D, Remove all except the largest object*), Entfernung weißer Störpixel (*Remove white speckles 2D, <200 px*). Anschließend wurde mit Hilfe der *3D Analyse* das Wurzelkanalvolumen des zuvor ausgewählten Bereichs berechnet. Je nach Anatomie des einzelnen Zahnes

ergaben sich Prä-Volumina im Bereich von 16,89-36,83 mm³. Die 90 Zähne wurden danach homogen auf drei Gruppen mit jeweils 30 Zähnen verteilt, damit sich pro Gruppe auch eine möglichst ähnliche Bandbreite an Zähnen unterschiedlicher Anatomie widerspiegelte. Der Mittelwert der Prä-Volumina der drei Gruppen lag zwischen 22,31 und 23,44 mm³ (Tab. 1). Die einfaktorielle Varianzanalyse wurde durchgeführt, um die Homogenität der drei Gruppen zu untersuchen. Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied in den Prä-Volumina zwischen den drei Gruppen: $F(2, 74,979) = 1,001$ mit $p = 0,372$.

Tabelle 1: Homogene Aufteilung der 90 Zähne auf drei Gruppen nach Prä-Vol. in mm³.

	n	Std.-			Min	Max
		Mittelwert	Abweichung	Std.-Fehler		
GE	30	23,110	3,520	0,643	16,890	32,330
KG	30	22,310	2,00	0,382	18,610	28,810
KS	30	23,442	3,646	0,666	18,800	36,830
Gesamt	90	22,956	3,165	0,334	16,890	36,830

2.6 Einsetzen der Glasfaserstifte

Die Glasfaserstifte D.T. Light-Posts der Größe #3 (VDW Dental) wurden vor dem Einbringen in den präparierten Wurzelkanal mit Alkohol gereinigt, die Stifteinpassung für jeden Zahn geprüft und alle Stifte einheitlich auf 10 mm mit einer Trennscheibe gekürzt. Die Kanäle und die Kavität wurden mit einem 37%igen Phosphorsäuregel (Omni Dent, Rodgau, Deutschland) konditioniert, wobei versucht wurde, Einwirkzeiten von 30 Sekunden auf dem Zahnschmelz und von 15 Sekunden am Dentin zu erreichen. Mit Hilfe einer Spülkanüle und dem Luft-Wasser-Spray wurde das Ätzelgel aus der Kavität und dem Lumen entfernt. Der Wurzelkanal wurde anschließend mit Papierspitzen und unter sanftem Luftstrom getrocknet. Jeweils ein Tropfen Prime&Bond active® und Self Cure Activator (Dentsply Sirona) wurden gemischt und mit einem Applikatortip in das Lumen und die Kavität eingebracht. Es erfolgte eine Aktivierung von 20 Sekunden auf den

Zahnhartsubstanzanteilen. Überschüsse wurden mit Papierspitzen entfernt und sanft mit Luft verblasen. Die Glasfaserstifte wurden ebenfalls mit dem Gemisch benetzt (Abb. 13).

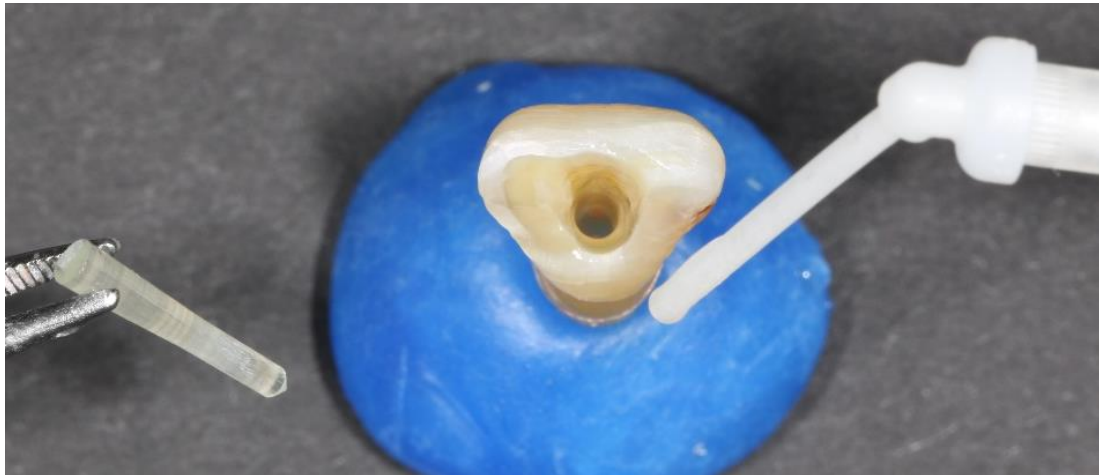


Abbildung 13: Adhäsiv vorbereiteter Zahn vor dem Einbringen des Befestigungskomposits und den auf 10mm eingekürzten Glasfaserstift.

Das dualhärtende, fließfähige Komposit Core-X® flow (Dentsply Sirona) wurde mit einem dünnen Intraoraltip in den Wurzelkanal eingebracht und der Glasfaserstift bis auf die Ziellänge eingesetzt, gefolgt von der Lichtpolymerisation. Danach wurde die übrige Kavität ebenfalls mit Komposit verschlossen und dessen Oberfläche mit Gummipolierern geglättet (Abb. 14).



Abbildung 14: Postendodontischer Zustand eines repräsentativen Zahnes mit adhäsiv eingesetztem Glasfaserstift und mit Komposit verschlossener Zugangskavität.

2.7 Modellherstellung

2.7.1 Herstellung der Modelle für den Phantomkopf

Um das Entfernen der Glasfaserstifte aus den Wurzelkanälen so patientennah wie möglich zu simulieren, wurden die Echtzähne in einem Zahnmodell auf den Positionen 11, 12, 21 und 22 platziert. In einer negativen Silikonform für den Oberkieferzahnkranz wurden zunächst an den Zahnpositionen 15, 14, 13, 23, 24 und 25 Kunststoffzähne (KaVo Dental GmbH, Biberach, Schweiz) eingebracht und mit einem Klasse 3 Hartgips ausgegossen. Auf den noch flüssigen Gips wurde anschließend eine ACCU-TRAC Platte (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Schweiz) gelegt und mit Gips verstrichen. Nach dem Aushärten wurde das Modell aus der Silikonform entnommen und der Bereich von 12-22 derart getrimmt, so dass eine Lücke für die Echtzähne entstand. Um die Echtzähne aus dem Kunststoff entfernen zu können, wurden vorab die Wurzeln mit einem flüssigen Silikon überzogen. In der mit Vaseline isolierten Lücke im Zahnkranz wurden nun die Echtzähne mit SR Ivolen (Ivoclar Vivadent AG, Ellwangen, Deutschland) harmonisch im Zahnbogen platziert, so dass stets ein austauschbarer Block mit Echtzähnen geschaffen wurde (Abb. 15). Insgesamt wurden somit 16 einsetzbare Blöcke für ein Gipsmodell erstellt, die für die Durchführung der konventionellen Methodik bestimmt waren.

Für die schablonengeführte Methode wurden acht einzelne Zahnkränze mit Gips ausgegossen und jeweils vier bzw. einmal zwei Echtzähne in SR Ivolen in den Lücken platziert. Dies erfolgte jedoch ohne Isolation, sodass ein fester Verbund entstand, welcher für eine sichere Abformung und späteren festen Sitz der Schablonen entscheidend war.

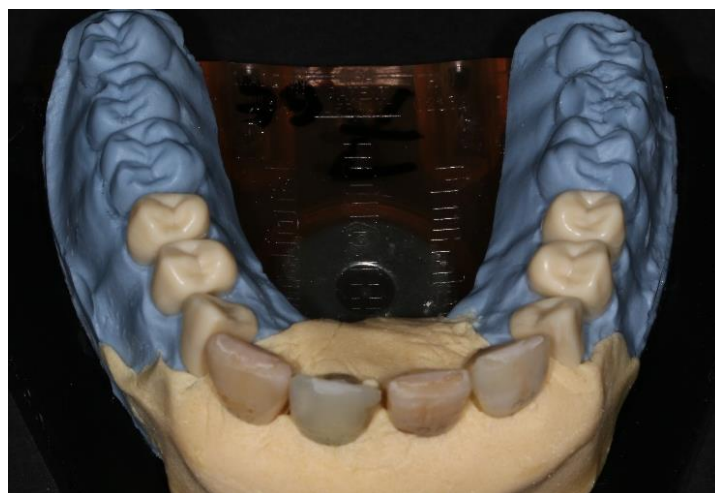


Abbildung 15: Gipsmodell mit Echtzähnen auf ACCU-TRAC Platte.

2.7.2 Herstellung der Bohrschablonen

Für die Planung und Herstellung von Bohrschablonen wurde eine dreidimensionale digitale Volumentomographie (DVT) benötigt sowie eine digitale Abformung der entsprechenden Kieferregion, mit dem Ziel diese beiden gewonnenen Datensätze anschließend mit einer geeigneten Software fusionieren zu können. Von den acht Modellen für die schablonengeführte Methode wurde jeweils mit einem DVT (Orthophos SL 3D, DENTSPLY IH GmbH) eine bildgebende Aufnahme des kompletten Modells erstellt und im DICOM-Format gespeichert (Abb. 16). Bei der Überlagerung in der Planungssoftware ist auf die richtige Fensterung zu achten, um die korrespondierenden Punkte der DVT-Aufnahme und der Abformung zu matchen.

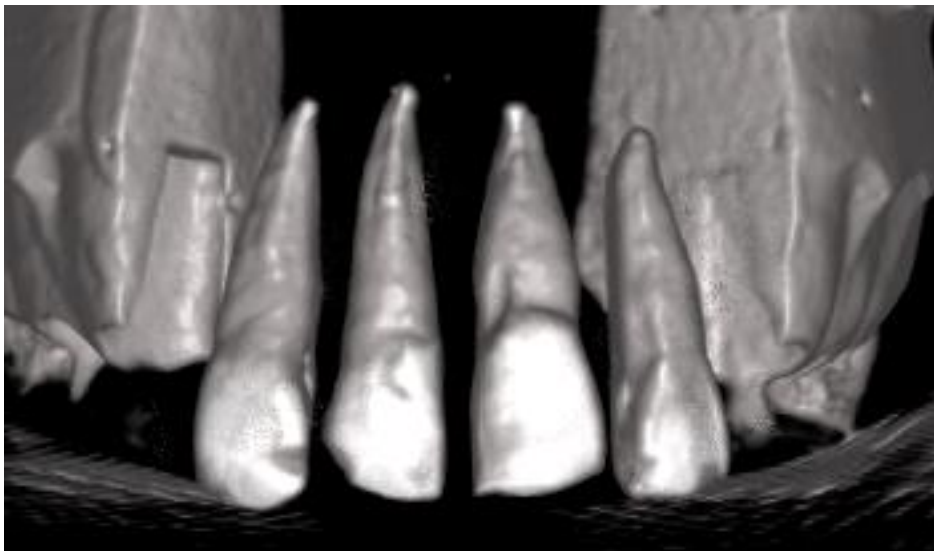


Abbildung 16: Koronal-Ansicht einer DVT-Aufnahme eines repräsentativen Zahnmodells.

Die digitale Abformung der Modelloberfläche erfolgte durch einen Intraoralscanner (Primescan, DENTSPLY IH GmbH) und wurde als STL-Datei gespeichert (Abb. 17). Dafür wurden alle relevanten Bereiche, die für die Planung und das Design bedeutsam waren, mit der Kamera abgeformt und am Bildschirm auf Vollständigkeit überprüft.



Abbildung 17: Oberflächenscan eines repräsentativen Zahnmodells.

Die beiden Datensätze wurden in eine geeignete Software (coDiagnostiX 9.0, Dental Wings Inc.) importiert und fusioniert, um die Planung der Bohrachse festlegen zu können. Im nächsten Schritt wurden der passende Bohrer und die korrespondierende Hülse ausgewählt. Ausgewählt wurden der Bohrer ATEC Endoseal (atec Dental GmbH) mit einer Länge von 28 mm und einem Durchmesser von 1 mm. Die dazu passende Innenhülse (steco-system-technik GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) wies einen Innendurchmesser von 1 mm, einen Außendurchmesser von 3,5 mm und eine Länge von 5 mm auf. Nun wurden die vier Oberkieferfrontzähne auf den Positionen 12 bis 22 markiert und die Kombination aus Bohrer und Hülse digital positioniert (Abb. 18).

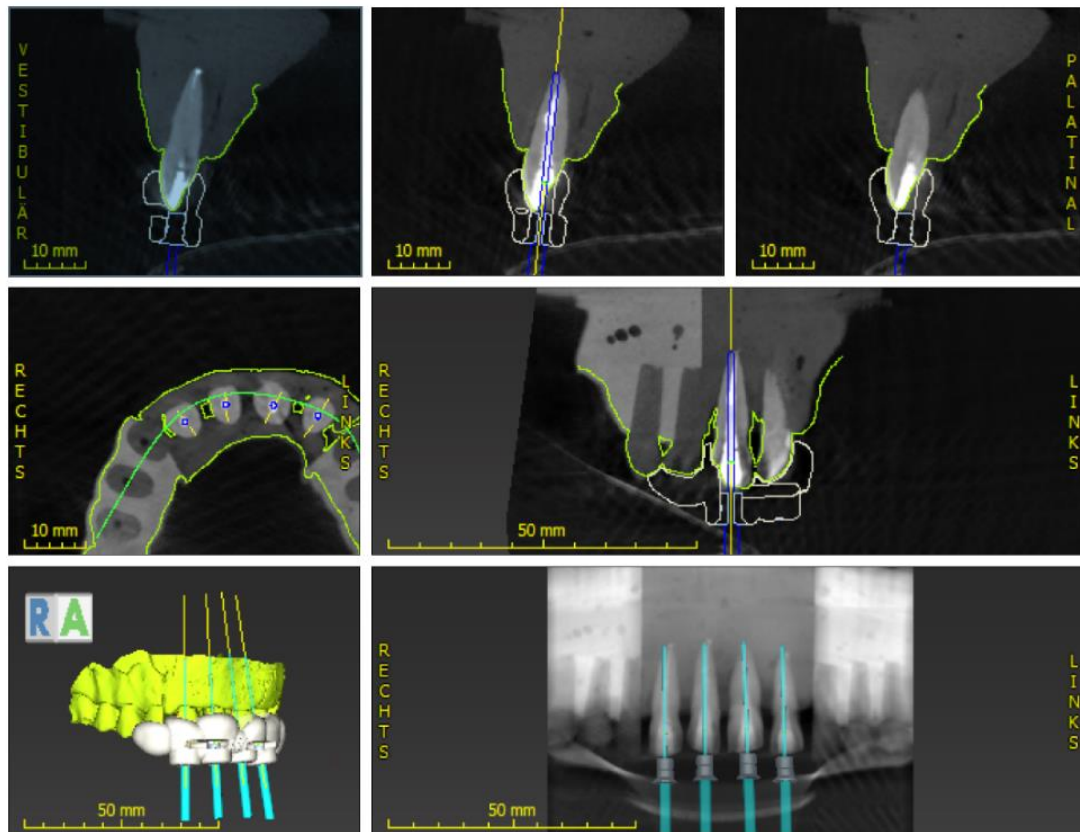


Abbildung 18: Ausrichtung der Bohrpfade für die Zähne 12-22 und Design der Bohrschablone in der Software coDiagnostiX.

Die Hülsen wurden so ausgerichtet, dass sie auf den Inzisalkanten auflagen, um die genaue Bohrlänge beim späteren Entfernen des Stiftes einhalten zu können. Die Bohrer wurden so platziert, dass die Bohrachse genau durch die axiale Mitte des Glasfaserstiftes verläuft und in der Guttaperchafüllung endet.

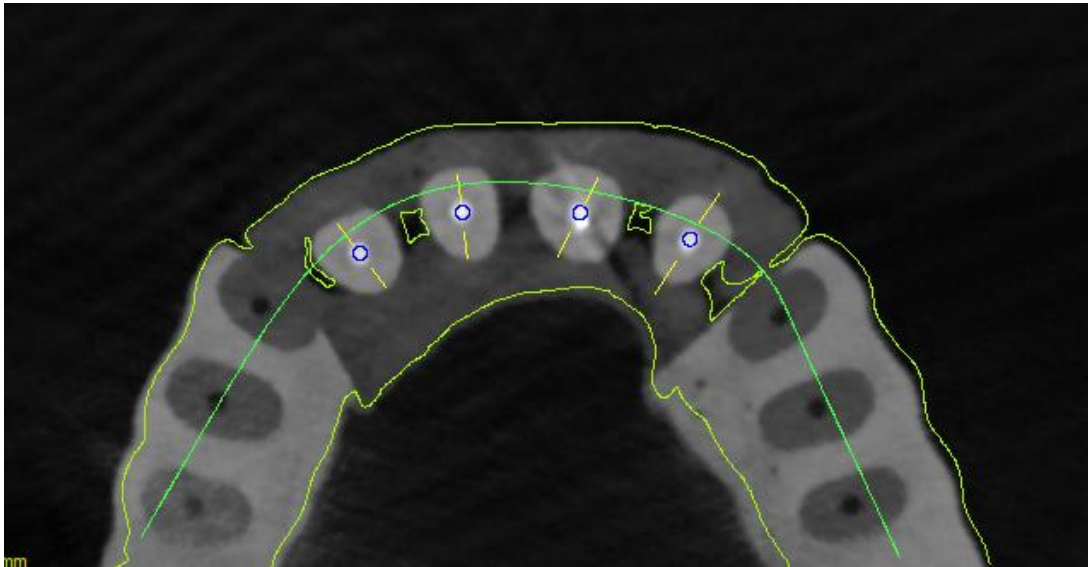


Abbildung 19: Verlauf des Bohrers in der axialen Ansicht zentral durch den Glasfaserstift.

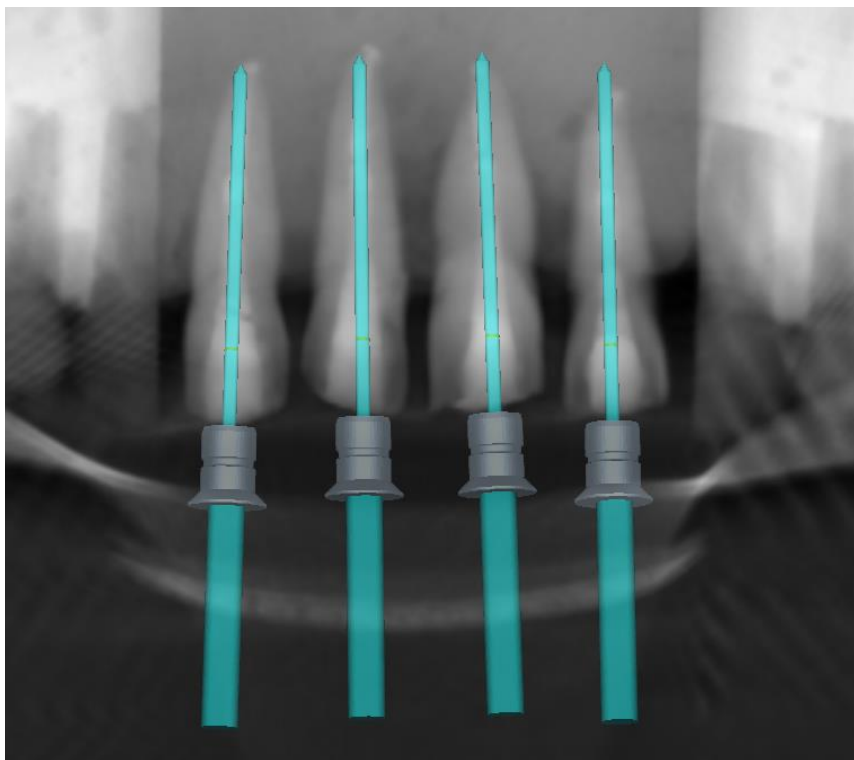


Abbildung 20: Verlauf des Bohrers in der frontalen OPG-Ansicht zentral durch den Glasfaserstift.

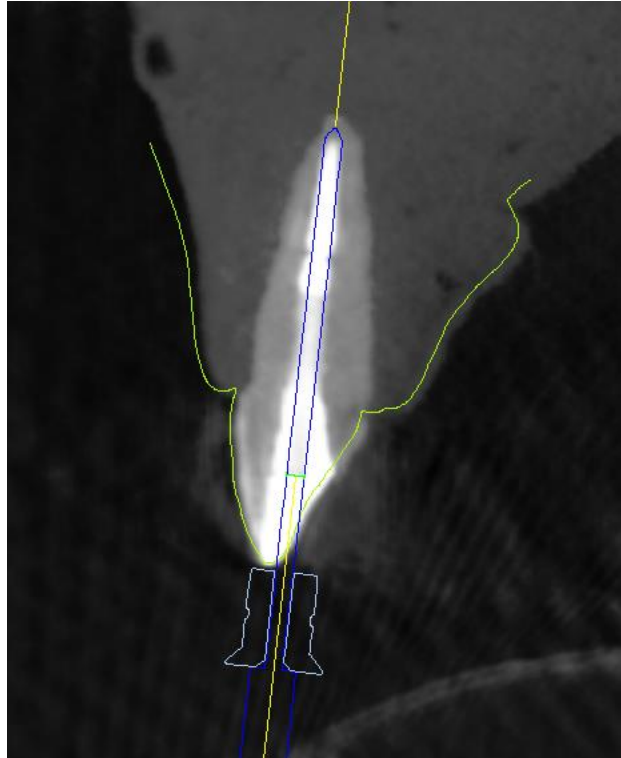


Abbildung 21: Verlauf des Bohrers in der sagittalen Ansicht zentral durch den Glasfaserstift.

Dies wurde für alle drei Raumrichtungen dahingehend überprüft, dass die Bohrachse in der axialen Ansicht stets mittig im Glasfaserstift verlief (Abb.19- 21).

Die Ausdehnung der Bohrschablonen wurde so konzipiert, dass eine Abstützung von Zahn 13 bis 23 vorhanden war. Zusätzlich wurde jede Schablone noch individuell beschriftet und ein Sichtfenster eingefügt, um einen möglichst spaltfreien und strammen Sitz der Bohrschablone auf dem Modell überprüfen zu können (Abb. 22). Nach der Planung wurden die Dateien exportiert und mittels eines 3D-Druckers (Objet 30 Prime, Stratasys,) hergestellt. Scharfe Kanten wurden abgerundet und die Bohrhülsen unter Klemmpassung eingesetzt.

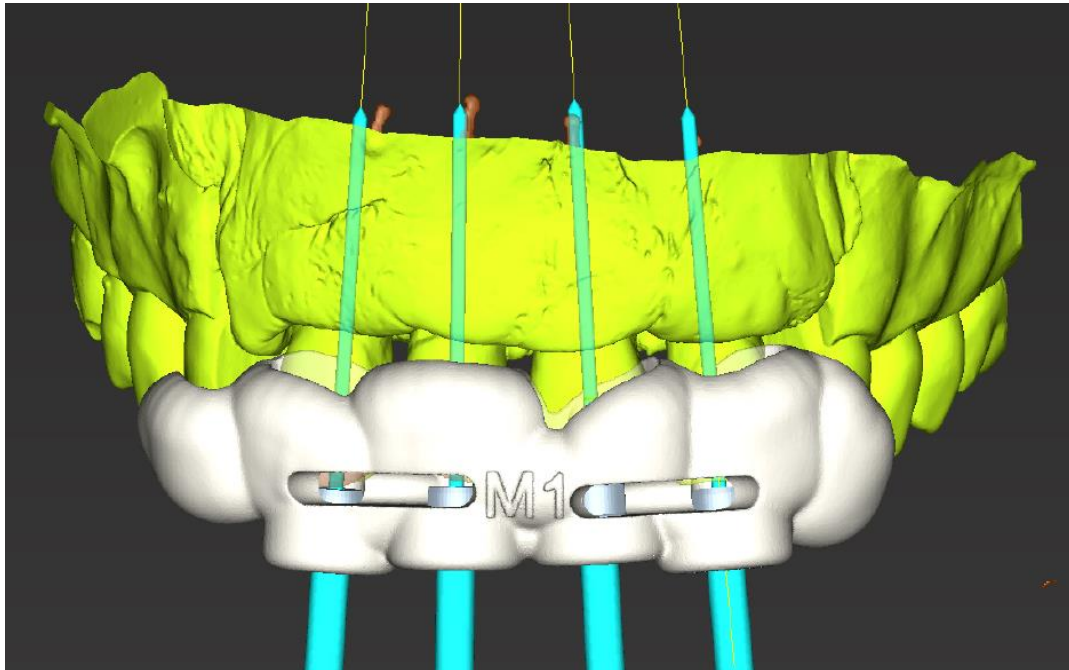


Abbildung 22: Finales Bohrschablonendesign mit Ausrichtung der Bohrachsen in den vier zu behandelnden Oberkieferfrontzähnen.

2.8 Entfernung des Glasfaserstifts

Um das Entfernen der Stifte so realistisch wie möglich zu simulieren, wurden die Modelle in einem KaVo Dentalen Patienten Simulator (KaVo Dental GmbH) fixiert und dieser Simulator an einer Behandlungseinheit (Kavo Aesthetica) angebracht (Abb. 23).



Abbildung 23: KaVo Dentaler Patienten Simulator an Behandlungseinheit montiert.

Hierfür wurde in die ACCU-TRAC Platten ein zentrales Loch gebohrt und diese mit einer M10 Gewindeschraube im Simulator verankert. Das Entfernen der Glasfaserstifte erfolgte auf zwei unterschiedliche Methoden. Die erste Methode war die sog. konventionelle Technik (K) unter Zuhilfenahme von Langschaftrosenbohrern und ultraschallgestützten Instrumenten unter direkter Sicht durch das Dentalmikroskop (OPMI Pico, Carl Zeiss GmbH). Diese Methode wurde zusätzlich nochmals behandlerabhängig in Spezialist (KS) und zahnärztlich tätigen Berufsanfänger bzw. Generalist (KG) unterteilt. Die zweite Methode war die schablonengeführte Technik (GE), die allein von letzterem Behandler zusätzlich durchgeführt wurde. Die erste Zeit wurde nach Erreichen der apikalen Guttapercha genommen und die zweite Zeit nach der vollständigen Entfernung des Stiftes sowie des Befestigungskomposits.

2.8.1 Konventionelle Methode

Für die konventionelle Methode standen folgende Instrumente zur Auswahl:

- Diamantierte Kugel mit einem Durchmesser von 14mm
- Munce Discovery Burs (CJM Engineering) in den Größen #1, #2, #3 und #4 mit einer Länge von jeweils 34mm
- VDW Ultra (VDW Dental) mit diamantierten Ultraschallaufsätzen
- Dentalmikroskop (OPMI Pico, Carl Zeiss GmbH)

Vor der Entfernung der Glasfaserstifte wurde von jedem Zahn ein Ausgangsröntgenbild angefertigt, damit eine Einschätzung zu Verlauf, Achse und Ausrichtung des Stiftes im Zahn und den anatomischen Begebenheiten des Zahnes selbst vorgenommen werden konnte. Sobald der Bohrer rotierend den endodontischen Kavitätenverschluss berührte, erfolgte die Zeitmessung mit einer Stoppuhr. Zuerst wurde mit einer diamantierten Kugel die Zugangskavität eröffnet und das Komposit entfernt. Nach Darstellung des Glasfaserstiftes wurde der Munce Bohrer angewandt. Dies erfolgte solange es möglich war unter ausreichender Sicht und Wasserkühlung Anteile des Glasfaserstifts zu erkennen und sicher zu entfernen. Limitierte der Kopf des Winkelstückes ab einer gewissen Tiefe in der Kavität die direkte Sicht auf den Glasfaserstift, wurde mit Hilfe des Dentalmikroskops sukzessive der verbliebene Anteil an Glasfaser versucht möglichst vollständig zu entfernen und die Guttapercha zu erreichen. Nach Erreichen der vorher bekannten Länge von Schneidekante zu Guttaperchafüllung wurde mit einer K- Feile ISO-Größe 10 (VDW Dental) der Bereich des Bohrendpunktes sondiert. Es wurde die

Zeit notiert, bei der das Wurzelfüllmaterial ertastet werden konnte. Mithilfe des Munce Bohrers, dem VDW Ultra und den diamantierten Aufsätzen wurde das restliche Komposit an den Kanalwänden entfernt, mit dem Dentalmikroskop das Ergebnis kontrolliert und bei sauberen Dentinwänden eine zweite Zeitmessung genommen.

2.8.2 Schablonengeführte Methode

Für die schablonengeführte Methode standen folgende Instrumente zur Auswahl:

- Diamantierte Kugel mit einem Durchmesser von 14mm
- Munce Discovery Burs (CJM Engineering) in den Größen #1, #2, #3 und #4 mit einer Länge von jeweils 34mm
- VDW Ultra (VDW Dental) mit diamantierten Ultraschallaufsätzen
- Dentalmikroskop (OPMI Pico, Carl Zeiss GmbH)
- Bohrer ATEC Endoseal (atec Dental GmbH) mit einer Länge von 28 mm und einem Durchmesser von 1,0 mm
- Gates Glidden Bohrer (Dentsply Sirona) der Größe 4-6
- Bohrschablone des jeweiligen Modells

Mit dem Beginn der Zeitmessung wurde damit begonnen die Zugangskavität zu eröffnen und den Glasfaserstift darzustellen. Im nächsten Schritt wurde die Bohrschablone auf die Zahnreihe gesetzt und überprüft, ob sie stabil und formschlüssig sitzt (Abb. 24).



Abbildung 24: Eingesetzte Bohrschablone auf das Oberkiefer-Zahnmodell im KaVo Dentaler Patientensimulator.

Der Endoseal Bohrer wurde nun mit einem Gummistopper auf die vordefinierte Arbeitslänge eingestellt, ins blaue Winkelstück eingespannt und in die Bohrhülse eingeführt. Mit 10.000 Umdrehungen pro Minute und unter stetiger Wasserkühlung wurde der Glasfaserstift herausgebohrt und danach mit einer K-Feile ISO-Größe 10 (VDW Dental) der Bohrendpunkt sondiert bis das Wurzelfüllmaterial aus Guttapercha erföhlt werden konnte. Gelang dies, wurde die Zeit notiert. Mit Gates Glidden Bohrern der Größe 4-6 wurde nun der restliche Glasfaserstift von innen heraus ausgehöhlt und das übrige Befestigungskomposit mit den Munce Bohrern und den diamantierten Aufsätzen entfernt. Nach Überprüfung bestmöglich kompositfreier Dentinwände mit dem Dentalmikroskop wurde eine zweite Zeitmessung vorgenommen.

2.9 Post-Mikro-CT Aufnahmen

Die Zähne wurden vorsichtig aus den Modellen und dem Ivolen ausgebettet, um die Post-Mikro-CT Aufnahmen anzufertigen. Hierbei wurde darauf geachtet, die Zähne nicht zu beschädigen. Die Vorgehensweise und Einstellungen für diese Aufnahmen sowie die Rekonstruktion der Datensätze erfolgten analog zu denen der Prä-Mikro-CT Aufnahmen.

2.10 Mikro-CT Auswertung

2.10.1 Dreidimensionale Registrierung

Um die Prä- mit den Post-Mikro-CT Aufnahmen vergleichen zu können, wurden diese mit der Software DataViewer Version 1.5.6.1 (Bruker Corporation) übereinander gelagert, sodass sie sich in allen drei Dimensionen bestmöglich fusioniert darstellten. Hierbei diente der präoperative Datensatz jeweils als Referenz. Durch Rotation und seitliches Verschieben in allen drei Ebenen wurde die postoperative Datei auf das präoperative Bild projiziert. Für alle weiteren Analysen wurden ausschließlich die überlagerten Datensätze verwendet.

2.10.2 Bestimmung des postoperativen Volumens, des Dentinabtrags und der Kompositreste

Die Bestimmung des postoperativen Wurzelkanalvolumens erfolgte analog zur Berechnung der präoperativen Volumina mit der Software CTAn V 1.20.3.0 (Bruker Corporation) und der entsprechenden Tasklist. Mit Hilfe beider Volumina wurden sowohl der Dentinabtrag als auch die Kompositreste bestimmt (CTAn V 1.20.3.0, Bruker Corporation). Hierfür wurden der präoperative Datensatz der zu Beginn festgelegten 10mm als image und der analoge postoperative Datensatz als region of interest (ROI)

geladen (Abb. 28). Die Berechnung der beiden Zielgrößen erfolgte erneut mit Hilfe einer dafür erstellten Tasklist: Kopie des präoperativen Datensatzes in clipboard (Bitwise operations, clipboard = COPY image), Subtraktion des präoperativen Wurzelkanallumens vom postoperativen Lumen für die Berechnung des Dentinabtrages (Bitwise operations, image = ROI SUB image), Berechnung des Dentinabtrages in mm^3 mit der 3D Analyse, Kopieren des ursprünglichen präoperativen Datensatzes aus dem clipboard (image = COPY clipboard), Subtraktion des postoperativen Lumens vom präoperativen Lumen für die Berechnung der Kompositreste (Bitwise operations, image = image SUB ROI) und Berechnung der Kompositreste in mm^3 mit der 3D Analyse. Mit Hilfe der Software CTVox V 3.3.0 (Bruker Corporation) können die dreidimensional überlagerten Datensätze des prä- und des postoperativen Wurzelkanallumens des festgelegten Bereichs beispielhaft visualisiert werden. (Abb. 25- 28).

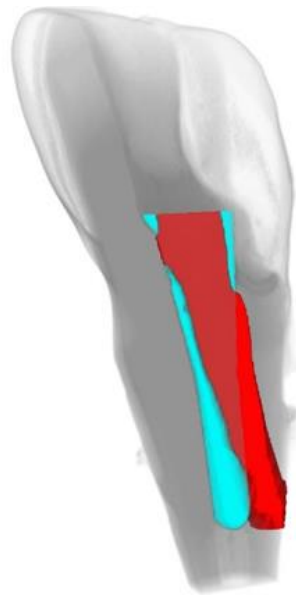


Abbildung 25: 3D-Darstellung eines Zahnes nach Überlagerung der Prä- mit den Post-Mikro-CT Aufnahmen. Der Dentinabtrag ist rot und die Kompositreste blau dargestellt.

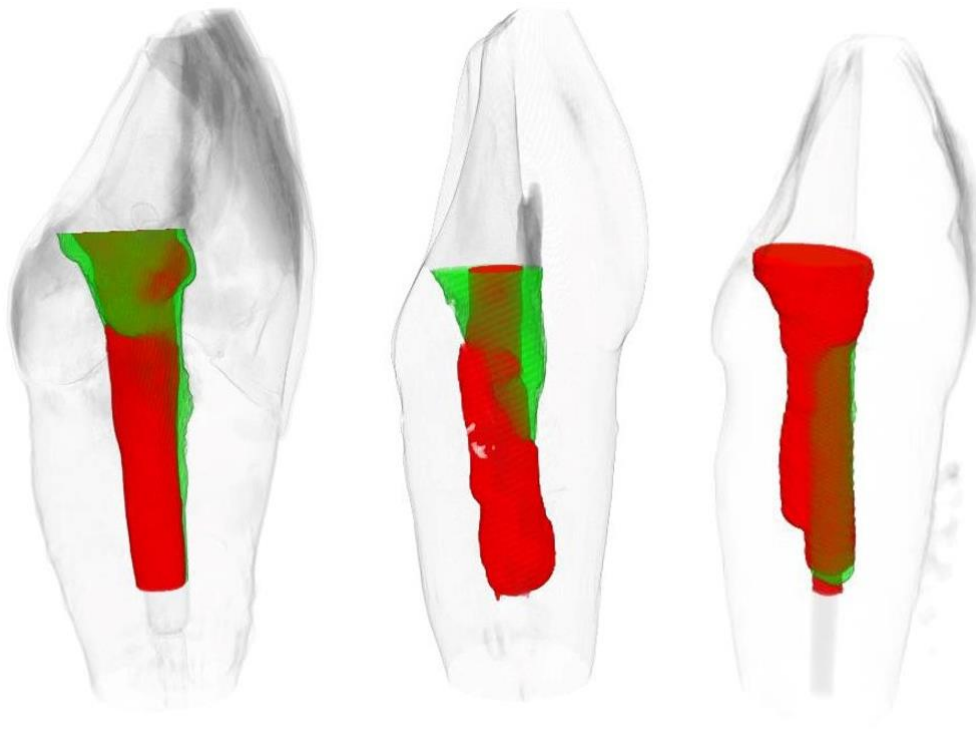


Abbildung 26: Vergleich des Dentinabtrags (rot) und der Kompositreste (grün) dreier repräsentativer Zähne in mesio-distaler Ansicht. Von links nach rechts: GE, KG und KS.

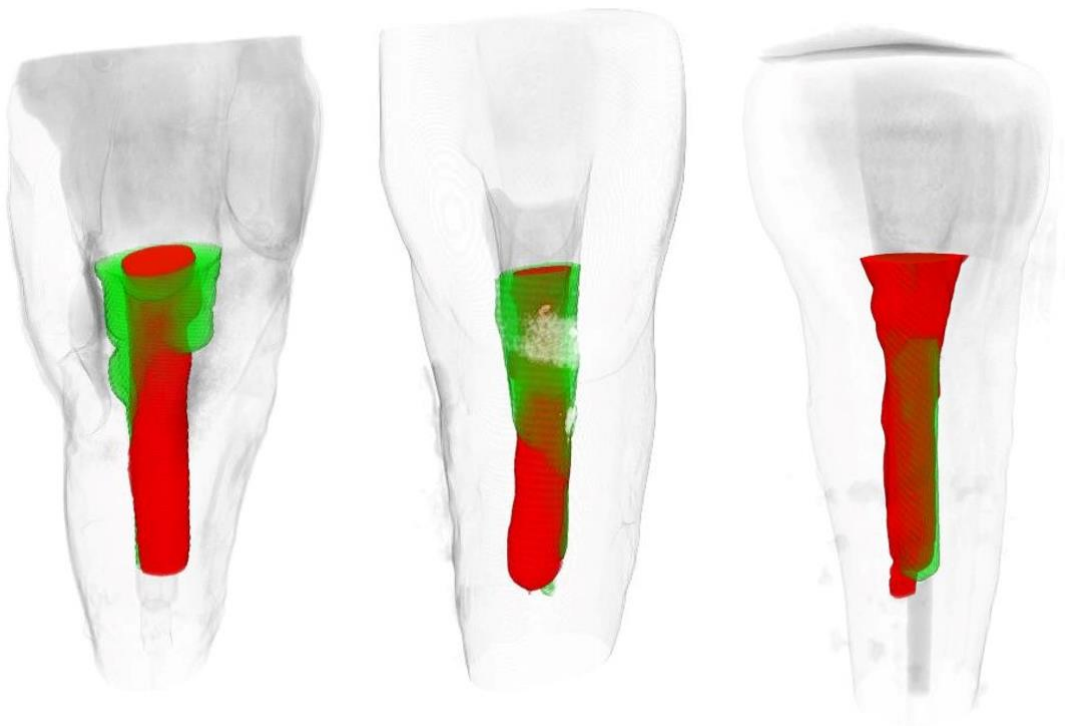


Abbildung 27 Vergleich des Dentinabtrags (rot) und der Kompositreste (grün) dreier repräsentativer Zähne in bukkal-palataler Ansicht. Von links nach rechts: GE, KG und KS.



Abbildung 28: Überlagerung beider Aufnahmen in der Software CTan. Der Dentinabtrag ist hier rot und verbliebene Kompositreste weiß dargestellt. Hellblau ist die Überschneidung beider Schichten.

2.10.3 Bestimmung von *Viae falsae* und Perforationen

Anhand der überlagerten Mikro-CT-Aufnahmen wurde festgestellt, ob eine *Via falsa* oder eine Perforation verursacht wurde. Eine *Via falsa* wurde dann notiert, wenn die Bohrachse im letzten apikalen Schnittbild komplett vom ursprünglichen Wurzelkanal unabhängig verlief, die äußere Wand jedoch unverletzt blieb (Abb. 29). War letzteres der Fall, wurde eine Perforation notiert (Abb. 30).

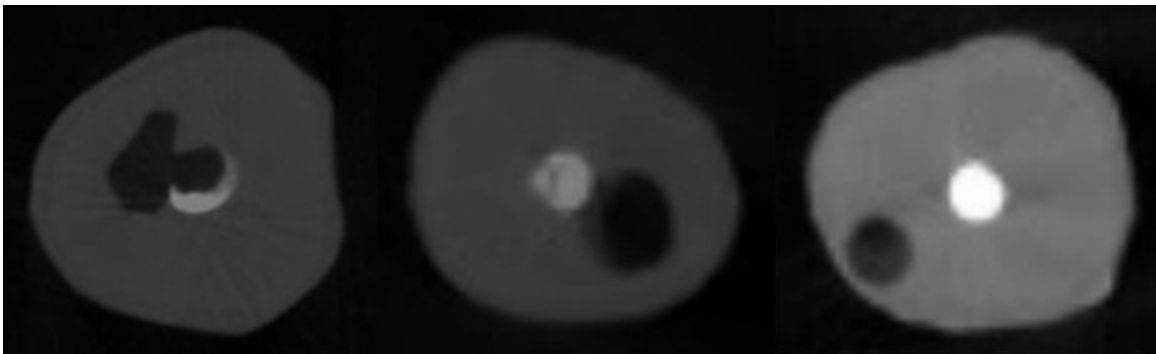


Abbildung 29: Drei repräsentative Zähne mit *Via falsa* in der Schichtaufnahme. Die Ausprägung der *Via falsa* nimmt von links nach rechts zu.

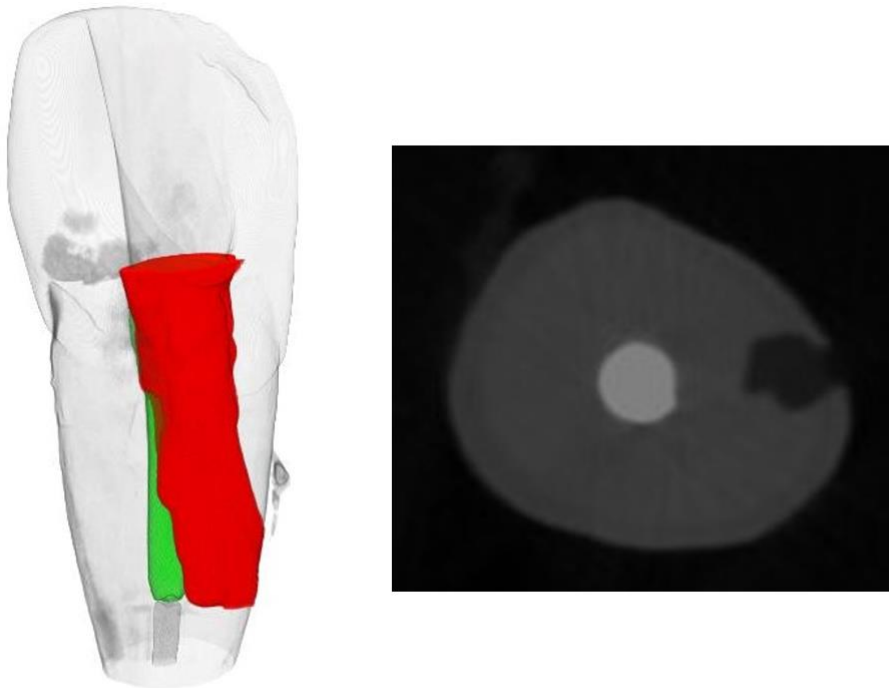


Abbildung 30: Perforation eines repräsentativen Zahnes in der bukkal-palatinalen Ansicht mit der dazugehörigen Schichtaufnahme. Der Dentinabtrag ist rot und die Kompositreste sind grün dargestellt.

2.11 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit Hilfe einer statistischen Beratung durchgeführt. Die dazu verwendete Software war SPSS Statistics Version 28.0.1.1 (IBM).

Um einen Überblick über die erzielten Ergebnisse zu erhalten, wurden die Daten zunächst deskriptiv ausgewertet. Zu diesem Zweck wurde der Mittelwert (M), der Median (Md), das Minimum (Min), das Maximum (Max), die Standardabweichung (SD) und der Standardfehler (SE) bestimmt und mit Hilfe von Tabellen und Boxplots visualisiert. Zum Erstellen der Tabellen und Diagramme wurde das Tabellenkalkulationsprogramm Excel (Version 2208, Fa. Microsoft) verwendet.

Der Kolmogorow-Smirnow-Test zur Überprüfung der Normalverteilung zeigte, dass die Normalverteilung der Variablen beim Dentinabtrag, bei den Kompositresten und bei der Zeit verletzt war mit $p < 0,05$. Zahlreiche Simulationsstudien konnten beweisen, dass die einfaktorielle Varianzanalyse relativ robust gegenüber Verletzungen der

Normalverteilungsannahme ist, vor allem, wenn die Größe der Gruppen gleich ist (Schmider et al., 2010, Lix et al., 1996, Harwell et al., 1992, Glass et al., 1972).

Deshalb wurde für die induktive Statistik die einfaktorielle Varianzanalyse benutzt. Das Signifikanzniveau beträgt $\alpha = 0,05$. Nachfolgende Post-Hoc Vergleiche wurden mit dem Tukey-HSD-Test und die Effektstärke mit Eta-Quadrat berechnet. Die Einteilung der Effektstärke erfolgt nach kleinen (s), mittleren (m) und großen (l) Unterschieden. Bei der einfaktoriellen Varianzanalyse wird die Effektgröße Eta-Quadrat in den Graden s ($\eta^2 > 0,01$), m ($\eta^2 > 0,06$) und l ($\eta^2 > 0,14$) angegeben.

3 Ergebnisse

Untersucht wurden der Dentinabtrag, die verbliebenen Kompositreste, Komplikationen und die benötigte Zeit bei Anwendung der beiden in dieser Arbeit gewählten Techniken. Als Dentinabtrag wurde das Volumen an abgetragenem Dentin definiert. Das Volumen an übriggebliebenem Befestigungskomposit wurde im Folgenden als Kompositrest bezeichnet. Als Komplikationen wurden die Via falsa und die Perforation erfasst. Eine Perforation wurde als die Abweichung von der Bohrachse (Via falsa) mit einer Verletzung und Eröffnung der äußeren Wurzeloberfläche definiert. Die Zeit wurde sowohl bei Erreichen der Guttapercha als auch nach vollständiger Entfernung des Befestigungskomposites erfasst.

3.1 Dentinabtrag

Nach der Entfernung der Glasfaserstifte und des Befestigungskomposites zeigten sich Unterschiede im Dentinabtrag zwischen den drei Entfernungsmethoden. Mit einem Mittelwert von 13,615 mm³ entfernte der Spezialist (KS) im Vergleich zum Generalisten (KG) mit 7,286 mm³ und der schablonengeführten Methode (GE) mit 5,316 mm³ nahezu doppelt so viel Substanz (Tab. 2). Die Differenz zwischen dem Mittelwert bei KG und GE galt mit 1,970 mm³ als gering, wohingegen sie zwischen KG und KS mit 6,329 mm³ und GE und KS mit 8,299 mm³ deutlich höher lag.

Tabelle 2: Dentinabtrag in mm³.

	n	Std.-			Minimum	Maximum
		Mittelwert	Abweichung	Std.-Fehler		
GE	30	5,316	2,263	0,413	2,090	13,381
KG	30	7,286	2,444	0,446	2,942	12,046
KS	30	13,615	5,764	1,052	5,992	28,290
Gesamt	90	8,739	5,208	0,549	2,090	28,290

Die einfaktorielle Varianzanalyse wurde durchgeführt, um den Einfluss von drei verschiedenen Entfernungsmethoden auf den Dentinabtrag im Dentin zu untersuchen. Es wurden drei Gruppen mit jeweils 30 Zähnen gebildet. Es lag ein statistisch

signifikanter Unterschied im Dentinabtrag zwischen den drei Gruppen vor: $F(2, 48,862) = 38,188$ mit $p < 0,001$. Somit konnte die erste Hypothese bestätigt werden. Die Effektgröße wurde mit Eta-Quadrat berechnet und ergab einen großen Effekt mit einem Wert von 0,467. Post-Hoc-Vergleiche mit Tukey-HSD Tests zeigten, dass der Mittelwert von GE ($M = 5,316$, $SD = 2,263$) sich signifikant von KS ($M = 13,615$, $SD = 5,764$) unterschied mit $p < 0,001$. Gleiches zeigte sich bei KG ($M = 7,286$, $SD = 2,444$) im Vergleich zu KS mit $p < 0,001$, wohingegen sich KG nicht von GE unterschied mit $p = 0,122$ (Abb. 31).

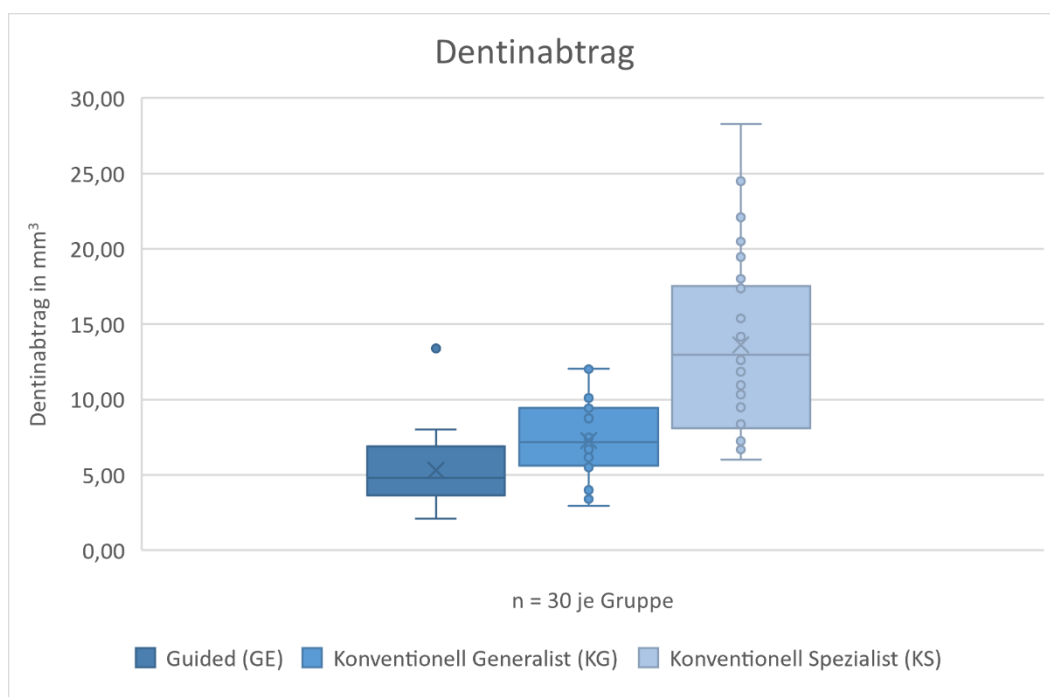


Abbildung 31: Unterschiede im Dentinabtrag im Dentin zwischen GE, KG und KS.

3.2 Kompositreste

Bei den verbliebenen Kompositresten zeigten sich nach der Entfernung der Glasfaserstifte Unterschiede in den drei Entfernungsmethoden. Mit einem Mittelwert von 3,782 mm³ wurde bei KS im Vergleich zu KG mit 8,160 mm³ und GE mit 7,242 mm³ weniger Komposit im Wurzelkanallumen registriert (Tab. 3).

Tabelle 3: Kompositreste in mm³.

	n	Std.-			Min	Max
		Mittelwert	Abweichung	Std.-Fehler		
GE	30	7,242	4,158	0,759	0,319	16,802
KG	30	8,160	2,542	0,464	3,158	12,987
KS	30	3,782	2,444	0,446	0,213	8,425
Gesamt	90	6,395	3,644	0,384	0,213	16,802

Die einfaktorielle Varianzanalyse wurde durchgeführt, um den Einfluss von drei verschiedenen Entfernungsmethoden auf die verbliebenen Kompositreste zu untersuchen. Es wurden drei Gruppen mit jeweils 30 Zähnen gebildet. Es lag ein statistisch signifikanter Unterschied hinsichtlich der verbliebenen Kompositreste zwischen allen drei Gruppen vor: $F(2, 68,097) = 16,134$ mit $p < 0,001$. Somit konnte auch die zweite Hypothese bestätigt werden. Die Effektgröße wurde mit Eta-Quadrat berechnet und ergab einen großen Effekt mit einem Wert von 0,271. Post-Hoc-Vergleiche mit Tukey-HSD Tests zeigten, dass der Mittelwert von GE ($M = 7,242$, $SD = 4,158$) sich signifikant zu KS ($M = 3,782$, $SD = 2,444$) unterschied mit $p < 0,001$. Gleiches galt bei KG ($M = 8,160$, $SD = 2,542$) im Vergleich zum KS mit $p < 0,001$, wohingegen sich KG nicht von GE unterschied mit $p = 0,122$ (Abb. 32).

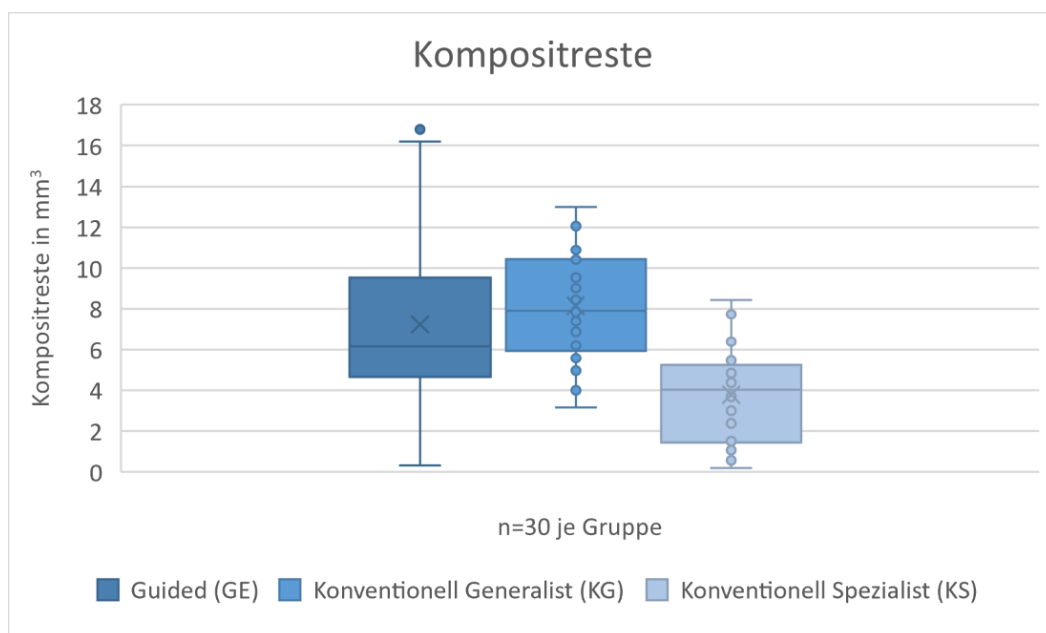


Abbildung 32: Unterschiede in den Kompositresten zwischen GE, KG und KS.

3.3 Viae falsae

Bei allen Entfernungsmethoden konnten Viae falsae festgestellt werden. Aufsteigend von GE mit vier bis zu KG mit sechs und KS mit elf Viae falsae (Tab. 4). Das Ergebnis zeigt, dass das Bohren bei der Glasfaserstiftentfernung ohne direkte Sicht oft mit einem Abweichen von der gewünschten Bohrachse einhergeht. Selbst bei der schablonengeführten Methode konnte die ursprünglich geplante Bohrachse nicht immer eingehalten werden und es kam zu vier Viae falsae.

Tabelle 4: Verteilung der Viae falsae.

		Via falsa Nein	Via falsa Ja	Gesamt
GE	Anzahl	26	4	30
	% von G	86,7%	13,3%	100,0%
	% von Via falsa Nein oder Ja	37,7%	19,0%	33,3%
KG	Anzahl	24	6	30
	% von KG	80,0%	20,0%	100,0%
	% von Via falsa Nein oder Ja	34,8%	28,6%	33,3%
KS	Anzahl	19	11	30
	% von S	63,3%	36,7%	100,0%
	% von Via falsa Nein oder Ja	27,5%	52,4%	33,3%
Gesamt	Anzahl	69	21	90
	% von allen drei Methoden	76,7%	23,3%	100,0%
	% von Via falsa Nein oder Ja	100,0%	100,0%	100,0%

Der Pearson Chi-Quadrat Test für Unabhängigkeit wurde durchgeführt und zeigte, dass es in den drei verschiedenen Entfernungsmethoden keinen signifikanten Unterschied in der Anzahl der Viae falsae gab, $\chi^2(2, n = 90) = 4,845$, $p = 0,089$ (Abb. 33). Die dritte Arbeitshypothese wurde somit abgelehnt. Das Ergebnis zeigt, dass bei jeder der drei Methoden Viae falsae auftreten können.

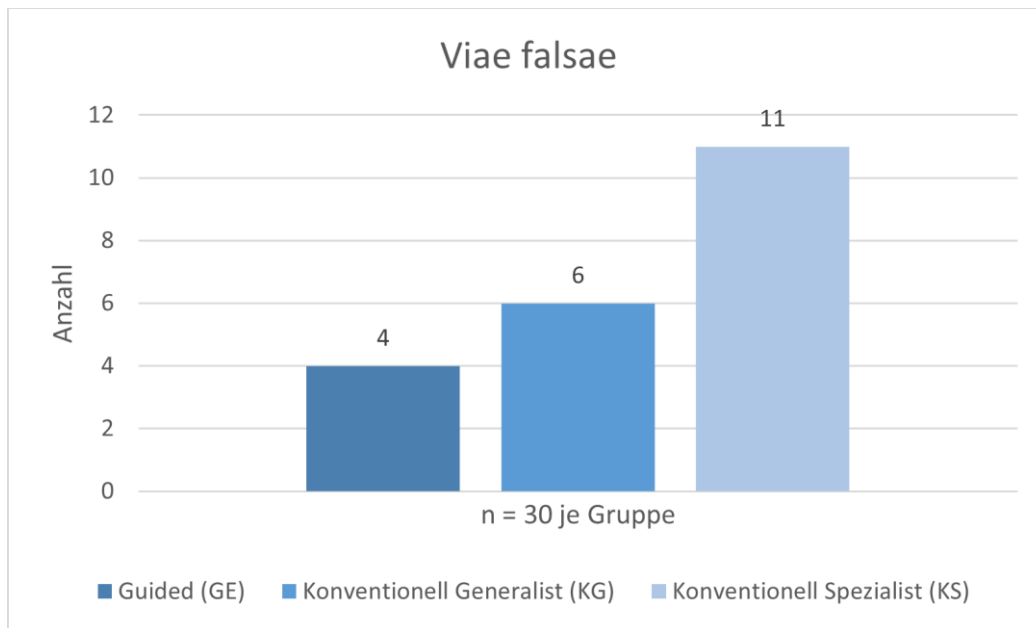


Abbildung 33: Anzahl an Viae falsae bei GE, KG und KS.

3.4 Perforationen

Bei der Anzahl an Perforationen gab es einen Unterschied zwischen den drei Methoden. Bei GE konnten im Vergleich zu KG und KS keine Perforationen festgestellt werden (Tab. 5). Die vier Viae falsae bei GE resultierten nicht in einer Perforation, wohingegen es bei KG von den sechs Viae falsae zu vier Perforationen und bei KS von den elf Viae falsae zu sechs Perforationen kam. Das Ergebnis zeigt, dass mit der schablonengeführten Methode, trotz möglicher Viae falsae, Perforationen sicher vermieden werden können.

Tabella 5: Verteilung der Perforationen bei GE, KG und KS.

		Perforation Nein	Perforation Ja	Gesamt
GE	Anzahl	30	0	30
	% von G	100,0%	0,0%	100,0%
	% von Perforation Nein oder Ja	37,5%	0,0%	33,3%
KG	Anzahl	26	4	30
	% von KG	86,7%	13,3%	100,0%
	% von Perforation Nein oder Ja	32,5%	40,0%	33,3%
KS	Anzahl	24	6	30
	% von S	80,0%	20,0%	100,0%
	% von Perforation Nein oder Ja	30,0%	60,0%	33,3%
Gesamt	Anzahl	80	10	90
	% von allen drei Methoden	88,9%	11,1%	100,0%
	% von Perforation Nein oder Ja	100,0%	100,0%	100,0%

Der Pearson Chi-Quadrat Test für Unabhängigkeit wurde durchgeführt und zeigte, dass es in den drei verschiedenen Entfernungsmethoden einen signifikanten Unterschied in der Anzahl der Perforationen gab, $\chi^2(2, n = 90) = 6,3$, $p = 0,043$ mit einem kleinen Effekt für Cramers $V = 0,265$ (Abb. 34). Mit dieser Aussage konnte die vierte Hypothese bestätigt werden.

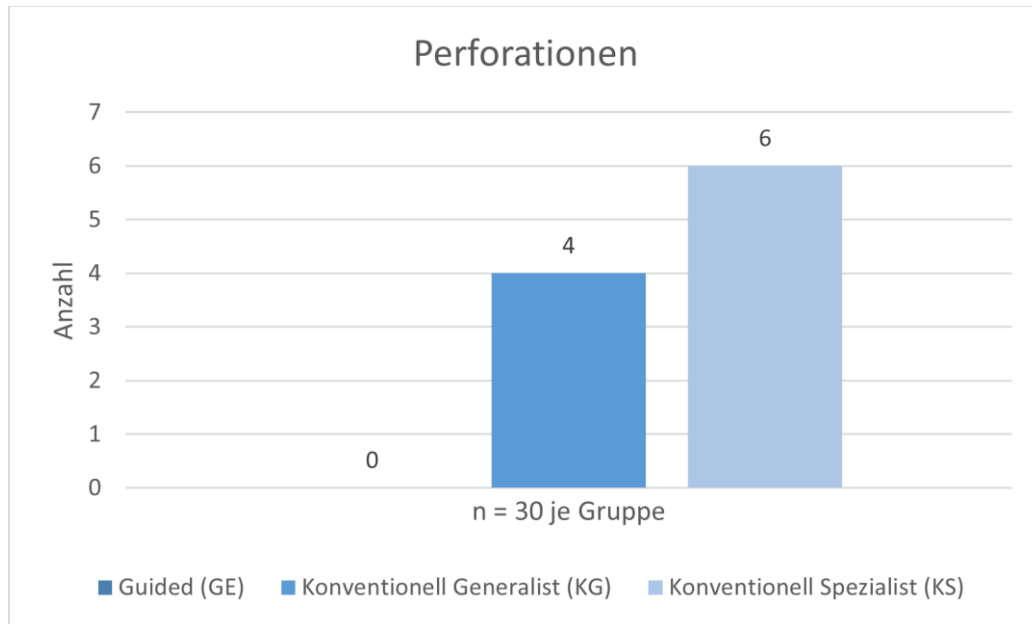


Abbildung 34: Anzahl der Perforationen bei GE, KG und KS.

3.5 Zeit

Um die Effizienz der drei Methoden zu untersuchen, wurden zwei Zeitmessungen durchgeführt. Die erste Zeit wurde erfasst, sobald die Wurzelkanalfüllung mit Guttapercha erreicht wurde. Die zweite Zeitmessung erfolgte nach vom Behandler erachteter vollständiger Entfernung des Glasfaserstiftes und des Befestigungskomposites.

3.5.1 Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha

Mit GE konnte der Glasfaserstift am effizientesten entfernt und die Guttapercha erreicht werden. Der Mittelwert von GE lag bei 3,050 min, bei KG bei 6,057 min und bei KS bei 4,958 min (Tab. 6).

Tabelle 6: Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha in min.

	n	Std.-			Minimum	Maximum
		Mittelwert	Abweichung	Std.-Fehler		
GE	30	3,050	1,675	0,306	1,580	10,670
KG	30	6,057	1,817	0,332	3,730	10,160
KS	30	4,958	2,951	0,539	2,000	12,130
Gesamt	90	4,689	2,528	0,266	1,580	12,130

Die einfaktorielle Varianzanalyse wurde durchgeführt, um den Einfluss von drei verschiedenen Entfernungsmethoden auf die Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha zu untersuchen. Es wurden drei Gruppen mit jeweils 30 Zähnen gebildet. Es gab einen statistisch signifikanten Unterschied in der Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha zwischen den drei Gruppen: $F(2, 67,284) = 14,060$ mit $p < 0,001$. Somit konnte der erste Teil der fünften Arbeitshypothese bestätigt werden. Die Effektgröße wurde mit Eta-Quadrat berechnet und ergab einen großen Effekt mit einem Wert von 0,244. Post-Hoc-Vergleiche mit Tukey-HSD Tests zeigten, dass der Mittelwert von GE ($M = 3,050$, $SD = 1,675$) sich signifikant zu KG ($M = 6,057$, $SD = 1,817$) und KS ($M = 4,958$, $SD = 2,951$) unterschied mit $p < 0,001$. Es gab keinen signifikanten Unterschied für den Mittelwert von KG zu KS mit $p = 0,141$ (Abb. 35).

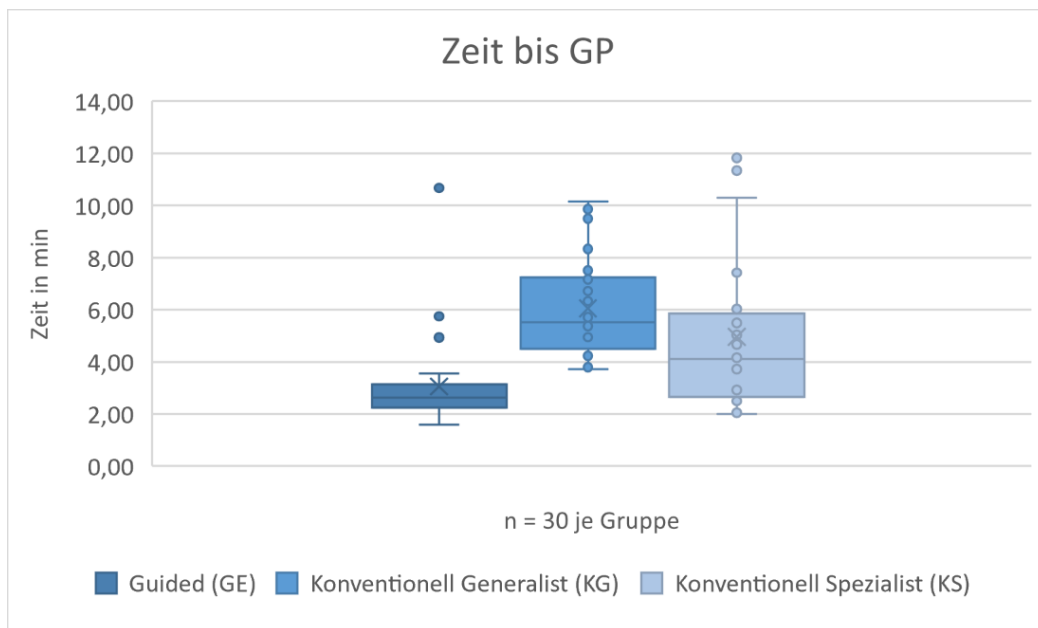


Abbildung 35: Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha.

3.5.2 Zeit bis zur vollständigen Entfernung des Komposits

Nachdem die Guttapercha erreicht und die Zeit erfasst wurde, wurde die Zeitmessung bis zur vollständigen Entfernung von Glasfaserstift und Befestigungskomposit fortgesetzt. Der Mittelwert bei GE lag bei 5,882 min, bei KG bei 7,012 min und bei KS bei 6,874 min (Tab. 7).

Tabelle 7: Zeit bis zur vollständigen Entfernung von Glasfaserstift und Befestigungskomposit in min.

	n	Std.-		Minimum	Maximum	
		Mittelwert	Abweichung			
GE	30	5,882	1,096	0,200	4,250	10,670
KG	30	7,012	1,736	0,317	4,500	11,620
KS	30	6,874	4,041	0,738	2,330	21,260
Gesamt	90	6,589	2,637	0,278	2,330	21,260

Die einfaktorielle Varianzanalyse wurde durchgeführt, um den Einfluss von drei verschiedenen Entfernungsmethoden auf die Zeit bis zur o.g. vollständigen Entfernung zu untersuchen. Es wurden drei Gruppen mit jeweils 30 Zähnen gewählt. Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Zeit bis zur o.g. vollständigen Entfernung zwischen den drei Gruppen: $F(2, 44, 165) = 1,665$ mit $p = 0,201$. Somit musste der zweite Teil der fünften Arbeitshypothese abgelehnt werden (Abb. 36).

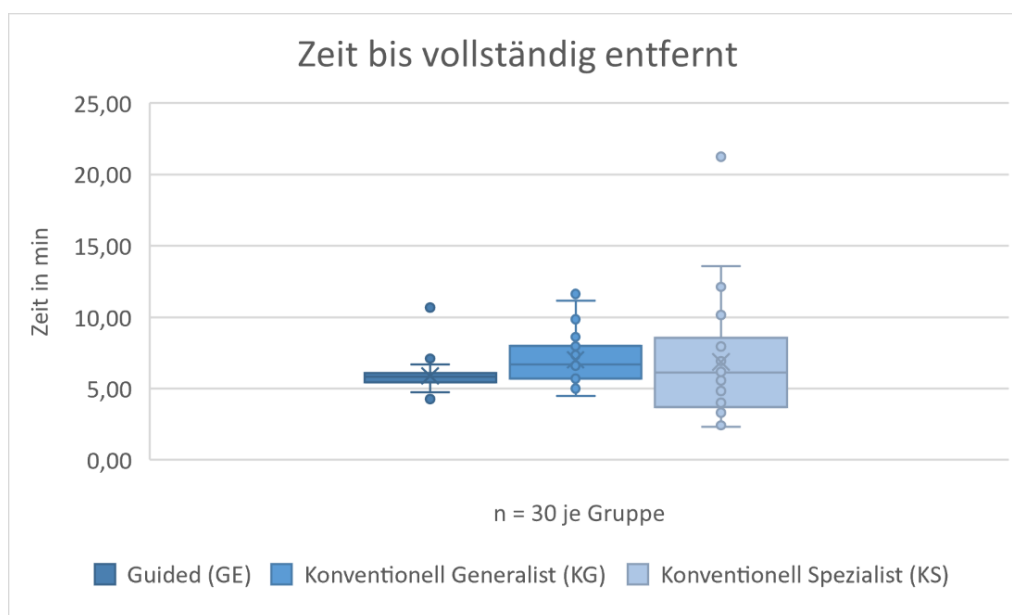


Abbildung 36: Zeit bis zur vollständigen Entfernung.

4 Diskussion

Der gegenwärtigen schwachen Studienlage lässt sich entnehmen, dass die schablonengeführte Entfernung von Glasfaserstiften bisher als eine experimentelle Technik beurteilt werden muss. Sie kann jedoch nach jüngsten Erkenntnissen als eine prinzipiell effektive Methode mit hoher Präzision und guter Vorhersagbarkeit hinsichtlich des Erzielens des Endpunktes im Wurzelkanal angesehen werden (Perez et al., 2021). Unter der Annahme, dass in den letzten drei Jahrzehnten konfektionierte Glasfaserstifte anstelle von gegossenen Metallstiften bevorzugt verwendet wurden (Giroto et al., 2021), wurde sich in dieser Arbeit gezielt auf die verschiedenen Techniken der Entfernung von Glasfaserstiften fokussiert. In bisherigen Studien zur Glasfaserstiftentfernung wurden sowohl die konventionellen Methoden untereinander verglichen (Lindemann et al., 2005, Gesi et al., 2003, Anderson et al., 2007, de Rijk, 2000, Castrisos and Abbott, 2002) als auch die schablonengeführte Methode ohne Vergleichsgruppen untersucht (Maia et al., 2022, Alfadda et al., 2022, Cho et al., 2021, Perez et al., 2021, Perez et al., 2020). Es lag zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit keine Studie vor, die die konventionelle mit der schablonengeführten Methode anhand klinisch relevanter Parameter wie Zahnhartsubstanzverlust und Komplikationsraten verglichen hat.

Das Ziel dieser ex-vivo Studie war es daher, erstmals so standardisiert wie möglich die schablonengeführte Entfernung von im Wurzelkanal befestigten Glasfaserstiften mit einer konventionellen Methode in humanen Zähnen zu vergleichen. Außerdem wurde bei der konventionellen Methode zwischen einem Spezialisten für Endodontologie und einem Generalisten mit einjähriger Berufserfahrung unterschieden. Verglichen wurden bei dieser Untersuchung technik- und behandlerabhängig der Dentinabtrag, die verbliebenen Befestigungskompositanteile, aufgetretene Komplikationen wie *Via falsa* oder Perforation sowie die benötigte Zeit bis zum Erreichen der Wurzelkanalfüllung und die bis zur vollständigen Kompositentfernung.

4.1 Diskussion Material und Methoden

4.1.1 Humane Zähne versus Kunststoffreplika

Zu Beginn dieser Studie wurden extrahierte humane Zähne unter strenger Einhaltung und Beachtung spezifischer Kriterien gesammelt, um möglichst homogene Bedingungen bei der Stiftentfernung herstellen zu können. Ausgewählt wurden ausschließlich einwurzelige mittlere Oberkieferfrontzähne mit einem geraden, unversehrten, nicht präparierten Wurzelkanal und einer klinisch intakten, möglichst vollständigen Zahnkrone.

In anderen vorliegenden Studien zu dieser Thematik wurden einwurzelige Zähne unabhängig vom Zahntyp eingeschlossen (Haupt et al., 2018, Anderson et al., 2007). Aufgrund der anatomischen Vielfalt in Größe und Form humaner Zähne sowie ihrer verschiedenen endodontischen Morphologien (Vertucci, 1984) gibt es per se morphologisch spezifische Unterschiede, die die Resultate einer studienbedingten Stiftentfernung generell beeinflussen könnten. Es ist bekannt, dass identische aus Kunststoff gefertigte Zahnreplika das höchste Maß an Standardisierung bieten können. Standardisierte Kunststoffreplika wurden auch für die Ermittlung des Substanzverlustes bei der statischen Navigation in der Studie von Connert et al. (Connert et al., 2019) verwendet. Es konnte die Machbarkeit und der geringere Substanzverlust bei der schablonengeführten Wurzelkanalerschließung im Vergleich zu konventioneller Technik an Zähnen mit simulierter Obliteration nachgewiesen werden. Mit der Prämisse, die in der hier vorliegenden Studie erfolgte Entfernung von Glasfaserstiften an extrahierten Inzisivi so klinisch relevant wie nur möglich durchzuführen, wurde vorab das Studiendesign derart festgelegt, um das typische klinische Procedere von Präparation, Obturation und Stiftinsertion im Wurzelkanal humaner Zähne nachzuahmen. Zudem erschien es von Vorteil, die optisch und haptisch einzigartigen Charakteristika von humanem Dentin nutzen zu können. Im Gegensatz hierzu sind Kunststoffreplika, trotz zahlreicher dem Dentin ähnlicher Materialparameter und ihrer Vielfalt auf dem Dentalmarkt (Reymus et al., 2020), grundsätzlich farblich homogen. Es fehlen Spezifikationen von humanem Dentin wie Farbverlauf, Reflexionsvermögen oder mineralisches Erscheinungsbild. Die markante Charakteristik von humanem Dentin (im Gegensatz zu Kunststoff) als Unterscheidungskriterium zur Glasfaser wurde ebenfalls als eine äußerst wichtige Vorbedingung in dieser Studie angesehen. Somit konnten die in dieser Studie gewählten Techniken mit dem Anspruch einer hohen Vergleichbarkeit zur klinischen Situation angewandt werden.

4.1.2 Lagerung und endodontisches Protokoll

Die humanen Zähne wurden für die Dauer der Studie in 1%iger Chloramin-T Lösung gelagert. Diese Lösung erwies sich auch bei Anderson et al. als geeignetes Lagerungsmedium (Anderson et al., 2007). Alternative Lagerungsmedien wie zum Beispiel Leitungswasser oder physiologische Kochsalzlösung sind ebenfalls beschrieben worden (Gesi et al., 2003). Die Wurzelkanalpräparation, die Obturation und die Stiftbettbohrung erfolgten anhand eines standardisierten Protokolls (siehe Abb. 37).

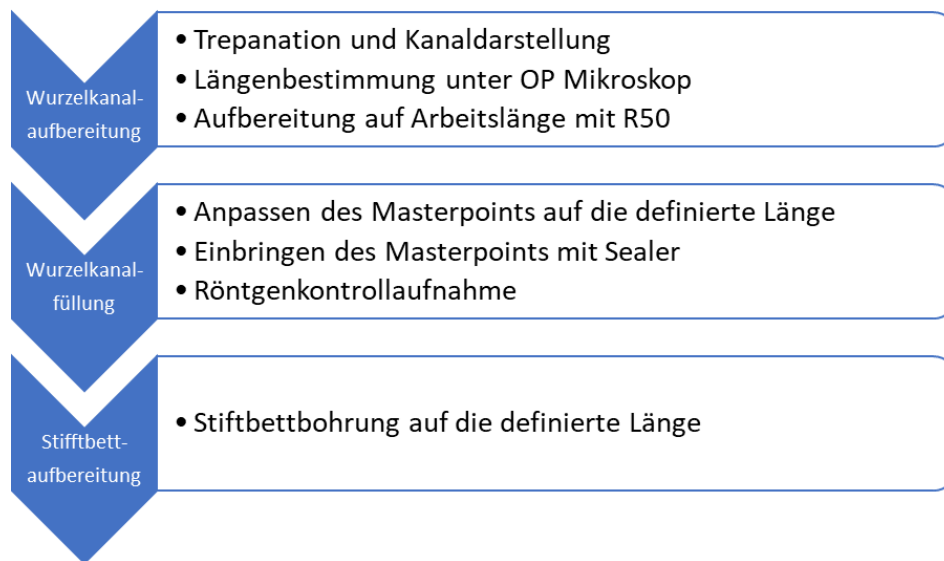


Abbildung 37: Protokoll der standardisierten endodontischen Behandlung bestehend aus Präparation, Obturation und Stiftbettbearbeitung im Wurzelkanal.

4.1.3 Auswahl humaner Zähne und Anzahl

Anschließend wurde von 110 Zähnen eine Prä-Mikro-CT Aufnahme angefertigt und ihre Volumina quantifiziert. Von den ursprünglich 110 Zähnen eigneten sich nur noch 90 Zähne für die Versuche, da 20 Zähne erhebliche Substanzdefekte wie Wurzellängsfrakturen, Kronenfrakturen oder andere Zahnhartsubstanzanomalien aufwiesen. Diese Irregularitäten widersprachen dem Ziel einer geeigneten Standardisierung des Zahnmaterials und hätten die Untersuchungsergebnisse womöglich erheblich verzerren können. Die verbliebenen 90 Zähne wurden homogen hinsichtlich ihres Wurzelkanalvolumens zu jeweils 30 Zähnen auf drei Gruppen aufgeteilt. Die Zahnanzahl blieb aus Gründen der äußerst schwierigen Beschaffung von Zähnen mit den oben genannten Kriterien limitiert, erschien jedoch als akzeptabel und ausreichend. Im Vergleich dazu gibt es eine einzige Untersuchung, die im Rahmen eines proof-of-concepts einzig die schablonengestützte Stiftentfernung evaluiert mit hierfür nur 40 eingeschlossenen Zähnen (Perez et al., 2021). In der Studie von Haupt et al. wurden pro Gruppe einer spezifischen konventionellen Technik der Stiftentfernung 51 Zähne verwendet (Haupt et al., 2018).

4.1.4 Auswahl und Vorbehandlung des Glasfaserstifts

In der hier vorliegenden Arbeit wurden die Glasfaserstifte (DT-Light Post #3, VDW GmbH) einheitlich auf eine Länge von 10mm gekürzt und nach Herstellerangaben eingesetzt. Geringfügige Abweichungen in Höhe und Neigung zur Bohrachse könnten aufgrund eines Verkantens des Glasfaserstifts beim Einbringen in den Wurzelkanal aufgetreten sein. Dies wurde bestmöglich dadurch verhindert, indem der passgenaue Sitz und die Achse des Stiftes vor dem adhäsiven Einsetzen geprüft und die Ausrichtung ohne eingebrachtes Befestigungskomposit getestet und eingeübt wurden.

In dieser Studie wurden verschiedene Techniken zur Entfernung eines einzigen Typs von Glasfaserstift (DT-Light Post #3, VDW GmbH) verglichen. In der Studie von Anderson et al. (Anderson et al., 2007) wurde die Glasfaserstiftentfernung anhand zweier Stifte von unterschiedlichen Herstellern (D.T. Light-Post , Bisco Dental und ParaPost FiberLux, Coltène/Whaledent) untersucht ohne einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen. Lindemann et al. (Lindemann et al., 2005) untersuchten die Entfernung von vier verschiedenen Glasfaserstiften (ParaPost XH, Coltène/Whaledent, ParaPost Fiber White, Coltène/Whaledent, Luscent Anchors, Dentatus und Aestheti-Plus, Komira) in Prämolaren. Eine aktuellere Studie von Haupt et al. (Haupt et al., 2018) vergleicht die Entfernung von Glasfaser-, Quarzfaser- und Karbonfaserstiften aus Wurzelkanälen. Die prinzipiell als gering geltenden Unterschiede in der Materialzusammensetzung eines konventionellen Glasfaserstiftes führten zu der Entscheidung sich in der hier vorliegenden Studie auf einen einzigen Typ Glasfaser zu beschränken.

4.1.5 Procedere Glasfaserstiftentfernung bezüglich bildgebender Diagnostik

Vor der konventionellen Entfernung der Glasfaserstifte lag von jedem Zahn ein Ausgangsröntgenbild vor, um die Lage des im Modell befindlichen Zahnes und den eingesetzten Stift hinsichtlich Achse, Ausdehnung und Tiefe innerhalb des Zahnes und in Relation zur Zahnwurzel beurteilen zu können. Da diese Ausgangsaufnahme nur ein zweidimensionales Abbild liefert, wäre auch eine zusätzliche dreidimensionale Aufnahme mittels digitaler Volumentomographie (DVT) zur Orientierung und Einschätzung der Ausrichtung des Stiftes denkbar gewesen. Im klinischen Alltag muss abgewogen werden, ob in diesem Fall ein diagnostischer Mehrwert mit Hilfe einer DVT-Aufnahme erzielt werden kann. Die durch ein DVT verursachte relativ hohe

Strahlenbelastung von 13-82 μSv , in Abhängigkeit von der gewählten Auflösung und des Volumens, ist im Gegensatz zu den dentalen Standardbildgebungsverfahren, insbesondere dem Einzelzahnfilm, bekannt (Dawood et al., 2009). Gegebenenfalls könnte vorab eine zweite exzentrische Zahnfilmaufnahme eine hilfreiche bildgebende Zusatzmaßnahme darstellen, falls eine DVT-Bildgebung nicht gewünscht wird oder unbedingt vermieden werden soll. Konventionelle Zahnfilme mit ihren zweidimensional bedingten Befunden spiegeln generell das typische Bildgebungsverfahren wider, um im klinischen Alltag eine Glasfaserstiftentfernung vorab beurteilen und schließlich technisch adäquat durchführen zu können.

4.1.6 Procedere Glasfaserstiftentfernung bezüglich praktischer Durchführung

Die konventionelle Technik zur Entfernung der Glasfaserstifte basierte auf der Anwendung eines diamantierten Bohrers und Langschaftrosenbohrern im Winkelstück. Ihre Verfügbarkeit als typisches Standardinstrumentarium für Winkelstück oder Turbine darf in zahnärztlichen Kliniken und Praxen als generell hoch bis sehr hoch angesehen werden. Prinzipiell könnten auch spezielle Entfernungskits (Anderson et al., 2007, AlShabib et al., 2022, Haupt et al., 2022) für Glasfaserstifte zum Einsatz kommen, die allerdings aufgrund der schwachen Nachfrage nur in geringen Stückzahlen produziert oder inzwischen von den Herstellern nicht mehr angeboten werden. Außerdem erwies sich die Wahl von Standardinstrumenten für die konventionelle Methode zur Entfernung von Glasfaserstiften als sehr effizient (Gesi et al., 2003). Das Freilegen und Mobilisieren von zementierten Metallstiften erfolgt häufig mit Unterstützung von Ultraschallinstrumenten. Diese Technik hat sich in den genannten Fällen als sehr effizient erwiesen im Gegensatz zu ihrer Anwendung bei adhäsiv befestigten Stiften (Gomes et al., 2001). In dieser Studie wurden diamantierte Ultraschallaufsätze lediglich dazu verwendet, um nach dem sukzessiven Abtragen der Glasfaserstifte verbliebene Kompositreste an den Wurzelkanalwänden unter direkter Sicht entfernen zu können. Als effektiv erwies sich dies auch bei der Entfernung von Glasfaserstiften mit speziellen Entfernungskits und anschließendem Einsatz von Ultraschallinstrumenten (Lindemann et al., 2005). Der Endpunkt einer suffizienten Glasfaserstiftentfernung wurde visuell mittels Lupenbrille und in den Wurzelkanal fokussiertem Licht kontrolliert. Hierbei wurde versucht die unvermeidliche Unschärfe an mikroskopisch verbliebenen Glasfaseranteilen an der Wurzelkanalwand gering zu halten. Diese ist vermutlich auch im klinischen Alltag in recht ähnlichem Ausmaß anzutreffen und kann als relativ unvermeidbar gelten bei visueller Kontrolle.

4.1.7 Software Guided Endodontics

Für die schablonengeführte Methode wurden von der entsprechenden Kieferregion eine DVT-Aufnahme und ein Oberflächenscan angefertigt. Der Oberflächenscan wurde mit einem hochauflösenden Intraoralscanner durchgeführt und weist ähnliche Genauigkeitswerte wie bei einem indirekten Scan mit einem Laborscanner auf (Muallah et al., 2017). Eine eigene Studie aus unserer Arbeitsgruppe (Krug et al., 2020a) zeigte auch, dass sich die Genauigkeit und der Zeitaufwand verschiedener Planungssoftwares (CoDiagnostiX versus Sicat Endo) nicht wesentlich unterscheiden. Somit wurde in dieser Arbeit die Software coDiagnostiX 9.0 von Dental Wings verwendet. Die Auswahl des Bohrers für die schablonengeführte Methode ist dadurch limitiert, dass der Bohrer ein zylindrisches Design besitzen muss und somit Langschaftrosenbohrer, die in der Regel konisch verlaufen, nicht angewendet werden konnten. Es wurden speziell auf die Bohrhülsen angepasste zylindrische Bohrer der Firma Atec Dental benutzt, welche bei obliterierten Wurzelkanälen mittlerweile etabliert sind (Krug et al., 2020a, Connert et al., 2019, Krastl et al., 2016). Die Bohrung durch den Glasfaserstift birgt gewisse Risiken, insbesondere die einer übermäßigen Hitzeentwicklung innerhalb der Zahnwurzel bei zu geringer oder insuffizienter Wasserkühlung. Es wurde daher auf eine ausreichende stetige Wasserkühlung bei intermittierender Arbeitsweise mit einer Bohrung von nur wenigen Sekunden abwechselnd mit der wiederholten Spülung des Bohrpfad geachtet. Spätestens nach einer Bohrtiefe von zwei – drei mm wurde abgesetzt und eine Zwischenspülung mit physiologischer Kochsalzlösung durchgeführt, bevor die weitere Bohrung um weitere wenige Millimeter fortgesetzt wurde. Im Vergleich zur optionalen Mehrfachanwendung der Atec-Bohrer bei obliterierten Wurzelkanälen im Dentin oder Kunststoff wurde hier stets ein neuer Bohrer für die Entfernung eines jeden Glasfaserstiftes eingesetzt. Bereits im Verlauf einer einzigen Bohrung zeigte sich eine erhebliche Reduktion der Schneidleistung. Dies konnte visuell mit der Vergrößerungshilfe einer Lupenbrille als eine deutliche Kantenabnutzung an der Bohrerschneide und -spitze erkannt werden. Die Verwendung stets neuwertiger Bohrer stellte ebenfalls einen relevanten Aspekt dar, eine möglichst hohe Standardisierung bei der Durchführung der statischen Navigation erzielen zu können.

4.1.8 Indikationen Guided Endodontics

Als Limitation der schablonengeführten Technik gilt ihre Anwendung im Seitenzahnbereich. Im Gegensatz zum Frontzahnbereich erschien der interokklusale Abstand im KaVo Dentaler Patientensimulator als ungenügend für den Bedarf von

mindestens fünf Millimeter für die Höhe der Bohrhülse plus die Arbeitslänge des Bohrers von 21 mm für seine Insertion in die Hülse. Buchgreitz et al. zeigte aber, dass die Guided Endodontics Technik zur Erschließung von Wurzelkanälen auch im Seitenzahnbereich bei Molaren gelingen kann (Buchgreitz et al., 2019). Zudem könnte analog für die Entfernung eines Glasfaserstiftes bereits bei der virtuellen Planung berücksichtigt werden, die Hülse durch axiale Verlagerung in Richtung des Bohrpfadestiefen in die Zahnkrone zu positionieren. Somit würde sich die Limitation ihrer Indikation im Seitenzahnbereich erheblich relativieren lassen. In einer Studie von Perez et al. konnten adhäsiv befestigte Glasfaserstifte aus distalen Kanälen von Unterkiefer Molaren und palatinalen Kanälen von Oberkiefer Molaren entfernt werden (Perez et al., 2021).

4.1.9 Einfluss des Behandlers bei Guided Endodontics

Das Konzept von Guided Endodontics basiert auf der schablonengeführten Implantatbettbohrung in der Implantologie. Schablonengeführte Techniken gelten sowohl als relativ konstant reproduzierbar als auch als tendenziell unabhängig vom Behandler. Mit Hilfe der präoperativen Planung einer Bohrachse und der Anfertigung einer Schablone wird eben diese Bohrachse im dreidimensionalen Raum während der klinischen Praxis weitgehend festgelegt. Es wurden Abweichungen am Endpunkt der Bohrung in humanen Zähnen zur Erschließung von Wurzelkanälen im Bereich von durchschnittlich 0,17 – 0,47 mm gemessen sowie einer mittleren Winkelabweichung von 1,81 Grad (Zehnder et al., 2016). Die Behandler hingegen könnten sich in ihrer spezifischen klinischen Erfahrung und ihrer Expertise unterscheiden. Eine weitere Studie zeigte deutlich, dass sich mittels Guided Endodontics apikale Wurzelkanalanteile vom Behandler unabhängig sicher und zügig erschließen lassen, wohingegen es bei der konventionellen Methode große Unterschiede je nach Behandlerexpertise für das Ausmaß an Substanzverlust gab (Connert et al., 2019). Diese Erkenntnis wurde auf die hier vorliegende Studie übertragen, so dass es als ausreichend und zweckmäßig erschien, die schablonengeführte Glasfaserstiftentfernung nur von einem einzigen Behandler durchzuführen.

4.1.10 Bildgebung mittels Mikro-CT

Die Aufnahmen für die dreidimensionale Darstellung und die quantitative Erfassung der Volumenparameter erfolgte mit einem Mikro-CT.

Dies ist ein Alleinstellungsmerkmal dieser Studie im Vergleich zu anderen Studien zum Thema Guided Endodontics. Die Auswertung des Substanzverlustes basiert in vergleichbaren Studien auf DVT-Aufnahmen (Zehnder et al., 2016, Krastl et al., 2016,

Koch et al., 2022, Connert et al., 2019, Buchgreitz et al., 2019) oder auf reine Bestimmung des Gewichtsverlustes (Kostunov et al., 2021). Gesi et al. evaluierten die Effektivität der Stiftentfernung mit zwei unterschiedlichen konventionellen Methoden nur anhand der dafür benötigten Zeit (Gesi et al., 2003). In einer Studie von AlShabib et al. wurden ebenfalls zwei konventionelle Methoden verglichen. Die Auswertung erfolgte hier mit Mikro-CT Aufnahmen.

Mikro-CT Aufnahmen bieten eine hohe Detailtreue, standardisierte Messparameter und eine gute Reproduzierbarkeit bei den einzelnen Scans.

Aufgrund der gewählten Voxelgröße können Artefaktfehler wie z.B. der partielle Volumeneffekt auftreten, der dadurch charakterisiert ist, dass das Voxel zu groß ist und zwei verschiedene Medien oder Gewebe sich überlappen (Erlandsson et al., 2012). Dies betrifft in dieser Studie die Grenzfläche zwischen Dentin und Luft im Wurzelkanal. Die Voxel würden partiell dem falschen Gewebe zugerechnet werden, sodass das gemessene Volumen in der Volumetrie entweder zu groß oder zu klein bestimmt werden würde. Da sich dieser Fehler aber über alle drei Gruppen hinwegzieht, sind die Gruppen immer noch vergleichbar.

Durch die Rotation beim Scanvorgang können Fehler an der Detektorplatte des Scanners zu Ringartefakten führen, die durch die Rekonstruktion des Datensatzes teilweise kompensiert werden, aber dennoch zu Beeinträchtigungen bei der Visualisierung des Datensatzes führen.

Da die Positionierung des Zahnes im Scanner bei den beiden Aufnahmen nicht genau reproduziert werden konnte, war es notwendig, eine dreidimensionale Registrierung der beiden Scans durchzuführen. Das Programm Data Viewer überlagerte die Scans zunächst rechnerisch und wurde durch die visuelle Feinjustierung für jeden Datensatz ergänzt, wobei eine gewisse Subjektivierung bei der Überlagerung entstand.

Für die Berechnung der Testparameter wurden alle Datensätze in Binärbilder umgewandelt. Eine klare Unterscheidung zwischen dem Medium Luft und Dentin konnte dadurch vorgenommen werden. Die Berechnungsgrenzen des Volumens im Wurzelkanal wurden genau definiert. Es wurde der Bereich von 10 mm koronal von der Guttaperchafüllung gewählt.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 Dentinabtrag

Interessanterweise ist in der vorliegenden Studie der Dentinabtrag beim Spezialisten signifikant höher als beim Generalisten oder bei der schablonengeführten Methode. Als

Dentinabtrag wurde das Volumen an abgetragenen Dentin in der im Kapitel 2.8 gesetzten *region of interest* definiert. Mit einem Mittelwert von 13,615 mm³ entfernte der Spezialist (KS) im Vergleich zum Generalisten (KG) mit 7,286 mm³ und der schablonengeführten Methode (GE) mit 5,316 mm³ nahezu doppelt so viel gesunde Zahnhartsubstanz. Der Spezialist scheint hierbei akribischer die möglichst vollständige Entfernung des Glasfaserstiftes und Befestigungskomposits angestrebt zu haben. Hingegen erscheint es nachvollziehbar und schlüssig, dass der Generalist vorsichtiger agiert und nach Auffinden der Wurzelkanalfüllung im Zweifelsfall eher ein Belassen von Kompositmaterial an den Kanalwänden in Kauf nimmt. Das Entfernen von anhaftendem Befestigungskomposit kann langwierig sein, da sich das zahnfarbene Material, selbst bei Verwendung des Mikroskops, optisch nur schwer vom Wurzeldentin abhebt. Ein akribisches Vorgehen, wie dies in der vorliegenden Studie durch den Spezialisten geschehen ist, wird vermutlich zwangsläufig mit erhöhtem Zahnhartsubstanzverlust einhergehen. Es ist von einem biologischen Standpunkt aus betrachtet wahrscheinlich bereits ausreichend, das Material des Glasfaserstiftes zu entfernen, um den obturierten Wurzelkanal freipräparieren zu können. Hierbei sollen Guttapercha und Sealeranteile möglichst vollständig abgetragen werden. Danach schließt sich die schonende Bearbeitung des für gewöhnlich mikrobiell besiedelten Bereichs an radikulärem Dentin an (Pereira et al., 2017). In einer klinischen Situation ist anzunehmen, dass nach Entfernung eines Glasfaserstiftes immer ein gewisser Anteil an Befestigungskomposit im Wurzelkanal unerkannt zurückbleibt. Im apikalen Bereich können zudem Anteile der Wurzelkanalfüllung verbleiben, da hier die direkte Sicht und somit die visuelle Kontrolle im Wurzelkanal oftmals durch die Wurzelkrümmung limitiert sind. Diese Limitation wird insbesondere durch die Mikro-CT Studie von Paqué et al. hervorgehoben. Es wurde die mechanische Bearbeitung der Wurzelkanalwand bei der primären Wurzelkanalbehandlung nach Einsatz verschiedener Feilensysteme untersucht mit dem Ergebnis, dass große Anteile im apikalen Bereich oft gänzlich unbehandelt blieben (Paqué et al., 2009). Eine ähnliche Untersuchung von Rödiger et al. zeigte, dass selbst mit ultraschallaktivierter Spülung des Wurzelkanals, vor allem bei Vorhandensein von Isthmen, darin sich befindliches Debris nicht vollständig entfernt werden konnte (Rödiger et al., 2019). Analog dazu ist es speziell bei sekundären Wurzelkanalbehandlungen noch schwieriger in apikalen Bereichen den Sealer und Reste der Guttapercha zu revidieren, weshalb immer Reste des Wurzelfüllmaterials zurückbleiben. Crozeta et al. untersuchten verschiedene Techniken, um Wurzelfüllmaterial aus dem Kanal zu

entfernen mit dem Ergebnis, dass bei allen Techniken Reste des Füllmaterials im Kanal verblieben (Crozeta et al., 2020).

Die schablonengeführte Methode hatte gemäß der Erwartung den geringsten Dentinabtrag, da hier die Bohrachse durch die Bohrschablone präoperativ genau festgelegt war und somit die Guttapercha relativ mühelos erreicht werden konnte. Die sichere und zuverlässige Erschließung von obliterierten Wurzelkanälen mithilfe von Bohrschablonen gelang sowohl klinisch als auch unter Studienbedingungen (Krug et al., 2020a, Krastl et al., 2016, Connert et al., 2019). Die ermittelten Resultate verweisen auf die hohe Genauigkeit der schablonengeführten Methode mit dem damit verbundenen geringsten Dentinabtrag, jedoch erfordert diese im klinischen Alltag einen hohen präoperativen Aufwand. Im Vorfeld werden eine DVT-Aufnahme, eine Abformung der entsprechenden Kieferregion und die dazugehörige Software sowie die Planung und Herstellung der Bohrschablone benötigt. Deshalb sollte hier zwischen schwierigen komplikationsträchtigen Situationen mit z.B. sehr tiefer Stiftinsertion und leichten Fällen mit z.B. geringer Stifftiefe selektiert werden. Es lassen sich dadurch Aufwand und entstehende Kosten für den Patienten im klinischen Alltag deutlich eingrenzen. Bei einer Stiftinsertion von nur wenigen Millimeter bis unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze und einer praktikablen Bohrung unter direkter Sicht erscheint die schablonengeführte Methode als nicht indiziert. Hier kann auf konventionelle Methoden zurückgegriffen werden, deren effektiver Einsatz in zahlreichen Untersuchungen bestätigt worden ist (Lindemann et al., 2005, Haupt et al., 2022, Anderson et al., 2007).

4.2.2 Kompositreste

Konsistent zu den Resultaten des Dentinabtrags ist in der vorliegenden Studie der Anteil an übrig gebliebenem Komposit im Wurzelkanal beim Spezialisten deutlich geringer als beim Generalisten oder bei der schablonengeführten Methode. Mit einem Mittelwert von $3,782 \text{ mm}^3$ wurde beim Spezialisten (KS) im Vergleich zum Generalisten (KG) mit $8,16 \text{ mm}^3$ und der schablonengeführten Methode (GE) mit $7,242 \text{ mm}^3$ weniger Komposit im Wurzelkanallumen registriert. Wird die akribische Arbeitsweise eines erfahrenen Endodontologen angenommen, wie schon im Kapitel 4.2.1 ausgeführt, resultiert der hohe Dentinabtrag des Spezialisten auch dementsprechend in einem geringeren Anteil an Kompositresten im Wurzelkanal. Der Spezialist versucht so wenig Befestigungskomposit wie möglich an der Wurzelkanalwand zu belassen, um möglichst alle Dentinoberflächen mit mikrobieller Besiedelung bearbeiten zu können und dadurch eine ideale Grundlage für die spätere homogene Obturation zu schaffen. Es ist jedoch

weitgehend unerforscht, wovon es abhängt, wie weit sich die mikrobielle Besiedelung bei mit Stiften versorgten Zähnen zwischen Dentin und Adhäsiv ausbreiten kann. Es ist letztlich für den klinisch tätigen Behandler nicht ersichtlich, ob es überhaupt nötig ist, das Befestigungskomposit möglichst vollständig zu entfernen oder ob es genügt, vorrangig die Guttapercha im apikalen Wurzelbereich zu revidieren. Dies stellt die Grundlage dafür dar, das infizierte Dentin, welches an die Wurzelkanalfüllung angrenzt, bearbeiten zu können und Zugang zur einer endodontischen Läsion am Periapex zu erhalten. In einer Studie von Pereira et al. wurde gezeigt, dass die mikrobielle Besiedelung nach einem ausbleibenden Heilungserfolg nach der primären Wurzelkanalbehandlung im radikulärem Dentin der letzten drei Millimeter des Wurzelkanals massiv erhöht war. Dies ist sehr wahrscheinlich zurückzuführen auf die oftmals unbehandelten und mit Debris verstopften Ramifikationen, Isthmen und Seitenkanäle (Pereira et al., 2017). Celik et al. verglichen den Mikroleakage zwischen den Oberflächen Komposit-Komposit und Komposit-Zahn mit dem Resultat eines geringeren Mikroleakage an der Komposit-Komposit-Oberfläche (Celik et al., 2015). Dies mag unter diesem Aspekt darauf hinweisen, dass eine vollständige Entfernung des Befestigungskomposites nicht zwingend nötig erscheint, allerdings umfasst die mikrobielle Besiedelung sehr wahrscheinlich auch stets zeitgleich andere tiefer liegende Grenzflächen wie die zum Dentin. Der adhäsive Verbund zum Wurzelkanaldentin stellt den Behandler immer noch vor Herausforderungen. Es ist bekannt, dass für eine technisch erfolgreiche endodontische Behandlung stets ein qualitativ guter Verbund zwischen Dentin und Stift sinnvoll ist und durch diverse Vorbehandlungen des Stifts verbessert werden kann (Bitter and Kielbassa, 2007).

Im klinischen Alltag sollte sich in der ersten Behandlungssitzung mit der Stiftenentfernung und der endodontischen Revision auf den Zugang zur apikalen Guttapercha konzentriert werden. Es sind folgende therapeutische Ziele zu erreichen: den sehr wahrscheinlich mikrobiell besiedelten Anteil der Wurzelkanalfüllung möglichst vollständig zu revidieren, das radikuläre Dentin durch intensive Spülung zu desinfizieren und das neu präparierte Lumen mit einer medikamentösen Einlage zu versehen. In einer darauffolgenden zweiten endodontischen Behandlung sollte mithilfe von Vergrößerungshilfen versucht werden, die Wurzelkanalwand weitestgehend von Befestigungskomposit zu befreien, um auch in diesen Bereichen eine ausreichende chemo-mechanische Präparation erzielen zu können, bevor nach apikaler Obturation meistens erneut ein Stift eingesetzt wird.

4.2.3 Perforationen und *Viae falsae*

Mit der schablonengeführten Methode konnten Perforationen sicher und zuverlässig vermieden werden, wohingegen sowohl beim Generalisten als auch beim Spezialisten beide Komplikationen vermehrt auftraten. Bei allen Entfernungsmethoden konnten *Viae falsae* festgestellt werden. Aufsteigend von GE mit 4 bis zu KG mit 6 und KS mit 11 *Viae falsae* zeigt das Ergebnis, dass bei einer Bohrung ohne direkte Sicht auf den Bohrkanaal häufig eine Abweichung der Bohrachse auftritt. Selbst beim schablonengeführten Bohren entstanden *Viae falsae*, jedoch nie Perforationen. Geringe Abweichungen von der Bohrachse waren demnach prinzipiell bei allen Techniken zu verzeichnen.

Das Abweichen des Bohrers von der ursprünglich geplanten Bohrachse und somit das Auftreten von *Viae falsae* bei der schablonengeführten Methode kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass zwischen Bohrer und Hülse zwar von Seite der Herstellerfabrikation eine gute Passung besteht, allerdings für die reibungsarme Rotation und einem geschmeidigen Lauf des Bohrers ein geringer Unterschied im Durchmesser vorhanden sein muss. Mit Zunahme der Insertionstiefe der Bohrerspitze bzw. des sich vergrößernden Abstands zwischen der Spitze und der Bohrerhülse, wie dies beim Vordringen in das apikale Wurzeldrittel unvermeidlich ist, nehmen die durchschnittlichen Abweichungen der Bohrachse zu. Abweichungen von der ursprünglich geplanten Bohrachse wurden auch bei ähnlichen Studien zu Guided Endodontics beschrieben und sind somit systembedingt vorhanden, jedoch im klinisch vertretbaren Toleranzbereich (Krug et al., 2020a, Connert et al., 2019, Zehnder et al., 2016). Trotz dieser Unschärfe wurden in der hier vorliegenden Studie die Guttaperchaanteile im Wurzelkanal des apikalen Wurzeldrittels stets mühelos erreicht und Perforationen vermieden. Des Weiteren können auch Ungenauigkeiten bei der Kieferabformung oder Bewegungsartefakte bei der DVT-Bildgebung zu einer unpräzisen Planung und somit zu klinisch relevanten Abweichungen der Bohrachse führen. Es hat sich als zielführend herausgestellt, dass der Glasfaserstift so weit wie möglich unter direkter Sicht bis zum Kanaleingang mit einem diamantierten Bohrer entfernt und ein planes Plateau für den Guided Endodontics Bohrer geschaffen werden sollte. Schrägflächen führen zu einem Abgleiten der Bohrerspitze und somit zu erheblichen Abweichungen (Reich, 2021). Eine weitere Fehlerquelle bei der schablonengeführten Stiftentfernung ist die starke Abnutzung des Bohrers durch die in Epoxidharz eingebetteten Glasfasern im Gegensatz zum weicheren Dentin. Der Unterschied in dem zu zerspanenden Materials kann einen Grund darstellen, warum die schablonengeführte Stiftentfernung nicht zur gleichen Genauigkeit wie die schablonengeführte Erschließung

von obliterierten Wurzelkanälen führt. Es zeigte sich in der Testphase, dass man für jeden Versuchszahn einen neuen Bohrer verwenden sollte. Stumpfe Bohrer verursachen eine massive Hitzeentwicklung und resultieren sehr wahrscheinlich in einer Abweichung von der Bohrachse. Deshalb ist auf eine ausreichende Wasserkühlung, intermittierende Arbeitsweise und dem Abtransport von Bohrspänen durch wiederholtes Spülen und Reinigen des Spanraums vom Bohrer zu achten. Die Ausdehnung der Bohrschablone sollte mindestens zwei Nachbarzähne umfassen. Ein möglichst spannungs- und spaltfreier Sitz sollte gewährleistet sein. Liegt die Bohrschablone während der Stiftentfernung nicht spaltfrei auf der Zahnreihe auf, steigt das Risiko für Abweichungen von der geplanten Bohrachse erheblich.

Bei der konventionellen Stiftentfernungsmethode ist es möglich bis zu einer gewissen Tiefe den Glasfaserstift unter direkter Sicht abzutragen. Jedoch limitiert der Kopf des Winkelstücks, in den der Bohrer eingespannt ist, die Sicht im weiteren Verlauf derart, dass sich der für gewöhnlich verwendete Langschaftrosenbohrer vollständig in der Zugangskavität befindet und keine räumliche Ausrichtung der Spitze mehr möglich ist. Ab diesem Zeitpunkt muss die Achse des Bohrers von außen parallel zur Achse der Zahnwurzel ausgerichtet und sukzessive die Bohrung fortgeführt werden. Die Lokalisation des Abtrags in der Zahnwurzel und innerhalb des Glasfaserstifts wird visuell nach jeder Bohrung unter direkter Sicht in der Tiefe der Kavität kontrolliert. Diese Methode ist mit einem hohen Risiko an *Viae falsae* und Perforationen assoziiert (Haupt et al., 2018, AlShabib et al., 2022). Um die Komplikationsraten hierbei zu verringern, könnte man während der Stiftentfernung intraoperative Röntgenmessaufnahmen anfertigen, um die Achse erneut zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Außerdem sollte zwischen den einzelnen Arbeitsschritten wiederholt gründlich gespült werden, um mit Hilfe eines Dentalmikroskops die farblichen und materialtypischen Charakteristika zur Unterscheidung von Dentin, Glasfaser und Komposit deutlich erkennen zu können. Dies verbessert ebenfalls die Orientierung innerhalb der Zahnwurzel. Aufgrund dieser schlechten Orientierung sind Perforationen häufig auftretende Fehler in der Endodontie (Estrela et al., 2018). Menschliche Fehler sind hierbei oft die Fehleinschätzung der Wurzelkanallänge, ungeeignete Instrumentenauswahl, unangepasste Arbeitssystematik mit übermäßigem Druck, fehlende intermittierende Arbeitsweise oder unzureichende Wasserkühlung sowie die Unerfahrenheit des Behandlers. Neben den Komplikationen, verursacht durch menschliches Versagen, gelten insbesondere anatomische Anomalien oder der

Zerstörungsgrad eines Zahnes z.B. infolge einer fortgeschrittenen Karies als relevante Parameter, die den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung beeinflussen.

4.2.4 Zeit

Mit GE konnte der Glasfaserstift am effizientesten entfernt und die Guttapercha erreicht werden. Der Mittelwert von GE lag bei 3,050 min, bei KG bei 6,057 min und bei KS bei 4,958 min. Es scheint, dass die Entfernung des Stiftes bis zum Erreichen der Guttapercha fast doppelt so schnell gelingt, als bei der konventionellen Methode. Jedoch relativiert sich dieser Zeitgewinn mit der Entfernung des restlichen Befestigungskomposits. Nach dem Erreichen der apikalen gelegenen Guttapercha müssen die am Dentin noch anhaftenden Stiftanteile abgetragen und das vorhandene Befestigungskomposit entfernt werden. Die Zeiten bis zur vollständigen Entfernung ergaben keinen statistisch signifikanten Unterschied. Die gemessenen Zeiten zeigen auch, dass selbst bei der konventionellen Methode von einem Behandler mit hoher Expertise die gleiche Zeit wie bei der schablonengeführten Methode erreicht werden kann. Es sind auch Maxima bei der Zeitmessung festzustellen, die auf die ersten Versuche zurückzuführen sind und sehr wahrscheinlich einem gewissen Übungs- und Routineeffekt zugeschrieben werden können. Während der Entfernung wurde eine Lernkurve festgestellt und die Zeiten wurden geringer. Aufgrund der unterschiedlichen Morphologien der Zähne mag die Entfernung des restlichen Befestigungskomposits komplizierter als üblich erfolgt sein. Somit könnten sich auch in diesem Fall Maxima und Minima bezüglich des Messwerts Zeit ergeben haben. Bei der konventionellen Methode erwies sich die Entfernung mit Langschaftrosenbohrern und anschließender Verwendung von Ultraschallinstrumenten als effizient, wie dies auch konsistent in der Studie von Haupt et al. beschrieben wurde (Haupt et al., 2018). In einer ähnlichen Studie von Lindemann et al. stellte sich als schnellste Entfernungsmethode die Verwendung von speziellen Entfernungskits in Verbindung mit Ultraschallinstrumenten heraus (Lindemann et al., 2005). Diese fachspezifischen Kits können jedoch nicht als Standardausstattung in allgemeinen Zahnarztpraxen angesehen werden und sind für jede Art von Stiften bzw. je nach Hersteller unterschiedlich. Im Alltag zahnärztlicher Routinearbeit mag es sehr wichtig sein in den Fällen einer Stiftentfernung möglichst effizient vorzugehen, dennoch stellt sich die Frage, ob die effektive Zeit mit Unterschieden im Bereich von wenigen Minuten bis zur Entfernung eines Stiftes wirklich klinisch relevant ist. Die Entfernung eines Glasfaserstiftes erfordert in jedem Fall eine hohe Expertise und sollte nie unter Zeitdruck geschehen. Abgesehen von einer fachlich

korrekten Einschätzung des Schwierigkeitsgrads einer derartigen Behandlung, sollte stets ein Blick auf den realistischen Versuch des langfristigen Zahnerhalts unabhängig von der Zeit geworfen werden.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen einen deutlichen Zeitvorteil bei der Entfernung des Glasfaserstiftes und Erreichen der Guttapercha während der Behandlung mittels Guided Endodontics auf, jedoch wurde hier die Zeit für die Erstvorstellung, Planung und der Aufwand am Computer außer Betracht gelassen. Bei der ersten Sitzung erfolgt die Beratung, ein Aufklärungsgespräch, eine DVT-Aufnahme und der Abdruck der Kieferregion, um die Bohrschablone planen zu können. Alleine die Planungszeit für eine Bohrschablone mit vier Inzisivi und der hier benutzten Software beträgt im Durchschnitt 10 m und 50 s (Reich, 2021). Bei der Behandlungssitzung muss die Bohrschablone intraoral auf ihren korrekten Sitz überprüft und gegebenenfalls bei Abweichungen noch angepasst werden. Alle diese Faktoren sind mit einem hohen Zeitaufwand zusätzlich zur Strahlenbelastung des Patienten verbunden.

Die schablonengeführte Methode eignet sich zur sicheren und effizienten Entfernung von Glasfaserstiften, vor allem bei schwierigen Wurzelkanalanatomien und sehr tief gesetzten Glasfaserstiften. In größeren Zahnarztzentren mit mehreren Behandlern und ausgestattet mit den geeigneten diagnostischen und zahntechnischen Hilfsmitteln kann diese Methode eine geeignete Alternative zur konventionellen Stiftentfernung darstellen. Der Zeitaufwand für die Patienten lässt sich durch einen etablierten Workflow sicherlich deutlich verringern.

5 Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, die schablonengeführte Entfernung von Glasfaserstiften aus Wurzelkanälen mit einer konventionellen Methode zu vergleichen. Darüber hinaus wurde eine weitere Unterscheidung zwischen einem Spezialisten für Endodontie und einem Generalisten bei der konventionellen Methode vorgenommen. In dieser Studie wurden der Zahnhartsubstanzauftrag, das verbliebene Komposit im Wurzelkanal, Komplikationen wie *Viae falsae* und Perforationen sowie die Zeit, die benötigt wurde, um die Guttapercha zu erreichen und das Komposit vollständig zu entfernen, verglichen.

Nach der maschinellen Wurzelkanalpräparation (Reciproc blue R50, VDW) von 90 humanen Oberkiefer-Frontzähnen, der Obturation mit Guttapercha und Sealer (AHplus, Dentsply Sirona) und der Aufbereitung des Stiftbetts wurde ein präoperativer Mikro-CT-Scan durchgeführt. Anschließend wurden Glasfaserstifte adhäsiv befestigt (DT-Light Post #3, VDW; CoreX-flow, Dentsply Sirona) und die Zähne anhand des Kanalvolumens homogen in drei Gruppen (n=30) aufgeteilt: 1. GE unter Verwendung einer Bohrschablone, 2. KG durchgeführt von einem unerfahrenen Zahnarzt, 3. KS durchgeführt von einem Spezialisten für Endodontologie. Für die Stiftentfernung wurden die Zähne in Gruppen auf Zahnmodellen verteilt. Zusätzlich wurden für die Modelle der Gruppe GE Datensätze eines DVT (DICOM) und eines Oberflächenscans (STL) erstellt, auf deren Basis der Bohrfad in coDiagnostiX (Dental Wings) geplant und eine Schablone erstellt wurde. Nach der Stiftentfernung wurden ein postoperativer Mikro-CT-Scan, die Rekonstruktion und Überlagerung der Mikro-CT-Datensätze sowie die Berechnung von Dentinabtrag und Kompositresten durchgeführt. Auch Komplikationen wie *Viae falsae* und Perforationen sowie die benötigten Zeiten wurden erfasst.

Bei allen Techniken kam es zu Zahnhartsubstanzenverlusten und Rückstände des Befestigungskomposits waren immer nachweisbar. Der Spezialist entfernte bei konventioneller Technik deutlich mehr Zahnhartsubstanz im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen. Dementsprechend zeigte sich beim Spezialisten auch ein geringerer Anteil an im Lumen verbliebenem Befestigungskomposit. *Viae falsae* traten bei allen drei Methoden auf, wobei bei der schablonengeführten Methode im Gegensatz zu den konventionellen Methoden keine Perforation auftrat. Darüber hinaus konnte mit der schablonengeführten Methode die Guttapercha deutlich schneller erreicht werden.

Zusammenfassend gilt unter Beachtung der Limitationen dieser ex-vivo Studie, dass die schablonengeführte Methode eine effiziente und relativ sichere Technik zur Entfernung von Glasfaserstiften darstellen kann. Es lässt sich dadurch bei geringstem

Komplikationsrisiko und geringem Zeitaufwand ein Zugang zum apikalen Wurzelkanalanteil erzielen. Perforationen können mit Hilfe der zuvor geplanten Bohrschablone sicher vermieden werden und auch unerfahrene Behandler scheinen von dieser Technik zu profitieren. Die schablonengeführte Methode ist präoperativ zeitaufwändiger und mit einer gewissen Strahlenbelastung aufgrund der erweiterten dreidimensionalen Bildgebung verbunden. Dennoch kann bei einer Glasfaserstifttiefe, die bis ins mittlere oder apikale Wurzeldrittel reicht, die statische Navigation einen wesentlichen Vorteil gegenüber konventionellen Methoden bieten.

6 Literaturverzeichnis

- ACKERMAN, S., AGUILERA, F. C., BUIE, J. M., GLICKMAN, G. N., UMORIN, M., WANG, Q. & JALALI, P. 2019. Accuracy of 3-dimensional-printed Endodontic Surgical Guide: A Human Cadaver Study. *J Endod*, 45, 615-618.
- ALFADDA, A., ALFADLEY, A. & JAMLEH, A. 2022. Fiber Post Removal Using a Conservative Fully Guided Approach: A Dental Technique. *Case Rep Dent*, 2022, 3752466.
- ALSHABIB, A., BRINDLEY, S. & SATTERTHWAIT, J. 2022. Evaluation of the Efficacy of Two Fibre-Reinforced Post Removal Techniques. *Eur J Prosthodont Restor Dent*, 30, 239-244.
- ANDERSON, G. C., PERDIGÃO, J., HODGES, J. S. & BOWLES, W. R. 2007. Efficiency and effectiveness of fiber post removal using 3 techniques. *Quintessence Int*, 38, 663-70.
- BAŞARAN, E. G., AYNA, E. & HALIFEOĞLU, M. 2012. Microleakage of endodontically treated teeth restored with 3 different adhesive systems and 4 different fiber-reinforced posts. *J Prosthet Dent*, 107, 239-51.
- BITTER, K. & KIELBASSA, A. M. 2007. Post-endodontic restorations with adhesively luted fiber-reinforced composite post systems: a review. *Am J Dent*, 20, 353-60.
- BOUSIOUKIS, C., GOGOS, C., VERHAAGEN, B., VERSLUIS, M., KASTRINAKIS, E. & VAN DER SLUIS, L. W. 2010. The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals evaluated using an unsteady Computational Fluid Dynamics model. *Int Endod J*, 43, 874-81.
- BUCHGREITZ, J., BUCHGREITZ, M. & BJØRNDAL, L. 2019. Guided Endodontics Modified for Treating Molars by Using an Intracoronar Guide Technique. *J Endod*, 45, 818-823.
- BYSTRÖM, A. & SUNDQVIST, G. 1983. Bacteriologic evaluation of the effect of 0.5 percent sodium hypochlorite in endodontic therapy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 55, 307-12.
- CAGIDIACO, M. C., GORACCI, C., GARCIA-GODOY, F. & FERRARI, M. 2008. Clinical studies of fiber posts: a literature review. *Int J Prosthodont*, 21, 328-36.
- CASTRISOS, T. & ABBOTT, P. V. 2002. A survey of methods used for post removal in specialist endodontic practice. *Int Endod J*, 35, 172-80.
- CELIK, C., CEHRELI, S. B. & ARHUN, N. 2015. Resin composite repair: Quantitative microleakage evaluation of resin-resin and resin-tooth interfaces with different surface treatments. *Eur J Dent*, 9, 92-99.
- CHO, C., JO, H. J. & HA, J. H. 2021. Fiber-reinforced composite post removal using guided endodontics: a case report. *Restor Dent Endod*, 46, e50.

- CONNERT, T., KRUG, R., EGGMANN, F., EMSERMANN, I., ELAYOUTI, A., WEIGER, R., KÜHL, S. & KRASTL, G. 2019. Guided Endodontics versus Conventional Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using 3-dimensional-printed Teeth. *J Endod*, 45, 327-331.
- CROZETA, B. M., CHAVES DE SOUZA, L., CORREA SILVA-SOUSA, Y. T., SOUSA-NETO, M. D., JARAMILLO, D. E. & SILVA, R. M. 2020. Evaluation of Passive Ultrasonic Irrigation and GentleWave System as Adjuvants in Endodontic Retreatment. *J Endod*, 46, 1279-1285.
- DAWOOD, A., PATEL, S. & BROWN, J. 2009. Cone beam CT in dental practice. *British Dental Journal*, 207, 23-28.
- DE RIJK, W. G. 2000. Removal of fiber posts from endodontically treated teeth. *Am J Dent*, 13, 19b-21b.
- ERLANDSSON, K., BUVAT, I., PRETORIUS, P. H., THOMAS, B. A. & HUTTON, B. F. 2012. A review of partial volume correction techniques for emission tomography and their applications in neurology, cardiology and oncology. *Phys Med Biol*, 57, R119-59.
- ESTRELA, C., DECURCIO, D. A., ROSSI-FEDELE, G., SILVA, J. A., GUEDES, O. A. & BORGES Á, H. 2018. Root perforations: a review of diagnosis, prognosis and materials. *Braz Oral Res*, 32, e73.
- EUROPEAN SOCIETY OF ENDODONTOLOGY 2006. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *International Endodontic Journal*, 39, 921-930.
- FONSECA TAVARES, W. L., DINIZ VIANA, A. C., DE CARVALHO MACHADO, V., FEITOSA HENRIQUES, L. C. & RIBEIRO SOBRINHO, A. P. 2018. Guided Endodontic Access of Calcified Anterior Teeth. *J Endod*, 44, 1195-1199.
- GESI, A., MAGNOLFI, S., GORACCI, C. & FERRARI, M. 2003. Comparison of two techniques for removing fiber posts. *J Endod*, 29, 580-2.
- GIROTTO, L. P. S., DOTTO, L., PEREIRA, G. K. R., BACCHI, A. & SARKIS-ONOFRE, R. 2021. Restorative preferences and choices of dentists and students for restoring endodontically treated teeth: A systematic review of survey studies. *J Prosthet Dent*, 126, 489-489.e5.
- GLASS, G. V., PECKHAM, P. D. & SANDERS, J. R. 1972. Consequences of Failure to Meet Assumptions Underlying the Fixed Effects Analyses of Variance and Covariance. *Review of Educational Research*, 42, 237-288.
- GOMES, A. P., KUBO, C. H., SANTOS, R. A., SANTOS, D. R. & PADILHA, R. Q. 2001. The influence of ultrasound on the retention of cast posts cemented with different agents. *Int Endod J*, 34, 93-9.
- HARWELL, M. R., RUBINSTEIN, E. N., HAYES, W. S. & OLDS, C. C. 1992. Summarizing Monte Carlo Results in Methodological Research: The One- and Two-Factor Fixed Effects ANOVA Cases. *Journal of Educational Statistics*, 17, 315-339.

- HAUPT, F., PFITZNER, J. & HÜLSMANN, M. 2018. A comparative in vitro study of different techniques for removal of fibre posts from root canals. *Australian Endodontic Journal*, 44, 245-250.
- HAUPT, F., RIGGERS, I., KONIETSCHKE, F. & RÖDIG, T. 2022. Effectiveness of different fiber post removal techniques and their influence on dentinal microcrack formation. *Clin Oral Investig*, 26, 3679-3685.
- KOCH, G. K., GHARIB, H., LIAO, P. & LIU, H. 2022. Guided Access Cavity Preparation Using Cost-Effective 3D Printers. *J Endod*, 48, 909-913.
- KOSTUNOV, J., RAMMELSBERG, P., KLOTZ, A. L., ZENTHÖFER, A. & SCHWINDLING, F. S. 2021. Minimization of Tooth Substance Removal in Normally Calcified Teeth Using Guided Endodontics: An In Vitro Pilot Study. *J Endod*, 47, 286-290.
- KRASTL, G., ZEHNDER, M. S., CONNERT, T., WEIGER, R. & KÜHL, S. 2016. Guided Endodontics: a novel treatment approach for teeth with pulp canal calcification and apical pathology. *Dent Traumatol*, 32, 240-246.
- KRUG, R., REICH, S., CONNERT, T., KESS, S., SOLIMAN, S., REYMUS, M. & KRASTL, G. 2020a. Guided endodontics: a comparative in vitro study on the accuracy and effort of two different planning workflows. *Int J Comput Dent*, 23, 119-128.
- KRUG, R., VOLLAND, J., REICH, S., SOLIMAN, S., CONNERT, T. & KRASTL, G. 2020b. Guided endodontic treatment of multiple teeth with dentin dysplasia: a case report. *Head Face Med*, 16, 27.
- LEE, J. J., NETTEY-MARBELL, A., COOK, A., JR., PIMENTA, L. A., LEONARD, R. & RITTER, A. V. 2007. Using extracted teeth for research: the effect of storage medium and sterilization on dentin bond strengths. *J Am Dent Assoc*, 138, 1599-603.
- LINDEMANN, M., YAMAN, P., DENNISON, J. B. & HERRERO, A. A. 2005. Comparison of the efficiency and effectiveness of various techniques for removal of fiber posts. *J Endod*, 31, 520-2.
- LIX, L. M., KESELMAN, J. C. & KESELMAN, H. J. 1996. Consequences of Assumption Violations Revisited: A Quantitative Review of Alternatives to the One-Way Analysis of Variance F Test. *Review of Educational Research*, 66, 579-619.
- MAIA, L. M., BAMBIRRA JÚNIOR, W., TOUBES, K. M., MOREIRA JÚNIOR, G., DE CARVALHO MACHADO, V., PARPINELLI, B. C. & RIBEIRO SOBRINHO, A. P. 2022. Endodontic guide for the conservative removal of a fiber-reinforced composite resin post. *J Prosthet Dent*, 128, 4-7.
- MANNOCCI, F., BHUVA, B., ROIG, M., ZAROW, M. & BITTER, K. 2021. European Society of Endodontology position statement: The restoration of root filled teeth. *Int Endod J*, 54, 1974-1981.

- MARCHIONATTI, A. M. E., WANDSCHER, V. F., RIPPE, M. P., KAIZER, O. B. & VALANDRO, L. F. 2017. Clinical performance and failure modes of pulpless teeth restored with posts: a systematic review. *Braz Oral Res*, 31, e64.
- MITTAL, P., JADHAV, G. R., SYED, S. & BHUJBAL, N. D. 2016. Cone-Beam Computed Tomography-Guided Management of C-Shaped Type III Dens Invaginatus With Peri-invagination Periodontitis in a Maxillary Canine: A Case Report. *Compend Contin Educ Dent*, 37, e9-e12.
- MUALLAH, J., WESEMANN, C., NOWAK, R., ROBBEN, J., MAH, J., POSPIECH, P. & BUMANN, A. 2017. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. *Int J Comput Dent*, 20, 151-164.
- NAUMANN, M., NEUHAUS, K. W., KÖLPIN, M. & SEEMANN, R. 2016. Why, when, and how general practitioners restore endodontically treated teeth: a representative survey in Germany. *Clin Oral Investig*, 20, 253-9.
- PAQUÉ, F., GANAHL, D. & PETERS, O. A. 2009. Effects of root canal preparation on apical geometry assessed by micro-computed tomography. *J Endod*, 35, 1056-9.
- PEREIRA, R. S., RODRIGUES, V. A. A., FURTADO, W. T., GUEIROS, S., PEREIRA, G. S. & AVILA-CAMPOS, M. J. 2017. Microbial analysis of root canal and periradicular lesion associated to teeth with endodontic failure. *Anaerobe*, 48, 12-18.
- PEREZ, C., FINELLE, G. & COUVRECHEL, C. 2020. Optimisation of a guided endodontics protocol for removal of fibre-reinforced posts. *Aust Endod J*, 46, 107-114.
- PEREZ, C., SAYEH, A., ETIENNE, O., GROS, C. I., MARK, A., COUVRECHEL, C. & MEYER, F. 2021. Microguided endodontics: Accuracy evaluation for access through intraroot fibre-post. *Aust Endod J*, 47, 592-598.
- REICH, S. 2021. *Computer based access cavity preparation in teeth with pulp canal obliteration by using the software sicut endo and cdx - a comparative in vitro study*. Universität Würzburg.
- REYMUS, M., STAWARCZYK, B., WINKLER, A., LUDWIG, J., KESS, S., KRASTL, G. & KRUG, R. 2020. A critical evaluation of the material properties and clinical suitability of in-house printed and commercial tooth replicas for endodontic training. *International Endodontic Journal*, 53, 1446-1454.
- RÖDIG, T., KOBERG, C., BAXTER, S., KONIETSCHKE, F., WIEGAND, A. & RIZK, M. 2019. Micro-CT evaluation of sonically and ultrasonically activated irrigation on the removal of hard-tissue debris from isthmus-containing mesial root canal systems of mandibular molars. *Int Endod J*, 52, 1173-1181.
- SATO, M., GARCIA-SANCHEZ, A., SANCHEZ, S. & CHEN, I. P. 2021. Use of 3-dimensional-Printed Guide in Hemisection and Autotransplantation of a Fusion Tooth: A Case Report. *J Endod*, 47, 526-531.

- SCHMIDER, E., ZIEGLER, M., DANAY, E., BEYER, L. & BÜHNER, M. 2010. Is It Really Robust? *Methodology*, 6, 147-151.
- STRBAC, G. D., SCHNAPPAUF, A., GIANNIS, K., MORITZ, A. & ULM, C. 2017. Guided Modern Endodontic Surgery: A Novel Approach for Guided Osteotomy and Root Resection. *J Endod*, 43, 496-501.
- VENSKUTONIS, T., PLOTINO, G., JUODZBALYS, G. & MICKEVIČIENĖ, L. 2014. The importance of cone-beam computed tomography in the management of endodontic problems: a review of the literature. *J Endod*, 40, 1895-901.
- VERTUCCI, F. J. 1984. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 58, 589-99.
- ZEHNDER, M. S., CONNERT, T., WEIGER, R., KRASTL, G. & KÜHL, S. 2016. Guided endodontics: accuracy of a novel method for guided access cavity preparation and root canal location. *Int Endod J*, 49, 966-72.

Appendix

I Abkürzungsverzeichnis

CDX	coDiagnostiX
CT	Computertomographie
DICOM	Digital Imaging and Communication
DVT	Digitale Volumentomographie
GE	Guided Endodontics/ Schablonengeführte Technik
GP	Guttapercha
H1-5	Hypothese 1-5
KG	Konventionell Generalist
KS	Konventionell Spezialist
kV	Kilovolt
M	Mittelwert
Max	Maximum
Md	Median
min	Minute
Min	Minimum
mm	Millimeter
mm ³	Kubikmillimeter
ml	Milliliter
n	Anzahl

NaOCl	Natriumhypochlorid
OPG	Orthopantomogramm
SD	Standardabweichung
SE	Standardfehler
Std	Standard
STL	Standard Triangle Language
SZG	Schmelz Zement Grenze
μA	Mikroampere
$\mu\text{-CT}$	Mikro-CT
μm	Mikrometer
μSv	Mikrosievert
Vol	Volumen
z.B.	Zum Beispiel

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nickel-Titan-Feilen (Reciproc Blue, Fa. VDW, München, Deutschland) in drei ISO-Größen R25, R40 und R50.....	3
Abbildung 2: Stiftbohrer (sog. Finishing Drills) und D.T. Light Posts (Fa. VDW).	5
Abbildung 3: Guided Endodontics Behandlung exemplarisch für Zahn 13 mit eingesetzter Bohrschablone und Hülse.	7
Abbildung 4: Munce Bohrer der Firma CJM Engineering in den Größen #1 - #4.	9
Abbildung 5: Spiralbohrer der Firma steco für Guided Endodontics.	10
Abbildung 6: Arbeitsflussdiagramm zur Veranschaulichung des Studienablaufs	11
Abbildung 7: Ausgangszahnfilm eines repräsentativen Zahnes.....	12
Abbildung 8: Repräsentative Darstellung des apikalen Foramens unter dem Dentalmikroskop.....	13
Abbildung 9: Aufbereiteter wurzelkanalgefüllter Zahn mit lose eingebrachtem Glasfaserstift.....	15
Abbildung 10: Mit D.T. Light-Post Finishing Drill #3 präparierter Zahn mit Wurzelkanalfüllung im apikalen Wurzeldrittel und sauberer Kavität.....	15
Abbildung 11: Mikro-CT Quantum FX links im Bild mit der dazugehörigen Schiebevorrichtung. Rechts im Bild der Steuerungscomputer.	16
Abbildung 12: Repräsentative Mikro-CT Aufnahmeschicht zweier wurzelkanalgefüllter Zähne.....	17
Abbildung 13: Adhäsiv vorbereiteter Zahn vor dem Einbringen des Befestigungskomposits und den auf 10mm eingekürzten Glasfaserstift.....	19
Abbildung 14: Postendodontischer Zustand eines repräsentativen Zahnes mit adhäsiv eingesetztem Glasfaserstift und mit Komposit verschlossener Zugangskavität.	19
Abbildung 15: Gipsmodell mit Echtzähnen auf ACCU-TRAC Platte.	20
Abbildung 16: Koronal-Ansicht einer DVT-Aufnahme eines repräsentativen Zahnmodells.....	21
Abbildung 17: Oberflächenscan eines repräsentativen Zahnmodells.	22
Abbildung 18: Ausrichtung der Bohrpfade für die Zähne 12-22 und Design der Bohrschablone in der Software coDiagnostiX.	23
Abbildung 19: Verlauf des Bohrers in der axialen Ansicht zentral durch den Glasfaserstift.....	24
Abbildung 20: Verlauf des Bohrers in der frontalen OPG-Ansicht zentral durch den Glasfaserstift.	24
Abbildung 21: Verlauf des Bohrers in der sagittalen Ansicht zentral durch den Glasfaserstift.	25
Abbildung 22: Finales Bohrschablonendesign mit Ausrichtung der Bohrachsen in den vier zu behandelnden Oberkieferfrontzähnen.....	26
Abbildung 23: KaVo Dentaler Patienten Simulator an Behandlungseinheit montiert.....	26
Abbildung 24: Eingesetzte Bohrschablone auf das Oberkiefer-Zahnmodell im KaVo Dentaler Patientensimulator.	28

Abbildung 25: 3D-Darstellung eines Zahnes nach Überlagerung der Prä- mit den Post-Mikro-CT Aufnahmen. Der Dentinabtrag ist rot und die Kompositreste blau dargestellt.	30
Abbildung 26: Vergleich des Dentinabtrags (rot) und der Kompositreste (grün) dreier repräsentativer Zähne in mesio-distaler Ansicht. Von links nach rechts: GE, KG und KS.....	31
Abbildung 27 Vergleich des Dentinabtrags (rot) und der Kompositreste (grün) dreier repräsentativer Zähne in bukkal-palatinaler Ansicht. Von links nach rechts: GE, KG und KS.....	31
Abbildung 28: Überlagerung beider Aufnahmen in der Software CTan. Der Dentinabtrag ist hier rot und verbliebene Kompositreste weiß dargestellt. Hellblau ist die Überschneidung beider Schichten. .	32
Abbildung 29: Drei repräsentative Zähne mit Via falsa in der Schichtaufnahme. Die Ausprägung der Via falsa nimmt von links nach rechts zu.	32
Abbildung 30: Perforation eines repräsentativen Zahnes in der bukkal-palatinalen Ansicht mit der dazugehörigen Schichtaufnahme. Der Dentinabtrag ist rot und die Kompositreste sind grün dargestellt.	33
Abbildung 31: Unterschiede im Dentinabtrag im Dentin zwischen GE, KG und KS.	36
Abbildung 32: Unterschiede in den Kompositresten zwischen GE, KG und KS.	37
Abbildung 33: Anzahl an Viae falsae bei GE, KG und KS.	39
Abbildung 34: Anzahl der Perforationen bei GE, KG und KS.	41
Abbildung 35: Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha.	42
Abbildung 36: Zeit bis zur vollständigen Entfernung.	43
Abbildung 37: Protokoll der standardisierten endodontischen Behandlung bestehend aus Präparation, Obturation und Stiftbettbearbeitung im Wurzelkanal.	46

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Homogene Aufteilung der 90 Zähne auf drei Gruppen nach Prä-Vol. in mm ³	18
Tabelle 2: Dentinabtrag in mm ³	35
Tabelle 3: Kompositreste in mm ³	37
Tabelle 4: Verteilung der Viae falsae.	38
Tabelle 5: Verteilung der Perforationen bei GE, KG und KS.....	40
Tabelle 6: Zeit bis zum Erreichen der Guttapercha in min.....	41
Tabelle 7: Zeit bis zur vollständigen Entfernung von Glasfaserstift und Befestigungskomposit in min.	43

IV Danksagung

Mein besonderer Dank richtet sich an PD Dr. Ralf Krug für die freundliche Überlassung des Themas und unter dessen Betreuung es mir ermöglicht wurde, in der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie meine Promotion durchzuführen. Vielen Dank für Ihr Vertrauen und die Unterstützung, die ich jederzeit von Ihnen erhalten habe. Weiterhin vielen Dank an Herrn Prof. Dr. Marc Schmitter und Herrn Prof. Dr. Gabriel Krastl für die Betreuung meiner Doktorarbeit als Zweit- bzw. Drittgutachter.

Ein besonderer Dank gilt auch Frau Dr. Franziska Haupt von der Poliklinik für präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie und Herrn PD Dr. Christian Dullin von der Abteilung Diagnostische Radiologie des Universitätsklinikums Göttingen für die Betreuung und tatkräftige Unterstützung bei den Mikro-CT Aufnahmen und deren Auswertung.

Außerdem bedanke ich mich herzlich bei Dr. Andrea Beinicke für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie, die mir dieses Studium ermöglicht haben. Ohne eure Unterstützung wäre dies niemals möglich gewesen.

V Eigene Veröffentlichungen und Kongressteilnahme

Kurzvortrag *Computergestützte Entfernung von Glasfaserstiften: Substanzverlust und Komplikationen*
– eine *ex-vivo-Vergleichsstudie* auf der 36. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung
in Würzburg