

Aus der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie
(Direktor: Prof. Dr. Christof Dörfer)

im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Der Einfluss von drei unterschiedlichen Applikationsmethoden eines
biokeramischen Sealers auf die Qualität von Wurzelkanalfüllungen
an 3D gedruckten Zähnen**

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Nele Alea Rienau
aus Berlin

Kiel 2024

1. Berichterstatterin:	<u>Prof. Dr. Birte Größner-Schreiber</u>
2. Berichterstatter:	<u>Prof. Dr. Hans-Jürgen Wenz</u>
Tag der mündlichen Prüfung:	<u>03.11.2025</u>
Zum Druck genehmigt, Kiel, den	<u>11.07.2025</u>

gez.: Prof. Dr. Dr. Jörg Wiltfang

Meinen Großeltern

Inhaltsverzeichnis

I	Abkürzungsverzeichnis	IV
II	Tabellenverzeichnis.....	V
III	Abbildungsverzeichnis.....	VI
IV	Diagrammverzeichnis	VII
1	Einleitung.....	1
1.1	Einführung in die Endodontologie	1
1.2	Wurzelkanalaufbereitung.....	2
1.3	Desinfektion des Wurzelkanals	2
1.4	Wurzelkanalfüllung	3
1.5	Wurzelkanalsealer	4
1.5.1	Aufgaben des Sealers.....	4
1.5.2	Materialeigenschaften der Sealer	4
1.5.3	Applikation der Sealer.....	5
1.6	Obturationsmethoden	7
1.7	Dreidimensionaler Ausdruck humaner Zähne	7
1.8	Problemstellung und Arbeitshypothese	8
2	Material und Methoden	10
2.1	Studiendesign	10
2.2	Vorbereitende Maßnahmen	11
2.2.1	Auswahl der humanen Zähne	11
2.2.2	Vorbereitung der humanen Zähne	12
2.2.3	Wurzelkanalaufbereitung	12
2.3	Herstellung der dreidimensionalen Prüfkörper	13
2.3.1	Mikro-CT-Scan.....	13
2.3.2	Erstellung der dreidimensionalen Dateien	15
2.3.3	Auswahl der Prüfkörper.....	15
2.3.4	Druck der dreidimensionalen Dateien.....	15

2.4	Anpassen der Masterpoints	19
2.5	Applikation des Sealers	19
2.5.1	Gruppe 1: Schallaktivierte Spitze [E], blaue Markierung	20
2.5.2	Gruppe 2: Applikationsspritze [S], rosa Markierung	20
2.5.3	Gruppe 3: Lentulo-Spirale [L], graue Markierung	20
2.6	Obturation	21
2.7	Mikro-CT-Scan	22
2.8	Datenerhebung	22
2.8.1	Segmentierung der Materialien	23
2.8.2	Anfangs- und Endpunkt der Auswertung	24
2.8.3	Berechnung der Volumina	25
2.9	Statistische Auswertung	25
2.9.1	Powerberechnung	25
2.9.2	Vergleich der Gruppen der Sealerverteilung und der Zahnarten	26
3	Ergebnisse	27
3.1	Anzahl vorhandener Hohlräume	27
3.1.1	Anzahl vorhandener Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode	27
3.1.2	Anzahl vorhandener Hohlräume in Bezug zur Zahnart	28
3.2	Volumen vorhandener Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode	29
3.3	Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung	30
3.3.1	Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung in Bezug zur Applikationsmethode	30
3.3.2	Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung in Bezug zur Zahnart	31
3.4	Anzahl randständiger Hohlräume	32
3.4.1	Anzahl randständiger Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode	32
3.4.2	Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an Gesamtanzahl der Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode	32
3.4.3	Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an Gesamtanzahl der Hohlräume in Bezug zur Zahnart	33

4	Diskussion	35
4.1	Diskussion von Material und Methoden	35
4.1.1	Limitation der Prüfkörper	35
4.1.2	Wurzelkanalfüllung	39
4.1.3	Auswertung	43
4.2	Diskussion der Ergebnisse	43
4.2.1	Ergebnisse in Bezug zur Applikationsmethode	44
4.2.2	Ergebnisse in Bezug zur Zahnart	48
4.3	Schlussfolgerung und Ausblick	49
5	Zusammenfassung	53
6	Literaturverzeichnis.....	55
7	Anhang	66
7.1	Materialliste	66
7.2	Materialbezeichnung in dem Programm „Amira“	68
8	Votum der Ethikkommission	69
9	Danksagung	70
10	Publikationen.....	71

Gender-Erklärung:

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Alle Geschlechteridentitäten sind dabei, soweit es für die Aussage erforderlich ist, ausdrücklich mitgemeint.

I Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
°C	Grad Celsius
A	Ampere
Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
CT	Computertomographie
DVT	Digitale Volumetomographie
G	Gramm
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
ISO	International Organisation for Standardization (internationale Normierungsorganisation)
kV	Kilovolt
mA	Milliampere
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
ms	Millisekunde
MW	Mittelwert
Ncm	Newtonzentimeter
Nm	Nanometer
Std.	Standardabweichung
STL	Standard Tessellation Language
TIFF	Tagged Image File Format
U/min	Umdrehungen pro Minute
UV	Ultraviolett
V	Volt
v. Chr.	vor Christus
vs.	versus
z. B.	zum Beispiel
µm	Mikrometer

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spülprotokoll der dreidimensional gedruckten Prüfkörper	18
Tabelle 2: Übersicht des Ablaufs der Wurzelkanalfüllung	19
Tabelle 3: Deskriptive Statistik der Anzahl vorhandener Hohlräume innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode	27
Tabelle 4: Deskriptive Statistik des Volumens der Hohlräume [in mm ³] innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode	29
Tabelle 5: Deskriptive Statistik des Verhältnisses von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Füllung [in %] in Bezug zur Applikationsmethode	30
Tabelle 6: Deskriptive Statistik der Anzahl randständiger Hohlräume in der Wurzel- füllung in Bezug zur Applikationsmethode	32
Tabelle 7: Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamtanzahl der Hohlräume [in %] in Bezug zur Applikationsmethode	33
Tabelle 8: Materialliste	66
Tabelle 9: Materialbezeichnungen in dem Programm Amira	68

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht des Studiendesigns	10
Abbildung 2:	Platzierung der Kunststoffhalterung mit den Echtzahnwurzeln auf dem Probenhalter des Mikro-CTs	14
Abbildung 3:	Echtzahnwurzeln vor dem Mikro-CT-Scan	16
Abbildung 4:	STL-Dateien der Echtzahnwurzeln mit Kerbe und Nummerierung	16
Abbildung 5:	Dreidimensionale Ausdrücke der Zahnwurzeln	16
Abbildung 6:	Schallaktivierte Spitze Gruppe 1 [E]	21
Abbildung 7:	Spritzenaufsatz Gruppe 2 [S]	21
Abbildung 8:	Lentulo-Spirale Gruppe 3 [L]	21
Abbildung 9:	Befestigte, wurzelgefüllte Prüfkörper auf der Kunststoffhalterung	22

IV Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Anzahl an Hohlräumen innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode	27
Diagramm 2:	Anzahl an Hohlräumen innerhalb der Füllung in Bezug zur Zahnart; a.) Frontzahnwurzel; b.) Prämolarenwurzel; c.) Molarenwurzel	28
Diagramm 3:	Volumen der Hohlräume [in mm ³] innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode	29
Diagramm 4:	Volumenverhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Füllung [in %] in Bezug zur Applikationsmethode	30
Diagramm 5:	Volumenverhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Füllung [in %] in Bezug zur Zahnart; a.) Frontzahnwurzel; b.) Prämolarenwurzel; c.) Molarenwurzel	31
Diagramm 6:	Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an Gesamtanzahl der Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode [in %]	33
Diagramm 7:	Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamt- anzahl der Hohlräume der Füllung [in %] in Bezug zur Zahnart; a.) Frontzahnwurzel; b.) Prämolarenwurzel; c.) Molarenwurzel	34

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Endodontologie

Die Endodontologie ist ein wichtiger Teilbereich der Zahnheilkunde, der sich mit der Entstehung, der Ätiologie und der Therapie von Erkrankungen und Verletzungen des Pulpa-Dentin-Komplexes sowie des umgebenden periradikulären Gewebes auseinandersetzt. Primäres Ziel der Endodontologie ist der Zahnerhalt durch Prävention und Behandlung pulpaler Krankheiten sowie das Verhindern der Entzündungsausbreitung in das periradikuläre Gewebe.

Die geschichtlichen Ursprünge der Endodontologie gehen bis in das Jahr 200 v. Chr. zurück. Bei Ausgrabungen eines Massengrabes in der Wüste Negev wurde im Rahmen einer Gebissanalyse eines Schädels ein 2,5 mm dicker Bronzedraht im Wurzelkanal eines oberen Schneidezahnes aufgefunden. Dieser Fund gilt als erster Nachweis einer Füllung des Wurzelkanals (Zias und Numeroff 1987). Den Grundstein der Endodontologie bildete jedoch das Werk „Le Chirurgien Dentiste“ von Pierre Fauchard aus dem Jahr 1728. Neben dem Trepanieren von Zähnen, dem Kauterisieren und der Nutzungsmöglichkeit von Instrumenten für die Wurzelkanalaufbereitung beschreibt der Franzose die Wurzelkanalfüllung mithilfe von Bleifolien (Fauchard 1728).

Für eine erfolgreiche endodontologische Therapie ist die Kenntnis über die Anatomie der Zahnwurzeln mit deren Kanälen unabdingbar. Hierbei stellen die zahlreichen anatomischen Variationen und Besonderheiten sowie die unterschiedliche Anzahl und Form der Wurzeln und Wurzelkanäle eine große Herausforderung dar (Mohammadi et al. 2013; Siqueira Junior et al. 2018). Die Wurzelkanäle entsprechen einem komplexen, dreidimensionalen Kanalgeflecht aus Haupt- und Nebenkanälen sowie diversen Unebenheiten, Seitenkanälen, Isthmen und apikalen Ramifikationen. Innerhalb der Wurzelkanäle befindet sich das pulpal Gewebe, dessen Vitalität für die Langzeitprognose eines Zahnes bedeutsam ist.

Karies, Zahnfrakturen oder andere traumatische Einflüsse können Bakterien den Zutritt zum Endodont ermöglichen, die mit ihren Toxinen hauptverantwortlich für eine Entzündung der Pulpa sind (Shabahang 2005; Yu und Abbott 2007). Die pulpal Entzündung kann unbehandelt zu einer Nekrose der Pulpa führen und sich darüber hinaus in das periradikuläre Gewebe ausbreiten. Um den Erhalt des erkrankten Zahnes langfristig zu gewährleisten, ist neben der

mechanischen Aufbereitung und der chemischen Desinfektion eine bakteriendichte Füllung des Wurzelkanals notwendig (Akbar 2015; Gasner und Brizuela 2023; Montaser et al. 2023). Diese soll eine mögliche Reinfektion des Zahnes durch erneuten Zutritt von Mikroorganismen verhindern (European Society of Endodontology 2006).

1.2 Wurzelkanalaufbereitung

Eine Wurzelkanalaufbereitung ist bei einer irreversibel geschädigten oder nekrotischen Pulpa, mit oder ohne erkennbare Beteiligung des periradikulären Gewebes, indiziert. Zudem kann die Behandlung im Rahmen einer geplanten Devitalisierung des Zahnes bei nachfolgender Versorgung über einen Wurzelstift, bei zweifelhaftem Pulpazustand oder bei chirurgischer Wurzelresektion durchgeführt werden (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2004).

Hauptziele sind die komplette Entfernung des Pulpagewebes, eine Eliminierung der Mikroorganismen und des Debris sowie eine akzeptable Formgebung des Kanals durch zirkulären Dentinabtrag an der Wurzelkanalwand. Dadurch soll auch eine angemessene Desinfektion des Kanals bzw. des Wurzelkanalsystems ermöglicht werden (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2004; Hülsmann 2008a). Das Prinzip der Wurzelkanalaufbereitung besteht darin, den Kanal, unter der Verwendung von Feilen in aufsteigenden Größen, vom Kanaleingang bis zum physiologischen Foramen schrittweise zu erweitern. Da die meisten Bakterien eines infizierten Endodonts aufgrund des größeren Kanalquerschnitts im koronalen und mittleren Drittel der Wurzel nachweisbar sind, ist es sinnvoll, den Wurzelkanal konisch von koronal nach apikal zu präparieren (Love 1996). Die Präparation des Wurzelkanals kann z. B. manuell mithilfe ISO-normierter Stahlfeilen oder maschinell mittels Nickel-Titanfeilen unter Anwendung verschiedener Aufbereitungstechniken erfolgen.

1.3 Desinfektion des Wurzelkanals

Aufgrund der Komplexität des Wurzelkanalsystems ist es unmöglich, alle Seitenkanäle, Isthmen und Unebenheiten vollständig mechanisch aufzubereiten und zu erweitern (Sousa-Neto et al. 2018; Velozo et al. 2021). Um die in den nicht instrumentierten bzw. instrumentierbaren Bereichen vorhandenen Bakterien dennoch zu eliminieren, kommen der wirkungsvollen Reinigung und der Desinfektion des Kanalsystems eine hohe Bedeutung zu (AAE 2020; Al-Jadaa et al. 2009; Boutsoukis und Arias-Moliz 2022; Zehnder et al. 2003). Die

Hauptziele der Wurzelkanalspülung liegen in der Reduktion von Mikroorganismen und deren Toxinen im Kanal sowie im Auflösen und Ausspülen pulpaler Überreste und Dentinspäne (Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2004). Hierfür kommen Spülflüssigkeiten wie Natriumhypochlorit (NaOCl) zum Einsatz, das sich in einer Konzentration zwischen 0,5 % und 5 % als besonders geeignet erwiesen hat. Auch die zusätzliche Verwendung eines Chelators wie Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) ist zur vollständigen Entfernung der Schmierschicht auf den Kanalwänden vorteilhaft (Boutsioukis und Arias-Moliz 2022; Hülsmann et al. 2003). Als Standardmethode der Wurzelkanalspülung gilt die Verwendung einer Spritze bzw. Spülkanüle mit einem geeigneten Aufsatz. Darüber hinaus sollten die Spülflüssigkeiten mittels Schallvibrations- oder Ultraschallsystemen aktiviert werden (Boutsioukis und Arias-Moliz 2022; Susila und Minu 2019). Durch die passive Ultraschallspülung kann im Vergleich zu anderen Spülmethoden eine nachweislich effizientere Reinigung des Kanalsystems und der vorhanden Isthmen erreicht werden (Montaser et al. 2023; Mozo et al. 2012; Nagendrababu et al. 2018). Eine solche Aktivierung der Spülflüssigkeit kann zudem die Eindringtiefe der Wurzelfüllpaste in die Dentintubuli signifikant erhöhen (Oliveira et al. 2017).

1.4 Wurzelkanalfüllung

Wenn der endodontisch behandelte Zahn symptomfrei, vollständig aufbereitet und desinfiziert ist, folgt die definitive Wurzelkanalfüllung. Dieser dauerhafte Verschluss des Wurzelkanals ist maßgeblich am Erfolg einer endodontischen Behandlung beteiligt (Akbar 2015; Gasner und Brizuela 2023; Ng et al. 2008). Die Wurzelkanalfüllung soll einen bakteriendichten und dimensionsstabilen Verschluss des Kanalsystems gewährleisten. Dadurch soll eine mögliche Rekontamination durch Mikroorganismen und ein Bakterienaustritt aus dem Periapex verhindert werden (European Society of Endodontology 2006; Muliya et al. 2014). Die beiden Hauptbestandteile der Füllung sind (halb-)feste Wurzelkanalfüllstifte, meist Guttapercha, zusammen mit einer erhärtenden Versiegelungspaste, dem Wurzelkanalsealer (Gasner und Brizuela 2023; Hülsmann und Schäfer 2005).

1.5 Wurzelkanalsealer

1.5.1 Aufgaben des Sealers

Grundsätzlich dient der Sealer als Versiegelungsmaterial und optimiert die Abdichtung des Wurzelkanals mit der Guttapercha (Wu et al. 2004; Younis und Hembree 1976). Dabei erfüllt die Versiegelungspaste mehrere Funktionen: Sie gleicht Mikrounebenheiten zwischen Guttapercha und der Wurzelkanalinnenwand aus, füllt offene Dentintubuli und kleine akzessorische Kanäle und verbindet die Guttapercha mit der Kanalinnenwand. Der Sealer sollte eine geringe Löslichkeit und eine hohe Volumenstabilität aufweisen, um eine langfristige Abdichtung zu gewährleisten. Die dimensionsstabile Versiegelung durch den Sealer soll eine Mikroleckage, also den Durchtritt von Bakterien und Flüssigkeiten zwischen Füllmaterial und Wurzelkanalwand, verhindern (Komabayashi et al. 2020). Zusätzlich sind eine gute Verarbeitbarkeit sowie die Röntgensichtbarkeit von Vorteil (Hülsmann 2008b). Bei der Wurzelkanalobturation kommt es oftmals zu einer Extrusion des Sealers über das apikale Foramen hinaus. Der überpresste Sealer kann jedoch die Heilung des umgebenden Gewebes verlangsamen oder sogar verhindern und Fremdkörperreaktionen auslösen, weswegen eine gute Biokompatibilität besonders wichtig ist (Hoen et al. 1988). Aufgrund der hohen Anforderungen an die Wurzelkanalfüllpasten werden stetig neue Untersuchungen durchgeführt und Materialien mit optimierten Eigenschaften entwickelt. Trotz der verbesserten Materialeigenschaften sollte bei der Wurzelfüllung dennoch nicht auf die Guttapercha verzichtet werden, da es gegebenenfalls durch Schrumpfung des Sealers zu Undichtigkeiten im Randbereich der Füllung kommen kann (Wu et al. 1994).

1.5.2 Materialeigenschaften der Sealer

Es gibt viele Materialien der Wurzelkanalsealer, welche sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften deutlich unterscheiden. Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis werden seit langer Zeit in der Endodontologie verwendet und haben sich durch ihre guten Langzeitergebnisse bewährt (Komabayashi et al. 2020). Neben ihren positiven Eigenschaften wie der guten antibakteriellen Wirkung und Abdichtung sowie der geringen Kosten (Komabayashi et al. 2020; Lee et al. 2002) wird jedoch eine zytotoxische und gewebeirritierende Wirkung durch das darin enthaltene Eugenol diskutiert (Geurtsen 2001; Gulati et al. 1991; Hoover et al. 1980).

Die Verwendung von Sealern auf Epoxidharz-Basis wird in der Literatur aufgrund der guten Biokompatibilität sowie der hohen Eindringtiefe in Dentintubuli und in laterale Kanäle häufig

empfohlen (Candeiro et al. 2019; Kim et al. 2015; Simsek et al. 2015). Zudem sind die geringe Porosität und die niedrige apikale Sealerextrusion vorteilhaft (Jasrasaria et al. 2023). Sealer auf Epoxidharz-Basis weisen jedoch kein zusätzliches bioaktives Potential auf und sind in ihrer Bioverträglichkeit den Wurzelfüllpasten auf Kalzium-Silikatbasis unterlegen (Komabayashi et al. 2020; Sanz et al. 2022).

In den vergangenen Jahren haben sich die sogenannten biokeramischen Wurzelkanalversiegler als neue Materialien zunehmend verbreitet. Diese Wurzelfüllpasten bestehen aus Kalziumsilikat-Verbindungen und weisen dadurch einen basischen pH-Wert von ungefähr 12,5 auf. Bei den biokeramischen Sealern steht vor allem ihre hervorragende Biokompatibilität, welche in diversen Studien untersucht wurde, im Vordergrund (Collado-González et al. 2017; López-García et al. 2020; Raghavendra et al. 2017). Im Vergleich mit vielen anderen Sealern, z. B. jenen auf Zinkoxid-Eugenol- oder Epoxidharzbasis, weisen Sealer aus Trikalziumsilikatverbindungen die beste antimikrobielle Wirkung durch eine hohe Freisetzung von Kalziumionen auf und lassen durch ihre gute Dentinhaftung die geringste Mikroleckage zu (El-Sherif et al. 2022; Komabayashi et al. 2020). Darüber hinaus wird diesen Sealern ein bioaktives Potential durch eine hohe Zellanhaftung und -migration sowie Genexpression bei umliegenden Zellen zugeschrieben (Collado-González et al. 2017; Dong und Xu 2023; López-García et al. 2020). Insgesamt gewährleisten Kalziumsilikat-basierte Füllpasten aufgrund ihrer tiefen Penetration in die Dentintubuli (Candeiro et al. 2019) und ihrer sehr guten Dimensionsstabilität, da sie während des Abbindeprozesses nicht schrumpfen, eine hohe Obturationsqualität. Kalziumsilikat-basierte Füllpasten sind hydrophil, wodurch diese Sealer optimalerweise durch Absorption von Restfeuchtigkeit aus den Dentintubuli aushärten (Raghavendra et al. 2017). Es wird jedoch eine erschwerte Revidierbarkeit des Kanals durch die starke Bindung zwischen Dentin und Füllpaste diskutiert (Crozeta et al. 2021).

1.5.3 Applikation der Sealer

Um sicherzustellen, dass der Wurzelkanalsealer seine Aufgaben ordnungsgemäß erfüllt, ist es erforderlich, dass die Paste im Kanal ausreichend verteilt wird. Studien haben gezeigt, dass die Technik der Sealerapplikation nachweislich dessen Verteilung im Wurzelkanal beeinflusst (Hoen et al. 1988; Kim et al. 2021). Durch eine unzureichende Benetzung der Kanalwand können kleine Hohlräume bzw. Blasen innerhalb und am Rand der Füllung entstehen (Dash et al. 2017; Mutal und Gani 2005), die den überlebenden Mikroorganismen Schutz bieten und

einen Flüssigkeitstransport innerhalb der Füllung zulassen können (Atmeh et al. 2022; Muliya et al. 2014). Das Auftreten von Hohlräumen innerhalb der Füllung wirkt sich negativ auf die Qualität der Füllung aus (Cheung 2002) und beeinflusst die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Wurzelbehandlung maßgeblich (Gulabivala und Ng 2023; Ng et al. 2008; Pérez-Alfayate et al. 2021; Tomson et al. 2014). Aus diesen Gründen ist es wichtig, solche Hohlräume bestmöglich zu verhindern, weswegen sich zahlreiche Studien dem Vergleich verschiedener Methoden zur Applikation der Wurzelfüllpaste widmen (Atmeh et al. 2022; Dash et al. 2017; Said et al. 2012; Seltzer et al. 1967).

Der Sealer kann manuell mittels Papierspitzen, Guttaperchastiften oder Handfeilen in den Kanal appliziert werden. Dabei werden die Instrumente vorher gleichmäßig mit Sealer beschichtet und anschließend eingebracht. Ein Hauptvorteil dieser Einbringmethoden ist die sehr einfache Handhabung (Said et al. 2012). In manchen Studien waren die manuellen Instrumente bei der Sealerapplikation jedoch den maschinell betriebenen Instrumenten hinsichtlich einer ausreichenden Verteilung des Sealers unterlegen (Aguirre et al. 1997; Kahn et al. 1997; Stamos et al. 1995). Eine sehr verbreitete Einbringmethode des Sealers ist die Lentulo-Spirale, welche den Sealer maschinell in den Wurzelkanal einrotiert. Neben der schnellen Applikation mittels Lentulo zeichnet sich diese Methode, dies belegen viele positive Studienergebnisse, in der Verteilung des Sealers im Wurzelkanal aus (Dash et al. 2017; Galvão et al. 2017; Guinesi et al. 2014; Kahn et al. 1997).

Mögliche Nachteile sind allerdings das Risiko des Überpressens von Füllmaterial sowie das Risiko einer Spiralenfraktur (Hülsmann 2008b). Ähnlich gute Studienergebnisse hinsichtlich einer ausreichenden Sealerbenetzung der Kanalwände zeigten sich bei der Anwendung von Schall- und Ultraschallspitzen zur Sealerapplikation (Bhor et al. 2023; Hoen et al. 1988; Kahn et al. 1997). Die Schall- und Ultraschallaktivierung der Füllpasten kann eine bessere Haftfähigkeit der Sealer an der Kanalwand (Padoin et al. 2022) sowie ein tieferes Eindringen der Pasten in die Dentintubuli und laterale Kanäle bewirken (Arslan et al. 2016; Stamos et al. 1995). Durch die Anwendung von Schall- und Ultraschallspitzen werden jedoch die physiko-chemischen Eigenschaften des Sealers durch die entstehende Energie und Wärme verändert, wodurch die Verarbeitungs- und Abbindezeit mancher Sealer verkürzt sein könnte (Heran et al. 2019; Hoen et al. 1988). Eine weitere Möglichkeit, den Sealer in den Wurzelkanal einzubringen, ist der Einsatz einer Applikationsspritze, die als einfache und zeitsparende Methode

beworben wird. Dabei wird die Spritze in den Kanal eingebracht und während des Herausziehens kontinuierlich Sealer abgegeben. Vorliegende Studien zeigen vielversprechende Ergebnisse bei der homogenen Benetzung der Kanalwände (Hoen et al. 1988; Nezam et al. 2021), allerdings wurde die Eignung der Spritzen zur Sealerapplikation bisher nur wenig untersucht.

1.6 Obturationsmethoden

Als Standardtechnik der Wurzelkanalobturation gilt die kalte, laterale Kompaktion, bei der ein Hauptguttaperchastift mit Sealer benetzt, in den Kanal eingebracht und gegen die Kanalwand gepresst wird. Dieser Vorgang wird mehrmals mit kleineren, akzessorischen Guttaperchastiften mit abnehmender Eindringtiefe wiederholt (Weber 2016).

Eine vereinfachte Methode der Wurzelkanalobturation ist die Einstiftfülltechnik oder Zentralstifttechnik. Ihr Prinzip beruht auf der Verwendung von lediglich einem Guttaperchastift, welcher zusammen mit einem geeigneten Wurzelkanalsealer den aufbereiteten Kanal ausfüllt. Der Hauptguttaperchastift wird passend zur Konizität und Aufbereitungslänge des Wurzelkanals ausgewählt und mit langsamen, leicht pumpenden Bewegungen in den Kanal eingebracht, sodass überschüssiges Material nach koronal abfließen kann. Die Durchführung der Einstifttechnik wird hauptsächlich mit der Verwendung von biokeramischen Sealern empfohlen und liefert in dieser Kombination gute klinische Ergebnisse (Chybowski et al. 2018; Kim et al. 2022). Besonders vorteilhaft sind bei der Einstifttechnik die einfache Durchführung sowie die Zeitersparnis im Vergleich zu anderen Obturationsmethoden (Yang et al. 2022).

1.7 Dreidimensionaler Ausdruck humaner Zähne

Die Verwendung von extrahierten, humanen Zähnen gilt sowohl in der endodontischen Forschung als auch bei der Ausbildung von Zahnärztinnen und Zahnärzten zum Erlernen von Wurzelkanalbehandlungen als der Goldstandard, da sie eine bestmögliche Simulation der realen Bedingungen ermöglicht (Kim et al. 2016). Der Einsatz von Echtzähnen ist jedoch durch deren Verfügbarkeit und die fehlende Möglichkeit der Vergleichbarkeit limitiert, weswegen synthetische Alternativen zunehmend an Bedeutung gewinnen (De-Deus et al. 2022). Auch speziell hergestellte Kunststoffblöcke und -zähne mit einem oder mehreren Kanälen finden in der endodontischen Ausbildung ihren Einsatz, jedoch sind diese meist nur in wenigen und eher simplen anatomischen Formen erhältlich. Aus diesem Grund stellt der dreidimensionale Druck humaner Zähne eine geeignete Alternative dar (Anderson et al. 2018; Decurcio et al. 2019).

Dieser findet im Sinne eines additiven Herstellungsverfahrens mithilfe eines 3D-Druckers statt. Hierfür werden entsprechende STL-Dateien benötigt, die aus Aufnahmen menschlicher Zähne mit einem DVT-, Mikro- oder Nano-CT erhalten werden.

Ein in der Zahnmedizin weit verbreitetes Verfahren des 3D-Drucks ist die Stereolithographie (SLA-Verfahren), bei der flüssiges Harz schichtweise mittels Photopolymerisation durch einen UV-Laser verfestigt wird (Khorsandi et al. 2021). Als Weiterentwicklung wurde die Low-Force-Stereolithografie (LFS), mit zusätzlicher Folie im Druckerbett, eingeführt. Durch die LFS können noch filigranere Objekte additiv gedruckt werden (Marturello et al. 2023), wodurch sich auch kleinste Strukturen wie Kopien humaner Zähne einschließlich des Wurzelkanals detailgetreu anfertigen lassen (Kim et al. 2016). Insbesondere für die Untersuchung von Wurzelfüllungsmaterialien und -techniken eignen sich 3D gedruckte Replikate, da durch die Herstellung identischer Kopien eines Wurzelkanals eine Vergleichbarkeit geschaffen wird. Der 3D-Druck eröffnet zudem die Möglichkeit der Untersuchung von zahlreichen anatomischen Variationen und aufgrund der unbegrenzten Verfügbarkeit der 3D gedruckten Modelle können diese Untersuchungen beliebig oft wiederholt werden (De-Deus et al. 2022).

1.8 Problemstellung und Arbeitshypothese

Wie beschrieben, ist die Verteilung des Sealers für eine möglichst blasenfreie Wurzelkanalfüllung sehr wichtig, da sich Hohlräume innerhalb der Wurzelfüllung und an der Grenzfläche zwischen Füllmaterial und Kanalwand negativ auf die Erfolgsprognose der Wurzelkanalbehandlung auswirken können (Atmeh et al. 2022; Cheung 2002; Gulabivala und Ng 2023; Ng et al. 2008; Pérez-Alfayate et al. 2021). Hohlräume bieten Flüssigkeiten und Bakterien Unterschlupf und ermöglichen ihnen Zugang zum Wurzelkanal bzw. zum Wurzelkanalsystem (Muliya et al. 2014).

Es gibt bereits Studien, die die Auswirkung verschiedener Applikationsmethoden eines Sealers auf die Verteilung der Füllpaste sowie das Auftreten von Hohlräumen innerhalb der Wurzelfüllung untersuchten. Wurzelkanalsealer auf Kalziumsilikat-Basis wurden jedoch nur in wenigen dieser Untersuchungen verwendet (Atmeh et al. 2022; Bhor et al. 2023). Insgesamt unterscheiden sich die Studien in ihrem Versuchsaufbau, der Art der Probenzähne, den Applikationsmethoden sowie der Fülltechnik und Auswertungsmethode. Daher lässt sich bisher noch keine eindeutige Empfehlung bestimmter Applikationsmethoden bei Verwendung der Einstifttechnik mit biokeramischen Sealern aussprechen.

Ziel dieser vorliegenden Untersuchung ist der Vergleich von drei verschiedenen Methoden der Applikation des biokeramischen Sealers, und zwar

- einer Lentulo-Spirale,
- einer schallaktivierbaren Spitze und
- einer Applikationsspritze

hinsichtlich des Auftretens von Hohlräumen innerhalb der Wurzelkanalfüllung.

Das Einbringen des Sealers sowie die anschließende Obturation mittels der Einstiftfülltechnik wurde an 3D gedruckten Replikaten von drei verschiedenen Zahntypen durchgeführt.

Als Arbeitshypothese dieser Studie wird angenommen, dass es keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Auftretens von Hohlräumen innerhalb der Wurzelkanalfüllungen bei der Verwendung der drei verschiedenen Applikationsmethoden des Sealers gibt. Eine Nebenhypothese lautet, dass sich die Verwendung verschiedener Zahnanatomien ebenfalls nicht signifikant auf das Vorhandensein von Hohlräumen in der Wurzelfüllung auswirkt. Diese Hypothesen sollen durch die vorliegende Untersuchung bestätigt oder widerlegt werden.

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

In der vorliegenden Studie wurden insgesamt 108 im 3D-Druckverfahren hergestellte Nachbildungen von drei vorab ausgewählten, extrahierten, humanen Zähnen verwendet. Ähnlich zu der Studie von Gok et al. (2017) wurden die Wurzelkanäle der menschlichen Zähne maschinell präpariert und mittels mikrocomputertomographischer Bildgebung (Mikro-CT) eingescannt, um dreidimensionale Kopien der Zahnwurzeln herstellen und im Anschluss füllen zu können (Gok et al. 2017). Nach der Digitalisierung einer Vorauswahl präparierter Zähne wurden insgesamt drei Exemplare als Prüfkörper für den Versuch ausgewählt. Die gedruckten Zahnwurzeln wurden mittels der Einstifttechnik gefüllt, wobei drei verschiedene Einbringmethoden eines biokeramischen Wurzelkanalsealers zum Einsatz kamen. Anschließend wurden die fertigen Proben erneut mit einem Mikro-CT gescannt, um die Qualität der Wurzelkanalfüllungen digital zu beurteilen.

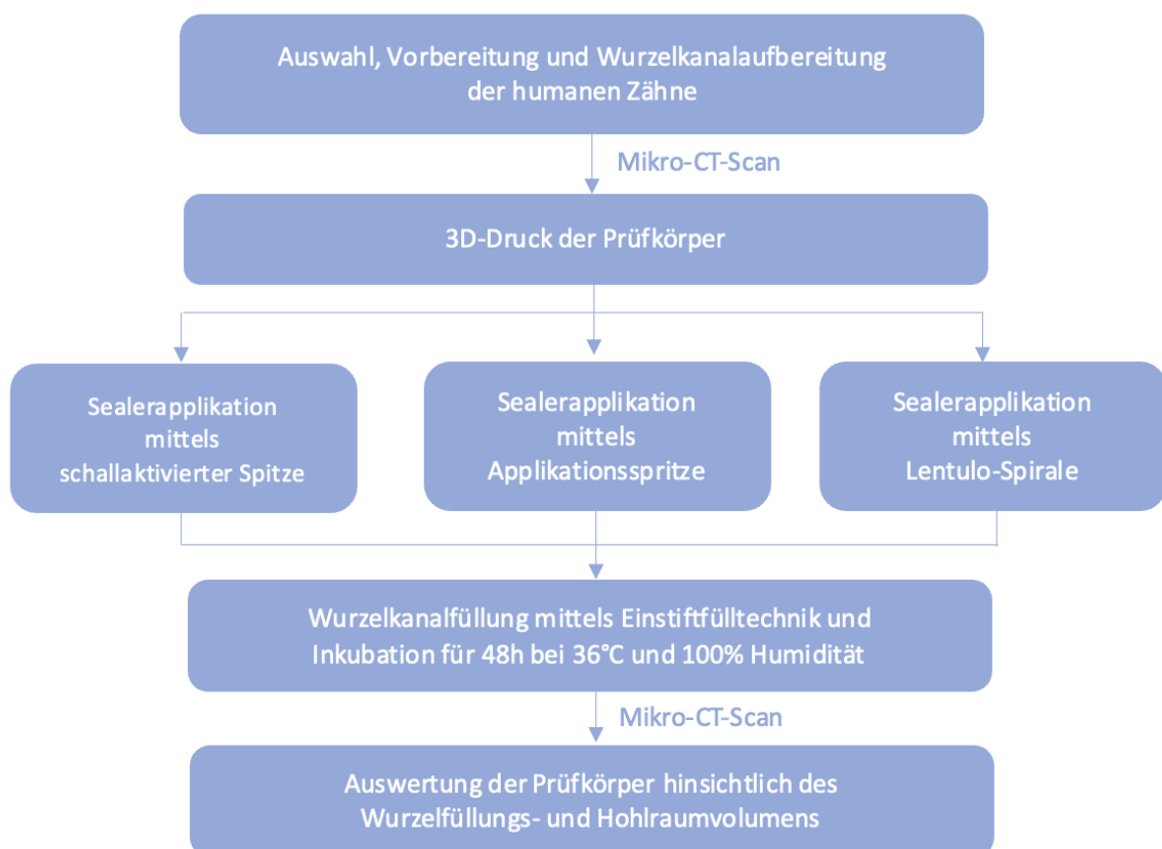


Abbildung 1: Übersicht des Studiendesigns

Im Rahmen der Auswertung wurden das Volumen der vorhandenen Wurzelfüllung, das Volumen und die Anzahl vorliegender Hohlräume in der Wurzelfüllung sowie die Anzahl randständiger Hohlräume mit Hilfe des Programms „Amira“ erfasst (Vers.: 6.2.0, Zuse Institute Berlin, Thermo Fisher Scientific, D; siehe Übersicht Studiendesign Abb. 1).

2.2 Vorbereitende Maßnahmen

2.2.1 Auswahl der humanen Zähne

Für die Studie wurden extrahierte humane Zähne verwendet, welche unmittelbar nach der Extraktion in 70 %-igem Ethanol (Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D) gelagert wurden. Die Verwendung der humanen Zähne für die Studie wurde durch das Ethik-Komitee der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (D 444/10) genehmigt.

Anhand spezieller Ein- und Ausschlusskriterien wurde eine Vorauswahl an Probenzähnen selektiert und bleibende, mittlere Frontzähne des Oberkiefers (11/21), zweite Prämolaren des Unterkiefers (35/45) sowie zweite Molaren des Oberkiefers (17/27) in die Untersuchung eingeschlossen. Hierbei war besonders wichtig, dass das Wurzelwachstum der Zähne abgeschlossen war, sie bisher nicht endodontisch behandelt wurden und weder Resorptionen noch Frakturen an der Wurzel aufzufinden waren. Zähne mit kariösen und nicht kariösen Defekten an der Zahnkrone, mit leichten Wurzelkrümmungen ($<20^\circ$) und leicht verengten Kanalsystemen konnten noch in die Studie mit eingeschlossen werden. Die endgültige Auswahl von jeweils einem Prüfkörper pro Zahntyp erfolgte nach der Wurzelkanalaufbereitung und der Digitalisierung, jedoch vor dem dreidimensionalen Druck.

Mithilfe einer Universalkürette (Figur 23A, Griff 6, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC., Frankfurt am Main, D) wurden die Wurzeloberflächen vorsichtig von Geweberesten, Konkrementen und anderen Auflagerungen gereinigt. Die Lagerung der Versuchszähne erfolgte während der gesamten Studiendauer in 70 %-iger Ethanollösung in nummerierten Dosen (Aufbewahrungsboxen, Tinyo Limited, London, GB).

Zur genaueren Beurteilung der Wurzelkanalanatomie, insbesondere des Verlaufs und der Ausdehnung der Pulpa, wurde von allen Zähnen ein Röntgenbild angefertigt (Oralix AC 9869 000 00101 Gendex Division, 20 ms, 7,5 mA, 65 kV, Dentsply, Italy). Die Zahnfilmaufnahmen erfolgten in orthoradialer und bei mehrwurzeligen Zähnen zusätzlich in mesial-exzentrischer Ausrichtung.

2.2.2 Vorbereitung der humanen Zähne

Da für diese Studie lediglich die Zahnwurzel mit dem in ihr enthaltenen Wurzelkanal von Relevanz war, konnte auf die Trepanation, üblicherweise der erste Schritt einer Wurzelkanalaufbereitung, verzichtet werden. Daher wurden die Zahnkronen auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze mithilfe einer diamantierten Bandsägemaschine (Nr.30/40, Exakt Apparatebau, Norderstedt, D) senkrecht zur Zahnachse abgetrennt. Auf diese Weise wurden die Zahnkronen samt Pulpakammerdach entfernt, sodass eine Einsicht auf die Kanaleingänge möglich war. Die abgetrennten Zahnkronen wurden fachgerecht entsorgt und die Echtzahnwurzeln anschließend wieder in den entsprechenden mit Ethanol befüllten Dosen gelagert.

Vor der Wurzelkanalaufbereitung wurden die Echtzahnwurzeln von Hand mit je 2 ml 3 %-igem Natriumhypochlorit (HISTOLITH NaOCl 3 %, lege artis Pharma GmbH & Co. KG, Dettenhausen, D) über eine Einmalkunststoffspritze (BD Discardit II, 2 ml, Becton Dickinson GmbH, Heidelberg, D) mit einer Spülnadel mit seitlich offener Spitze (Miraject Endotec Duo, Luer, Hager & Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, D) gespült, um koronale Pulparesten aufzulösen, auszuschwemmen und das Herstellen eines Gleitpfades zu erleichtern.

2.2.3 Wurzelkanalaufbereitung

Die Aufbereitung der Wurzelkanäle erfolgte maschinell mit dem Endomotor EndoPilot¹ (REF 109 2310; 12 V; 1,25 A, Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, D) und rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten des F360-Feilensystems (NiTi shank stainless steel; Torque 1,8 Ncm, Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D) in der Crown-down-Technik.

Nach der Erweiterung des Kanaleingangsbereichs mit dem „Opener“ (OP10L19.204.030, Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D) konnten die Kanaleingänge aufgefunden und die Länge des jeweiligen Wurzelkanals ausgemessen werden. Die Längenmessung erfolgte mit Hilfe einer geeigneten Kerr-Feile der Größe ISO 10 (VDW®STERILE K-Feilen ISO 010/21 mm, VDW GmbH, München, D). Hierbei wurde die Feile bis zum Austritt aus dem Foramen apicale in den Kanal geführt und die gesamte Kanallänge durch einen Silikonstopper (Silikon Stops, Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA) am Feilenschaft markiert und ausgemessen. Der gemessene Wert, abzüglich eines Millimeters, ergab die definitive Aufbereitungslänge des jeweiligen Kanals, welche die Distanz zwischen dem koronalen Referenzpunkt und dem apikalen Endpunkt der Präparation festlegt. Idealerweise sollten die

chemo-mechanische Aufbereitung sowie die anschließende Füllung eines Wurzelkanals möglichst nahe an das physiologische Foramen heranreichen.

Anschließend folgte die endgültige Wurzelkanalaufbereitung mit den Feilen F360 in den Größen 025 (F04L25.204.025, Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D) und 035 (F04L25.204.035, Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D), bei größeren Kanälen bis Größe 045 (F04L25.204.045, Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D). Die Wurzelkanalfeilen weisen eine Konizität von 4 % auf (Taper .04).

Nach jedem dritten rotierenden Einbringen einer Feile in den Kanal sowie vor Verwendung der nächstgrößeren Feile wurde jeder Wurzelkanal mit mindestens 2 ml 3 % NaOCl über eine Kunststoffspritze samt Spülkanüle gespült. Hiermit konnte eine potenziell mögliche Verblockung des Kanals durch Dentinspäne und Pulpareste verhindert werden. Zusätzlich wurde die Durchgängigkeit des Wurzelkanals durch das Rekapitulieren mit einer K-Feile der Größe ISO 15 (VDW®STERILE K-Feilen ISO 015/21 mm, VDW GmbH, München, D) sichergestellt.

Um den dreidimensionalen Druck der Zahnwurzeln realitätsnah wiedergeben zu können, mussten die Apices der Wurzeln mit einer von apikal eingebrachten K-Feile der Größe ISO 20 (VDW®STERILE K-Feilen ISO 020/21 mm, VDW GmbH, München, D) etwas erweitert werden.

Im Anschluss an die Wurzelkanalaufbereitung folgte eine Abschlussspülung mit 5 ml 3 % NaOCl, 5 ml 17 % EDTA (CanalPro™ EDTA 17 %, COLTENE Holding AG, Altstätten, CHE) pro Wurzelkanal und danach eine zusätzliche Spülung in einem Ultraschallbad (Souvirex RK 102 Transistor; Typ-Nr. 25187, Bandelin electronic GmbH & Co. KG, Berlin, D) mit 3 % NaOCl für 10 Minuten.

2.3 Herstellung der dreidimensionalen Prüfkörper

2.3.1 Mikro-CT-Scan

Für die Umwandlung der Prüfkörper in 3D-Dateien wurden die aufbereiteten Zahnwurzeln mittels eines Mikro-CT-Scanners (SkyScan 1172; Seriennummer 09H01131; Bruker, Billerica, MA, USA) in der Abteilung für funktionelle Morphologie und Biomechanik des Zoologischen Instituts der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel mit folgenden Scan-Parametern eingescannt: 100 kV, 100 vA, voxel size 26,7 µm, rotation step (deg.) 0,7, 360° rotation.

Für den gleichzeitigen CT-Scan mehrerer Proben wurde eine individualisierte Kunststoffhalterung mithilfe des dreidimensionalen Druckers hergestellt. Diese beinhaltete drei Etagen mit jeweils drei markierten Plätzen für die verschiedenen Methoden der Sealerapplikation sowie einen Platz für eine ungefüllte Zahnwurzel (siehe Abb. 2). Von den ausgewählten Zahnarten sollte jeweils eine ungefüllte Zahnwurzel als Negativkontrolle mit Hilfe des Mikro-CTs eingescannt werden, um das Gesamtvolumen des Wurzelkanals ohne Füllmaterial zu berechnen. Die Negativkontrollen konnten jedoch nicht verwendet werden, da die unterschiedliche Dichte des Kunststoffes der Zahnwurzel im Vergleich zur Luft im Wurzelkanal und deren Graustufen im Auswertungsprogramm nicht darstellbar waren.

Die Befestigung der Proben auf der Etage erfolgte mit einem Universalklebewachs (Supradent-Klebewachs; Oppermann-Schwedler, Bonn, D) unter Zuhilfenahme einer erhitzten Sonde (HS-Thomas-Color Instrumente, PKT-1 gold; Henry Schein, Melville, NY, USA) und einem fließfähigen Silikon (Flexitime Correct Flow, Kulzer GmbH, Hanau, D). Die humanen Zahnwurzeln wurden mit der koronalen Seite nach unten ausgerichtet.



*Abbildung 2:
Platzierung der Kunststoffhalterung mit den Echtzahnwurzeln auf dem Probenhalter des Mikro-CTs*

2.3.2 Erstellung der dreidimensionalen Dateien

Die hergestellten TIFF-Dateien wurden mit dem Programm NRecon (Vers.: 1.6.9.4, Skyscan, Bruker, Billerica, MA, USA) achsengerecht ausgerichtet und rekonstruiert, zusätzlich wurden Ringartefakte vermindert. Aus den rekonstruierten Datensätzen wurden mittels des Programms CTAn (CT Analyser, Vers.: 1.20.8.0, SkyScan, Bruker, Billerica, MA, USA) 3D-Dateien hergestellt.

Um die verschiedenen Prüfkörper nach dem dreidimensionalen Druck unterscheiden zu können, wurden die Zahnwurzeln mit dem Programm Autodesk Netfabb (Vers.: 2021.1, Autodesk GmbH, München, D) entsprechend ihrer Dosennummer beschriftet. Darüber hinaus wurde koronal bei jeder Zahnwurzel an der Außenseite eine Kerbe eingefügt, welche später als Referenzpunkt für den Anfang der Auswertung diente. Alle beschrifteten Zahnwurzeln wurden schließlich im STL-Format gespeichert.

2.3.3 Auswahl der Prüfkörper

Insgesamt wurden jeweils vier aufbereitete Echtzahnwurzeln eines oberen mittleren Frontzahnes, eines unteren zweiten Prämolaren und eines oberen, zweiten Molaren als Vorauswahl digitalisiert. Von diesen Exemplaren wurden lediglich die Wurzel eines Zahnes 35, die Wurzel eines Zahnes 11 sowie die palatinale Wurzel eines Zahnes 27 mit jeweils nur einem Kanalsystem ausgewählt und in den nachfolgenden Schritten der Studie verwendet. Die Auswahl der drei Zahnwurzeln erfolgte visuell anhand der dreidimensionalen Dateien (siehe Abb. 3 und Abb. 4). Entscheidende Kriterien waren eine Wurzelkrümmung unter 20° und eine möglichst anatome Präparation des Kanals ohne starke Kanalbegradigungen. Zudem wurden diejenigen Exemplare bevorzugt, die eine einfache Kanalanatomie ohne laterale Kanäle oder apikale Deltas aufwiesen. Der Grund hierfür war die Herstellung der Prüfkörper mittels 3D-Druckverfahren. Der 3D-Drucker kann aufgrund seiner Auflösung kleinste laterale Kanäle nicht detailgetreu herstellen, weswegen diese den Standardisierungsprozess der Prüfkörper beeinträchtigen könnten.

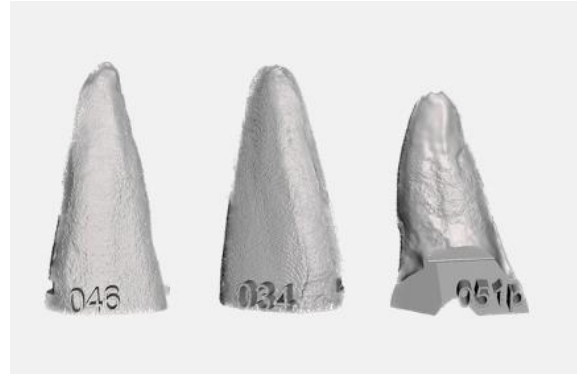
2.3.4 Druck der dreidimensionalen Dateien

Vor dem Druck der Prüfkörper mussten deren STL-Dateien in das Programm PreForm (Vers.: 13.18.0, Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) hochgeladen werden (siehe Abb. 5). Die Ausrichtung der Proben erfolgte mit dem koronalen Ende in Richtung des Druckerbettes in

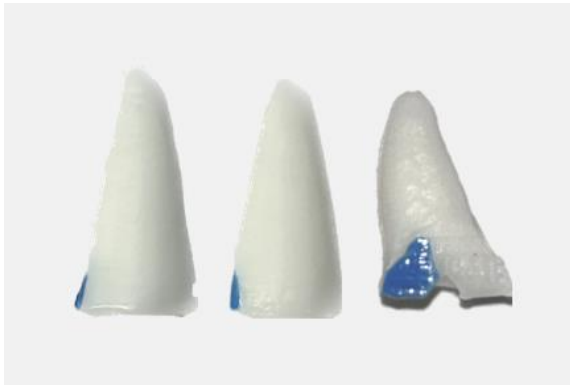
einem leicht gekippten Winkel von ungefähr 30-45°. Für den dreidimensionalen Druck waren spezielle Stützstrukturen an den zu druckenden Zahnwurzeln erforderlich. Diese wurden in einer Dichte von 1,0 mm und einer Berührungspunktgröße von 0,6 mm automatisch vom Programm erzeugt und an der koronalen Seite der Prüfkörper platziert.



*Abbildung 3: Echtzahnwurzeln vor dem Mikro-CT-Scan
links: Prämolare (Zahn 35); mittig: Frontzahn (Zahn 11); rechts: Molare (Zahn 17)*



*Abbildung 4: STL-Dateien der Echtzahnwurzeln mit Kerbe und Nummerierung
links: Prämolarenwurzel; mittig: Frontzahnwurzel; rechts: palatinale Molarenwurzel*



*Abbildung 5: Dreidimensionale Ausdrücke der Zahnwurzeln
links: Prämolarenwurzel; mittig: Frontzahnwurzel; rechts: palatinale Molarenwurzel*

Der 3D-Druck erfolgte mit dem Drucker Form 3 (Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) und weißem Kunstharz (White, V4 FLGPWH04, Standardresin, Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) in einer Schichtdicke von 50 µm. Nach dem beendeten 3D-Druck wurden die Kunststoffzahnwurzeln von der Druckerplattform gelöst und mit Alkohol (2-Propanol Ph.-Eur., Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D) gespült, um das überschüssige, nicht polymerisierte Kunstharz und Lösungsmittel zu entfernen. Vom Hersteller liegt die Empfehlung vor, die

Ausdrucke maximal 10 min in Kontakt mit Alkohol zu bringen, um die erreichbare Endhärte nicht negativ zu beeinflussen (Formlabs 2023). Daher wurde ein genaues Spülprotokoll erstellt und zeitlich streng eingehalten (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Spülprotokoll der dreidimensional gedruckten Prüfkörper

Spülungszeit	Verwendetes Gerät
1 min	Spülstation vom Finish Kit
4 min	Alkoholbadgerät FormWash
3 min	Ultraschallbad
1 min	Zentrifuge
1 min	Alkoholbadgerät FormWash

Bei allen Schritten dieses Vorganges wurde als Spülflüssigkeit 99 %-iges Isopropanol verwendet. Unmittelbar nach dem Druck wurden die Prüfkörper eine Minute lang mit Hilfe der Spülstation des Finish Kits (Finishkit, Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) in dem Alkohol geschwenkt, um grobe Rückstände abzuspielen. Anschließend kamen die Ausdrücke für vier Minuten in das Alkoholbadgerät FormWash (Formlabs Inc., Somerville, MA, USA).

Nun wurden die Stützstrukturen der Prüfkörper manuell abgetrennt, um eine effiziente Spülung der Wurzelkanäle zu gewährleisten. Im nächsten Schritt wurden die Proben in einem dreiminütigen Ultraschallbad gespült und anschließend für eine Minute mit dem Apex nach oben zeigend in einem mit dem Alkohol befüllten Zentrifugenröhrchen (Schraubröhre, 15 ml, 120x17 mm, Sarstedt, Nümbrecht, D) für 60 Sekunden bei $6500 \text{ min}^{-1} / 4.000 \times g$ zentrifugiert (CompactStar CS 4, VWR International GmbH, Darmstadt, D).

Daraufhin folgte das Freipieken der Wurzelkanäle von apikal mit einer K-Feile (ISO 15/21 mm, VDW GmbH, München, D) und das manuelle Spülen der Wurzelkanäle von koronal und apikal. Hierfür wurden eine Kunststoffspritze (BD Discardit II, Becton Dickinson GmbH, Heidelberg, D) mit Spülkanüle (Einmalkanüle 70 mm, Interlock Medizintechnik GmbH, Lensahn, D) sowie mindestens 2 ml Isopropanol pro Wurzelkanal verwendet. Gemäß des Spülprotokolls folgte ein Einlegen der Präparate im Alkoholbadgerät über eine Minute.

Zum Erreichen der Endhärte der gedruckten Prüfkörper wurden diese anschließend für 60 min bei 60°C und einer Wellenlänge von 405 nm im Lichthärtegerät (Form Cure, Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) gemäß der Herstellerempfehlung nachgehärtet (Formlabs 2020).

2.4 Anpassen der Masterpoints

Für die Obturation der Wurzelkanäle wurden die zum Feilensystem zugehörigen Guttaperchaspitzen (F360 Guttaperchaspitzen, Taper .04, Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D) in den Größen ISO 35 und ISO 45 verwendet. Hierbei wurde pro Wurzelkanal der zur letzten Aufbereitungsgröße passende Guttaperchastift so angepasst, dass er bei Einbringen in den Wurzelkanal auf Arbeitslänge eine Klemmpassung, also eine Friktion im apikalen Bereich aufwies.

2.5 Applikation des Sealers

Der in dieser Studie verwendete biokeramische Sealer basiert auf einer Kalziumsilikatbasis (KometBioSeal, Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D) und wird in einer vorgemischten 2g-Applikationsspritze angeboten. Der Sealer wurde mit drei unterschiedlichen Applikationstechniken (Schallaktivierung; Spritzenapplikation und rotierend mittels einer Förderspirale [eines sogenannten Lentulos]) in die Wurzelkanäle der im 3D-Druck hergestellten Prüfkörper eingebracht.

Alle 108 Prüfkörper wurden entsprechend der unterschiedlichen Applikationstechniken des Sealers in drei Gruppen mit jeweils 36 Proben (n=36) eingeteilt (siehe Übersicht Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht des Ablaufs der Wurzelkanalfüllung

[E]: Schallaktivierte Spitze, blaue Markierung; [S]: Applikationsspritze, rosa Markierung;

[L]: Lentulo-Spirale, graue Markierung.

Probenanzahl	Vorgehen		
108	Anpassung der Masterpoints		
jeweils 36	Applikation des Sealers		
	Gruppe 1 [E] 12 Frontzahnwurzeln 12 Prämolarenwurzeln 12 Molarenwurzeln	Gruppe 2 [S] 12 Frontzahnwurzeln 12 Prämolarenwurzeln 12 Molarenwurzeln	Gruppe 3 [L] 12 Frontzahnwurzeln 12 Prämolarenwurzeln 12 Molarenwurzeln
108	Wurzelkanalfüllung: Einstifttechnik		

Die Zahnwurzeln jeder Gruppe wurden koronal mit einem Punkt farbigen Lackes markiert. Um eine Extrusion des Sealers bei der Applikation zu vermeiden, wurden die drei Instrumente jeweils um einen Millimeter kürzer als die Aufbereitungslänge der jeweiligen Wurzelkanäle

eingebraucht. Die entsprechende Länge wurde auf der schallaktivierten Polyamidspitze mit einem wasserfesten Filzstift markiert und bei dem Lentulo und der Spritze mit einem Silikonstopper eingestellt. Die markierten Längen für das Einbringen des Sealers wurden bei jeder Applikationstechnik konstant eingehalten.

2.5.1 Gruppe 1: Schallaktivierte Spitze [E], blaue Markierung

In der ersten Gruppe wurde für die Applikation des Wurzelkanalsealers eine schallaktivierte flexible Polyamidspitze (EDDY™, VDW GmbH, München, D) in einem Sonic-Handstück (KaVo SONICflex 2003L, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D) verwendet (siehe Abb. 6). Die Polyamidspitze wird mit einer Frequenz von 5000-6000 Hz betrieben. Zum Einbringen des Sealers in den künstlichen Wurzelkanal wurde etwas Sealer auf ein kunststoffbeschichtetes Papier (HS-Anmischblock Pergament, Henry Schein, Melville, NY, USA) appliziert, um die Kunststoffspitze im Bereich der markierten Einbringlänge ausreichend zu benetzen. Diese wurde insgesamt fünfmal passiv in den Wurzelkanal eingebracht und nach dem Einbringen bei 300.000 U/min fünf Sekunden lang aktiviert.

2.5.2 Gruppe 2: Applikationsspritze [S], rosa Markierung

In der zweiten Gruppe wurden die Spritzenaufsätze (Endo Tips; Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D), die vom Hersteller des Sealers mitgeliefert werden, für das Einbringen der Wurzelkanalfüllpaste verwendet (siehe Abb. 7). Die Applikationsspritze wurde bis zur markierten Länge, also einen Millimeter kürzer als die Aufbereitungslänge, in die Wurzelkanäle der Prüfkörper eingeführt. Während des langsamen Zurückziehens der Spritze wurde mit leichtem Druck kontinuierlich Sealer abgegeben, bis die Spritze vollständig aus dem Wurzelkanal entfernt war. Zu Beginn jedes neuen Versuchstages wurde ein unbenutzter Spritzenaufsatz verwendet, damit keine älteren Rückstände des Sealers aus dem Aufsatz in die Prüfkörper gelangen konnten.

2.5.3 Gruppe 3: Lentulo-Spirale [L], graue Markierung

Die Applikation des Sealers erfolgte in der dritten Gruppe über eine rotierende Edelstahlspirale (Lentulo®, Größe 2, blau, 17 mm Länge, Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA) in einem grün beringten Winkelstück (INTRACompact 0767 LHC, Übersetzung 5,4:1, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D) bei 500 U/min (siehe Abb. 8). Die Benetzung der Spirale mit Sealer erfolgte im Bereich der markierten Einbringlänge erneut mithilfe eines kunststoffbeschichteten Papiers.

Die Förderspirale wurde insgesamt fünfmal für jeweils fünf Sekunden entlang der Wurzelkanalwand rotierend bis zur eingestellten Länge eingebracht. Bei Erreichen der vorgesehenen Länge wurde die Spirale weiterhin rotierend in einer gleichmäßigen Bewegung aus dem künstlichen Wurzelkanal entfernt.

Jede Methode wurde für drei Prüfkörper der unterschiedlichen Zahnarten hintereinander angewendet. Sobald die Lentulo-Spirale oder das vordere Ende der Polyamidspitze leicht verbogen waren, wurden diese durch neue ersetzt, um ein Frakturieren im Wurzelkanal während der Sealerapplikation zu vermeiden.



Abbildung 6:
Schallaktivierte Spitze **Gruppe 1 [E]**



Abbildung 7:
Spritzenaufsatz **Gruppe 2 [S]**



Abbildung 8:
Lentulo-Spirale **Gruppe 3 [L]**

2.6 Obturation

Als Obturationsmethode wurde die Einstifttechnik gewählt, bei der pro Kanal ein nicht erwärmter Guttaperchastift verwendet wird. Hierbei wurde der für jede Wurzel zuvor eingepasste Guttaperchastift in drei leichten Pumpbewegungen bis auf Arbeitslänge, bei der der Masterpoint Friktion aufweisen sollte, eingeführt. Apikal an den Wurzelspitzen war nach Erreichen der Klemmpassung bei allen Prüfkörpern eine leichte Sealerextrusion zu erkennen.

Die koronal überstehenden Reste der Guttaperchastifte wurden mithilfe eines heißen Instruments (Plugger mit Silikongriff, Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA) abgeschmolzen und so der koronale Anteil der Wurzelkanalfüllung verdichtet.

Aufgrund seiner hydrophilen Eigenschaften bindet der biokeramische Sealer optimal bei geringer Restfeuchtigkeit ab. Daher wurden die wurzelgefüllten Prüfkörper für 48 Stunden bei 100 % Luftfeuchtigkeit und 36 °C in einem Inkubator (Thermo Heraeus B 6060 Brutschrank Incubator Wärmeschrank 57 L 50 °C Stackable, Heraeus INSTRUMENTS, Hanau, D) gelagert. Dies diente einer Simulation der intraoralen Bedingungen, bei denen eine geringe Restfeuchtigkeit von den Dentinkanälchen der Wurzelkanalwand ausgeht und somit die vollständige Aushärtung des Sealers sichergestellt ist.

2.7 Mikro-CT-Scan

Nach der Lagerung der Prüfkörper in dem Inkubator wurden diese für einen erneuten Scan mit dem Mikro-CT vorbereitet. Hierfür wurden die Prüfkörper auf der individualisierten Kunststoffetagere mithilfe von Wachs und Silikon, wie bereits beschrieben, platziert (siehe Abb. 9 und Abb. 10). Auch hier wurde das koronale Ende der Kunststoffwurzel zur Basis der Etagere ausgerichtet. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich jede Wurzel auf der entsprechenden Markierung für die verwendete Applikationsmethode des Sealers befand und weder die numerische Beschriftung noch die in den Prüfkörper eingearbeitete Rille von Wachs oder Silikon bedeckt waren. Anschließend wurde der Mikro-CT-Scan durchgeführt. Die eingestellten Parameter waren: 100 kV, 100 vA, voxel size 13,38 μm , rotation step (deg) 0,4, 360° rotation.



Abbildung 9: Befestigte, wurzelgefüllte Prüfkörper auf der Kunststoffhalterung



Abbildung 10: Nahaufnahme der Prüfkörper auf der Kunststoffhalterung

2.8 Datenerhebung

In dieser Studie erfolgten die Datenerhebung sowie die dreidimensionale Visualisierung der Probekörper unter Zuhilfenahme des Programmes Amira (Amira Software Life Sciences, Vers.: 6.2.0, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA). Amira eignet sich für die Segmentierung und Berechnung verschiedener Volumina (Anbiaee et al. 2019; Hsu et al. 2021). Die durch

den CT-Scan erhaltenen TIFF-Dateien mussten zuvor mithilfe des Programms NRecon rekonstruiert und im PNG-Format in das Programm Amira geladen werden.

Im ersten Schritt vor der Datenerhebung wurden die in das Programm geladenen Daten in Dreiergruppen unterteilt und als Amira-Dateien abgespeichert. So ergaben sich Datensätze mit jeweils drei Probekörpern der gleichen Zahnart, die mit den drei verschiedenen Applikationsmethoden des Sealers gefüllt wurden.

Folgende Parameter wurden im Rahmen der Datenerhebung erfasst:

- Das Gesamtvolumen der Wurzelfüllung (Guttapercha und Sealer)
- Das Gesamtvolumen der vorhandenen Hohlräume
- Die Anzahl der vorhandenen Hohlräume
- Die Anzahl der randständigen Hohlräume (Hohlräume an der Grenzfläche zwischen Sealer und Wurzelkanalwand).

2.8.1 Segmentierung der Materialien

Im Rahmen der Datenerhebung wurden die Amira-Dateien als zweidimensionale, z-Achsenorientierte Schnittbilder, welche als „OrthoSlices“ bezeichnet wurden, betrachtet (siehe Abb. 11). Insgesamt lagen zwischen 800 und 1400 solcher Grauwertbilder vor.

Um die einzelnen Volumina zu berechnen, mussten zunächst alle Materialien, also die Wurzelkanalfüllung und die vorhandenen Lufteinschlüsse, segmentiert und benannt werden (siehe Abb. 12-14 und im Anhang unter 7.2). Dazu wurden in Amira sogenannte "Labels" erstellt, zu denen jeder Voxel, das heißt jeder dreidimensionale Pixel, im Bild zugewiesen wurde. Hierfür musste jede Struktur der zweidimensionalen Schnittbilder entweder manuell mit einem Pinsel im Programm markiert oder automatisch mit einem "Zauberstab" erkannt werden. Anschließend wurde das markierte Material über den +-Button dem entsprechenden Label hinzugefügt.

Das Prinzip des „Zauberstabes“ beruht darauf, dass jedes Material im CT-Scan einen eigenen Bereich an Grauwerten besitzt und sich Materialien mit unterschiedlichen Dichten in diesen Grauwerten voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund kann für jedes Material eine eigene Maske erstellt werden, welche den Bereich der Grauwerte umfasst, die diesem Material entsprechen.

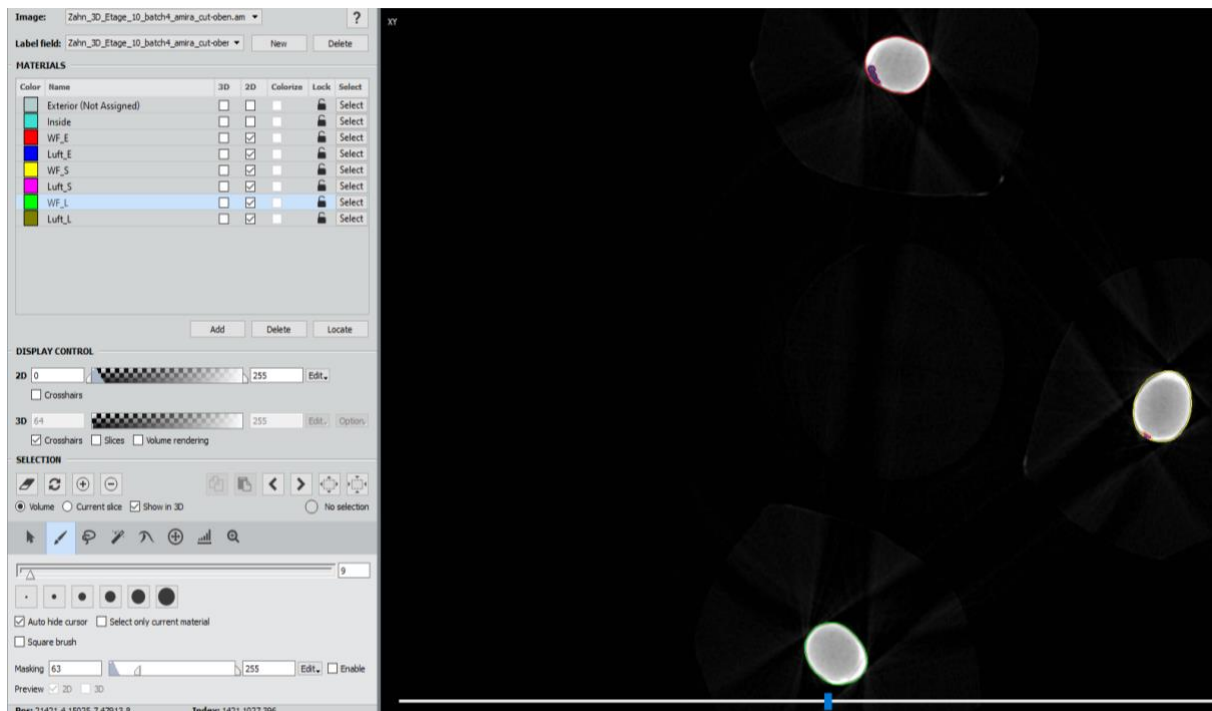


Abbildung 11:
Benutzeroberfläche des Programms "Amira" mit fertig markierten und benannten Prüfkörpern

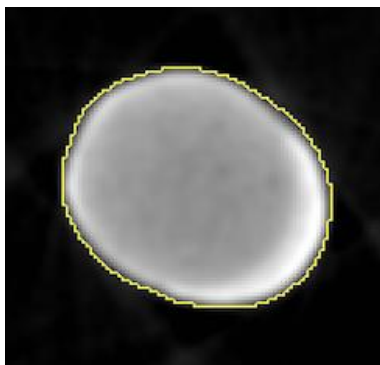


Abbildung 12:
Wurzelkanalfüllung ohne
Hohlräume nach
Segmentierung

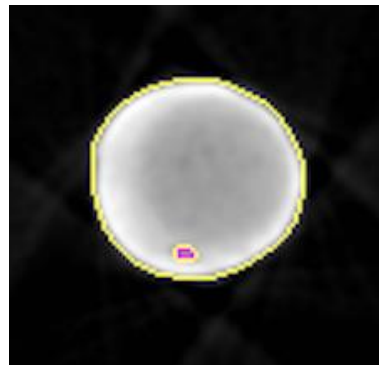


Abbildung 13:
Wurzelkanalfüllung mit
Hohlraum innerhalb der Füllung

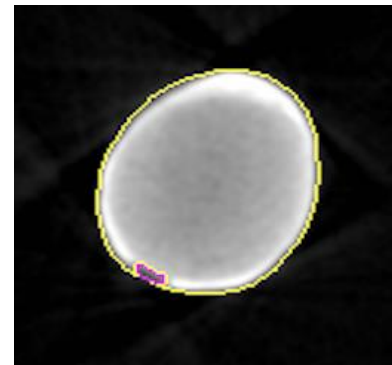


Abbildung 14:
Wurzelkanalfüllung mit
Hohlraum an der Grenzfläche
zwischen Füllung und
Kanalwand

2.8.2 Anfangs- und Endpunkt der Auswertung

Aufgrund der dreidimensional gedruckten Beschriftungen auf der Kunststoffhalterung war gut erkennbar, welche Applikationsmethode des Sealers bei den jeweiligen Prüfkörpern angewandt wurde. Als Ausgangspunkt für die Berechnungen diente die zuvor in die Kunststoffwurzeln eingearbeitete Rille, während der Endpunkt durch den Apex der Zahnwurzeln bestimmt wurde. Für jede Zahnart wurde ein gleichgroßer Bereich entlang der gesamten

Länge der Wurzelkanalfüllung für die Auswertung inkludiert. Dieser Bereich wurde durch eine gleiche Anzahl an Schnittbildern pro Zahnart in dem Programm festgelegt.

2.8.3 Berechnung der Volumina

Durch die Erstellung der einzelnen „labels“ konnte das Programm mittels der Funktion „material statistics“ von allen zuvor markierten Bereichen die Volumina errechnen. Diese wurden tabellarisch in der Einheit μm^3 aufgezeigt. Außerdem wurde die Anzahl der vorgefundenen Hohlräume sowie die Anzahl randständiger Hohlräume pro Wurzelkanalfüllung manuell ausgezählt.

2.9 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der erhobenen Daten erfolgte mithilfe des Programms GraphPad Prism (Vers.: 9.5.1, GraphPad Software, San Diego, USA). Hierbei wurden alle im Rahmen der Datenerhebung erfassten Werte einbezogen. Dies waren das Gesamtvolumen der Wurzelkanalfüllung (in μm^3), das Gesamtvolumen der Hohlräume pro Wurzelkanalfüllung (in μm^3), die Anzahl vorhandener Hohlräume sowie die Anzahl randständiger Hohlräume pro Wurzelkanalfüllung. Darüber hinaus wurde das Volumenverhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen (in %) wie folgt berechnet:

$$\frac{\text{Hohlraumvolumen } [\mu\text{m}^3]}{\text{Gesamtvolumen der Wurzelfüllung } [\mu\text{m}^3]} \times 100 = \text{Volumenverhältnis } [\%]$$

Außerdem wurde das Verhältnis der Anzahl der randständigen Hohlräume an der Gesamtanzahl vorhandener Hohlräume pro Prüfkörper bestimmt. Zum einen wurden die drei Applikationsmethoden des Sealers, zum anderen die drei unterschiedlichen Zahnarten untereinander hinsichtlich dieser Parameter verglichen.

2.9.1 Powerberechnung

Für diese Studie wurde die benötigte Fallzahl mit einer Power von 90 %, das heißt einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\beta=0,10$ und einer Standardabweichung von 1,00 berechnet. Die Powerberechnung dient dem Festlegen einer Wahrscheinlichkeit, bei der ein echter Effekt erkennbar ist und wurde mithilfe des Programms G*Power (Vers.: 3.1.9.2, Franz Faul, Universität Kiel, D) durchgeführt (Faul et al. 2007). Zur Adjustierung des Signifikanzniveaus

wurde zusätzlich eine Korrektur nach Bonferroni angewandt, somit war $\alpha=0.0167$. Daraus ergab sich ein Stichprobenumfang von $n=34$ pro Gruppe und $n=102$ insgesamt (Bock 1998).

2.9.2 Vergleich der Gruppen der Sealerverteilung und der Zahnarten

Im Rahmen der statistischen Auswertung wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA one-way) für folgende Parameter angewandt:

- Die Anzahl vorhandener Hohlräume
- Das Volumen vorhandener Hohlräume
- Das Volumenverhältnis der Hohlräume am Gesamtvolumen der Wurzelkanalfüllung sowie
- Die Anzahl an randständigen Hohlräumen und deren Verhältnis an der Gesamtanzahl vorhandener Hohlräume.

Das Signifikanzniveau wurde auf $p<0,05$ festgelegt. Als multipler Vergleichstest aller Gruppen der Applikationstechniken und der Zahnarten untereinander wurde der Tukey-post-hoc Test verwendet. Balken-Diagramme dienten der graphischen Darstellung der statistischen Auswertung.

3 Ergebnisse

3.1 Anzahl vorhandener Hohlräume

3.1.1 Anzahl vorhandener Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode

Die Auswertung der Anzahl der Hohlräume innerhalb der Wurzelkanalfüllung mit Hilfe des multiplen Vergleichstests (Tukey-post-hoc) zeigte den größten Wert (höchste Anzahl vorhandener Hohlräume) für die schallaktivierte Spitze (MW = $6,78 \pm 4,93$) und den geringsten Wert für die Applikationsspritze (MW = $5,47 \pm 3,26$), die Werte unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander ($p > 0,36$). Zwischen der Spritze und der Lentulo-Spirale (5,47 vs. 6,58; $p > 0,48$) sowie zwischen der Lentulo-Spirale und der schallaktivierten Spitze (6,58 vs. 6,78; $p > 0,78$; siehe Tabelle 3 und Diagramm 1) fanden sich ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede. Keine Wurzelkanalfüllung der 108 untersuchten Prüfkörper war vollständig frei von Hohlräumen.

Tabelle 3: Deskriptive Statistik der Anzahl vorhandener Hohlräume innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode.

Statistik	Schallaktivierte Spitze [E]	Applikationsspritze [S]	Lentulo-Spirale [L]
Minimum	2	1	2
Median	5	5,5	6
Maximum	24	13	20
Mittelwert	6,78	5,47	6,58
Std. Abweichung	4,93	3,26	3,77

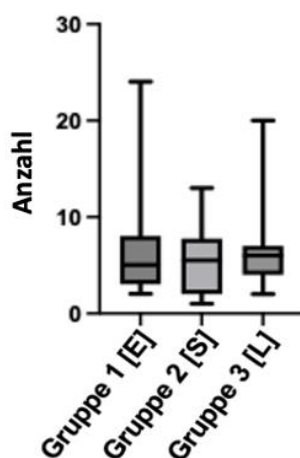


Diagramm 1: Anzahl an Hohlräumen innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode. [E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale.

3.1.2 Anzahl vorhandener Hohlräume in Bezug zur Zahnart

Die Auswertung der Anzahl der Hohlräume innerhalb der Wurzelkanalfüllung mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA one-way) zeigte bei der Frontzahnwurzel die höchste Anzahl für die Applikationsspritze (MW = $6,67 \pm 3,63$). Die schallaktivierte Spitze (MW = $5,83 \pm 4,59$) und die Lentulo-Spirale (MW = $5,58 \pm 3,55$) erzeugten geringere Werte bei der Frontzahnwurzel, allerdings unterscheiden sich die Werte nicht signifikant voneinander ($p > 0,78$; siehe Diagramm 2a).

Im Vergleich dazu fand sich bei der Prämolarenwurzel der größte Wert bei der schallaktivierbaren Spitze (MW = $6,50 \pm 3,18$) und der kleinste Wert bei der Applikationsspritze (MW = $4,50 \pm 2,78$). Die im Schnitt durch die Lentulo-Spirale erzeugte Anzahl der Hohlräume lag bei der Prämolarenwurzel dazwischen (MW = $5,67 \pm 2,27$), die Werte unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander ($p > 0,22$; siehe Diagramm 2b).

Bei der Molarenwurzel fand sich ebenfalls der kleinste Wert bei der Applikationsspritze (MW = $5,25 \pm 3,19$). Sowohl die Lentulo-Spirale (MW = $8,50 \pm 4,62$) als auch die schallaktivierbare Spitze (MW = $8,00 \pm 6,61$) erzeugten mehr Hohlräume. Die Unterschiede waren allerdings statistisch nicht signifikant ($p > 0,25$; siehe Diagramm 2c).

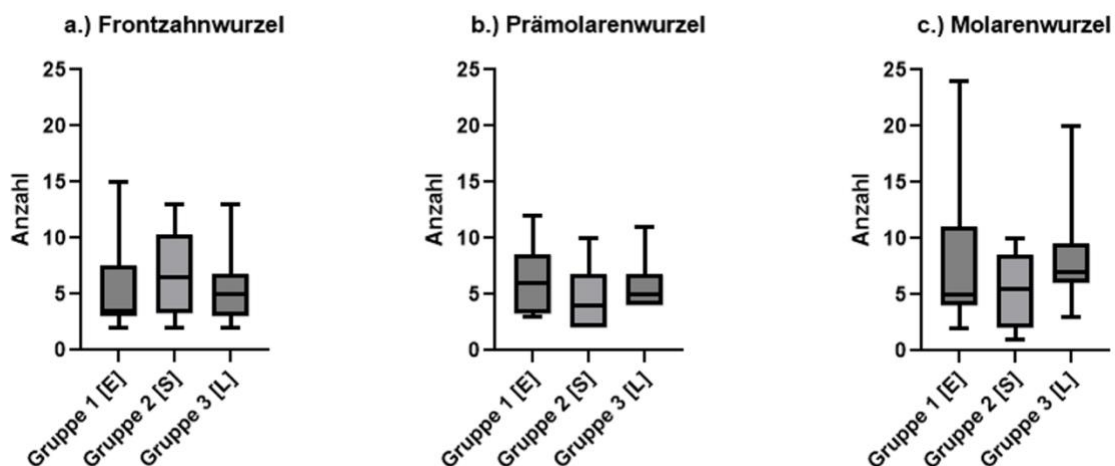


Diagramm 2: Anzahl an Hohlräumen innerhalb der Füllung in Bezug zur Zahnart;
a.) Frontzahnwurzel; b.) Prämolarenwurzel; c.) Molarenwurzel
[E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale.

3.2 Volumen vorhandener Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode

Das vom Auswertungsprogramm ausgegebene Volumen der Hohlräume und der Wurzelkanalfüllung in μm^3 wurde durch eine Division um den Faktor 10^9 in die Einheit mm^3 umgerechnet. Die Auswertung des Volumens der Hohlräume innerhalb der Wurzelkanalfüllung mit Hilfe des multiplen Vergleichstests (Tukey-post-hoc) zeigte den größten Wert (höchstes Volumen vorhandener Hohlräume) für die schallaktivierte Spitze (MW = $0,022 \text{ mm}^3 \pm 0,046 \text{ mm}^3$) und den geringsten Wert für die Spritze (MW = $0,007 \text{ mm}^3 \pm 0,008 \text{ mm}^3$), die Werte unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander ($p > 0,07$). Bei der Spritze, verglichen mit der Lentulo-Spirale ($0,007 \text{ mm}^3$ vs. $0,012 \text{ mm}^3$; $p > 0,71$), und bei der Lentulo-Spirale, verglichen mit der schallaktivierten Spitze ($0,012 \text{ mm}^3$ vs. $0,022 \text{ mm}^3$; $p > 0,31$; siehe Tabelle 4 und Diagramm 3), fanden sich ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Volumens vorhandener Hohlräume.

Tabelle 4: Deskriptive Statistik des Volumens der Hohlräume [in mm^3] innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode.

Statistik	Schallaktivierte Spitze [E]	Applikationsspritze [S]	Lentulo-Spirale [L]
Minimum [mm^3]	0,00021	0,00015	0,00035
Median [mm^3]	0,00698	0,00323	0,00746
Maximum [mm^3]	0,25650	0,02678	0,08434
Mittelwert [mm^3]	0,022	0,007	0,012
Std. Abweichung [mm^3]	0,046	0,008	0,017

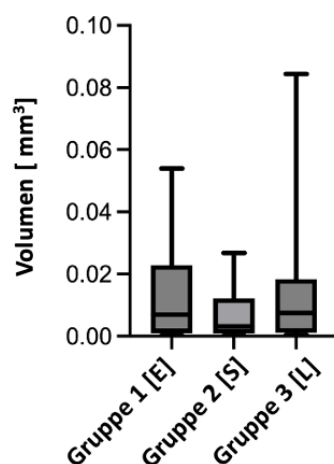


Diagramm 3: Volumen der Hohlräume [in mm^3] innerhalb der Füllung in Bezug zur Applikationsmethode [E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale.

3.3 Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung

3.3.1 Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung in Bezug zur Applikationsmethode

Bei der Auswertung des Verhältnisses von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung mit Hilfe des multiplen Vergleichstests (Tukey-post-hoc) zeigte sich der größte Wert bei der schallaktivierten Spitze (MW = 0,47 % ± 1,24 %) und der geringste Wert bei der Spritze (MW = 0,12 % ± 0,18 %), die Werte unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander ($p > 0,12$). Zwischen der Spritze und der Lentulo-Spirale (0,12 % vs. 0,20 %; $p > 0,91$) sowie zwischen der Lentulo-Spirale und der schallaktivierten Spitze (0,20 % vs. 0,47 %; $p > 0,26$; siehe Tabelle 5 und Diagramm 4) fanden sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 5: Deskriptive Statistik des Verhältnisses von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Füllung [in %] in Bezug zur Applikationsmethode.

Statistik	Schallaktivierte Spitze [E]	Applikationsspritze [S]	Lentulo-Spirale [L]
Minimum [%]	0,003	0,002	0,007
Median [%]	0,149	0,044	0,097
Maximum [%]	7,415	0,973	1,117
Mittelwert [%]	0,47	0,12	0,20
Std. Abweichung [%]	1,24	0,18	0,25

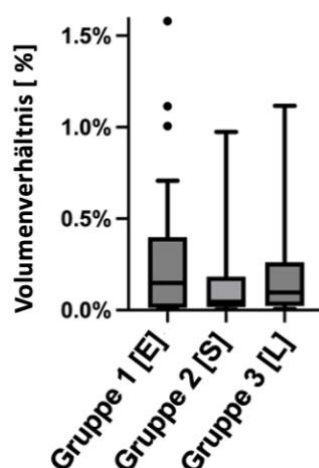


Diagramm 4: Volumenverhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Füllung [in %] in Bezug zur Applikationsmethode

[E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale. Die Punkte oberhalb des Whiskers von Gruppe 1 repräsentieren Ausreißer, die signifikant von den anderen Datenpunkten abweichen.

3.3.2 Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung in Bezug zur Zahnart

Die Auswertung des Verhältnisses von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung in Bezug zur Zahnart mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA one-way) zeigte bei der Frontzahnwurzel den größten Wert für die Lentulo-Spirale (MW = 0,30 % \pm 0,34 %) und den geringsten Wert für die Applikationsspritze (MW = 0,11 % \pm 0,11 %). Das Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelfüllung, das durch die schallaktivierbare Spitze erzeugt wurde, lag im Schnitt dazwischen (MW = 0,27 % \pm 0,45 %). Die Werte unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander ($p > 0,32$; siehe Diagramm 5a).

Bei der Prämolarenwurzel fand sich der größte Wert bei der schallaktivierbaren Spitze (MW = 0,13 % \pm 0,21 %) und geringere Werte bei der Spritze (MW = 0,03 % \pm 0,02 %) und der Lentulo-Spirale (MW = 0,04 % \pm 0,05 %). Allerdings unterscheiden sich die Werte nicht signifikant voneinander ($p > 0,09$; siehe Diagramm 5b).

Analog dazu fand sich auch bei der Molarenwurzel der größte Volumenanteil der Blasen in der Wurzelkanalfüllung bei der schallaktivierbaren Spitze (MW = 1,01 % \pm 2,05 %) und geringere Werte bei der Spritze (MW = 0,23 % \pm 0,26 %) und der Lentulo-Spirale (MW = 0,24 % \pm 0,19 %). Die Unterschiede zwischen den Applikationsmethoden bei der Molarenwurzel sind jedoch nicht statistisch signifikant ($p > 0,20$; siehe Diagramm 5c).

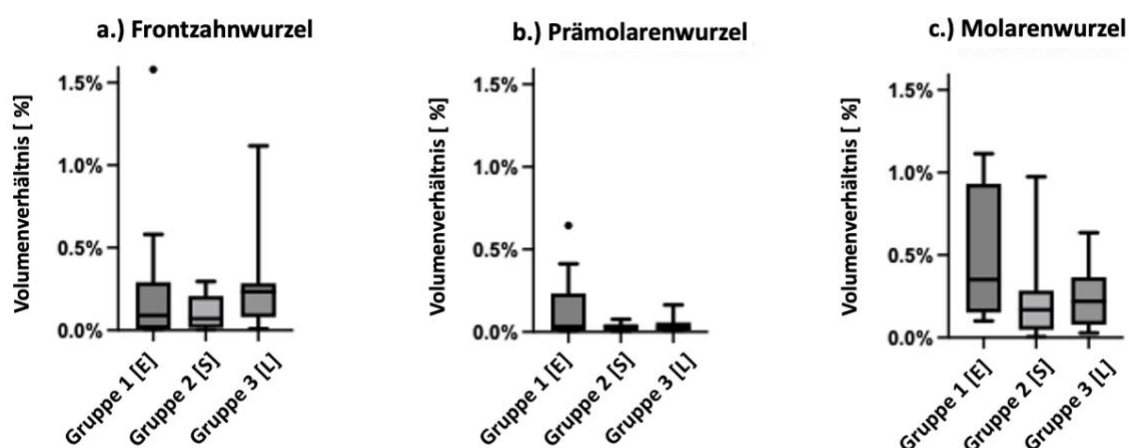


Diagramm 5: Volumenverhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Füllung [in %] in Bezug zur Zahnart; a.) Frontzahnwurzel; b.) Prämolarenwurzel; c.) Molarenwurzel

[E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale. Die Punkte oberhalb der Whisker bei Gruppe 1 der Diagramme a.) und b.) repräsentieren Ausreißer, die signifikant von den anderen Datenpunkten abweichen.

3.4 Anzahl randständiger Hohlräume

3.4.1 Anzahl randständiger Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode

Die Auswertung der Anzahl an randständigen Hohlräumen in Bezug zur Applikationsmethode mit Hilfe des multiplen Vergleichstests (Tukey-post-hoc) zeigte den größten Wert (höchste Anzahl randständiger Hohlräume) für die schallaktivierte Spitze (MW = $0,61 \pm 0,73$) und den geringsten Wert für die Spritze (MW = $0,39 \pm 0,65$), die Werte unterscheiden sich aber nicht signifikant voneinander ($p > 0,33$). Zwischen der schallaktivierten Spitze und der Lentulo-Spirale ($0,61$ vs. $0,50$; $p > 0,76$) und zwischen der Lentulo-Spirale und der Spritze ($0,50$ vs. $0,39$; $p > 0,76$; siehe Tabelle 6) fanden sich ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Tabelle 6: Deskriptive Statistik der Anzahl randständiger Hohlräume in der Wurzelfüllung in Bezug zur Applikationsmethode.

Statistik	Schallaktivierte Spitze [E]	Applikationsspritze [S]	Lentulo-Spirale [L]
Minimum	0	0	0
Median	0	0	0
Maximum	2	2	2
Mittelwert	0,61	0,39	0,50
Std. Abweichung	0,73	0,65	0,61

3.4.2 Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an Gesamtanzahl der Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode

Die Auswertung des Verhältnisses der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamtanzahl der vorhandenen Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode des Sealers mit Hilfe des multiplen Vergleichstests (Tukey-post-hoc) zeigte den größten Wert für die schallaktivierte Spitze (MW = $14,00 \% \pm 17,14 \%$) und den geringsten Wert für die Lentulo-Spirale (MW = $11,61 \% \pm 15,17 \%$), die Werte unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander ($p > 0,85$). Zwischen der schallaktivierten Spitze, verglichen mit der Spritze ($14,00 \%$ vs. $11,72 \%$; $p > 0,86$), und zwischen der Lentulo-Spirale, verglichen mit der Spritze ($11,61 \%$ vs. $11,72 \%$; $p > 0,99$; siehe Tabelle 7 und Diagramm 6), zeigten sich ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Tabelle 7: Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamtanzahl der Hohlräume [in %] in Bezug zur Applikationsmethode.

Statistik	Schallaktivierte Spitze [E]	Applikationsspritze [S]	Lentulo-Spirale [L]
Minimum [%]	0	0	0
Median [%]	0	0	0
Maximum [%]	50,00	100,0	50,00
Mittelwert [%]	14,00	11,72	11,61
Std. Abweichung [%]	17,14	22,07	15,17

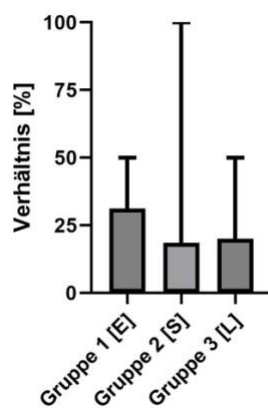


Diagramm 6: Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an Gesamtanzahl der Hohlräume in Bezug zur Applikationsmethode [in %]

[E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale.

3.4.3 Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an Gesamtanzahl der Hohlräume in Bezug zur Zahnart

Bei der Auswertung hinsichtlich des Verhältnisses der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamtanzahl der Hohlräume in Bezug zur Zahnart mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA one-way) fand sich bei der Molarenwurzel der größte Wert bei der schallaktivierten Spitze (MW = 23,47 % ± 19,35 %) und der geringste Wert bei der Lentulo-Spirale (MW = 6,61 % ± 10,42 %). Der Mittelwert der Applikationsspritze lag dazwischen (MW = 16,11 % ± 30,15 %). Bei der Molarenwurzel fanden sich im Vergleich zu der Frontzahn- und der Prämolarenwurzel die größten, jedoch nicht statistisch signifikanten Unterschiede ($p > 0,17$; siehe Diagramm 7c).

Bei der Frontzahnwurzel ([E] MW = 9,72 % ± 15,01 %, [S] MW = 7,39 % ± 12,18 %, [L] MW = 15,36 % ± 18,11 %; $p > 0,43$; siehe Diagramm 7a) und der Prämolarenwurzel ([E] MW = 8,80 % ± 13,70 %, [S] MW = 11,67 % ± 21,25 %, [L] MW = 12,86 % ± 15,87 %; $p > 0,84$; siehe Diagramm 7b) ergaben sich hinsichtlich des Verhältnisses der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamtanzahl der Hohlräume ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Applikationsmethoden.

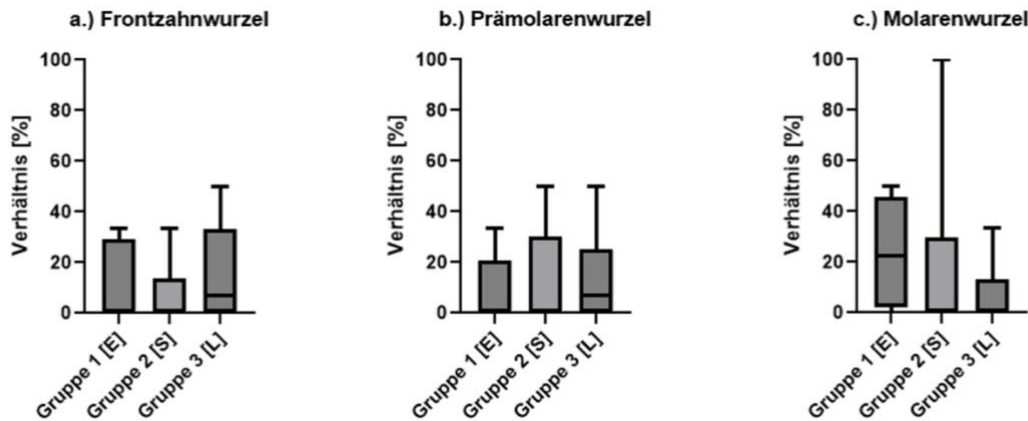


Diagramm 7: Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamtanzahl der Hohlräume der Füllung [in %] in Bezug zur Zahnart; a.) Frontzahnwurzel; b.) Prämolarenwurzel; c.) Molarenwurzel [E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale.

4 Diskussion

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung, inwiefern sich drei unterschiedliche Applikationsmethoden eines biokeramischen Sealers auf das Auftreten von Hohlräumen innerhalb der Wurzelkanalfüllung auswirken.

Durch eine ausreichende Verteilung des Sealers im Wurzelkanal sollen die Kanalwände vollständig benetzt und dadurch die Entstehung von Blasen weitestgehend verhindert werden. Hohlräume in der Wurzelkanalfüllung können eine mögliche Eintrittspforte für Mikroorganismen und Flüssigkeiten sein, die für eine Rekontamination des Wurzelkanals hauptverantwortlich sind. Somit kann sich das Auftreten von Hohlräumen in der Füllung stark auf die Erfolgswahrscheinlichkeit der endodontischen Behandlung auswirken (Cheung 2002; Gulabivala und Ng 2023; Tomson et al. 2014).

Die für die Studie ausgewählten Echtzahnwurzeln wurden maschinell aufbereitet, mit Hilfe eines Mikro-CTs digitalisiert und mittels 3D-Druckverfahren vervielfältigt, sodass eine Standardisierung aller Prüfkörper vorlag. Für das Einbringen des Sealers wurden eine schallaktivierbare Polyamidspitze, eine vom Hersteller des Sealers bereitgestellte Applikationsspritze sowie eine Lentulo-Spirale verwendet. Die Wurzelkanalobturation fand im Sinne der Einstiftfüllmethode statt. Schließlich wurden die vorhandenen Hohlräume in der Füllung erfasst und mit dem Gesamtvolumen der Wurzelkanalfüllung ins Verhältnis gesetzt.

In der Literatur gibt es Studien, die verschiedene Methoden zur Applikation des Sealers hinsichtlich des Auftretens von Hohlräumen untersucht haben, allerdings wurde nur in wenigen Untersuchungen ein Sealer auf Kalziumsilikat-Basis eingesetzt (Atmeh et al. 2022; Bhor et al. 2023). Davon verwendeten lediglich Atmeh et al. (2022) den biokeramischen Sealer zusammen mit der Einstiftfülltechnik.

4.1 Diskussion von Material und Methoden

4.1.1 Limitation der Prüfkörper

Angesichts der vielfältigen anatomischen Variationen von Zähnen erfordert die Beherrschung endodontischer Behandlungen ein beträchtliches Maß an Übung und handwerkliches Geschick. Um die klinischen Bedingungen bestmöglich zu simulieren, werden häufig extrahierte menschliche Zähne verwendet, da bisher kein Ersatzmaterial existiert, das die identischen physikochemischen und morphologischen Eigenschaften eines natürlichen Zahns

aufweist (De-Deus et al. 2022). Aus diesem Grund werden auch in der Forschung seit Jahrzehnten extrahierte Echtzähne verwendet. Der Einsatz von humanen extrahierten Zähnen wird jedoch durch diverse Faktoren stark limitiert. Die Verfügbarkeit von intakten Zähnen ohne kariöse Läsionen, Frakturen, umfangreiche Restaurationen oder vorhandene Wurzelfüllungen ist äußerst begrenzt (Reis et al. 2022; Reymus et al. 2019). Des Weiteren bleiben oft wichtige Informationen über die Herkunft des natürlichen Zahns unberücksichtigt, die die Mikrostruktur des Dentins beeinflusst haben könnten. Dazu gehören beispielsweise die Okklusion und mögliche Parafunktionen des Zahns sowie die unmittelbare Lagerung nach der Extraktion (De-Deus et al. 2022). Weitere kritische Punkte bei der Verwendung extrahierter Zähne sind bioethische Bedenken und der hohe Desinfizierungsaufwand.

Eine Alternative zu natürlichen Zähnen sind industriell hergestellte, transparente Acryl-Blöcke, die gerade oder gekrümmte Wurzelkanäle simulieren. Aufgrund ihrer geringen Kosten, der einfachen Produktion und der daraus resultierenden hohen Verfügbarkeit werden solche Kunststoffblöcke bereits seit über 40 Jahren in der Endodontologie eingesetzt (De-Deus et al. 2022; Spent und Kahn 1979). Vor allem in der zahnmedizinischen Ausbildung werden sie aufgrund der Transparenz und dem damit verbundenen vereinfachten Erlernen endodontischer Arbeitsschritte eingesetzt. Darüber hinaus bieten sie durch die einheitliche Länge, den Durchmesser und die Krümmung eine standardisierte Ausgangsbasis für Studien sowie vergleichbare Bedingungen in der Ausbildung und in Prüfungssituationen (Dummer et al. 1991; Kahn et al. 1997). Trotzdem stellen die Acryl-Blöcke lediglich eine vereinfachte Darstellung eines einzelnen Kanals dar, ohne akzessorische Kanäle oder weitere anatomische Besonderheiten, weshalb sie nicht die Komplexität des Wurzelkanalsystems eines natürlichen Zahns widerspiegeln können (Reymus et al. 2019).

Eine detailliertere Nachbildung der Wurzelkanalanatomien bieten käuflich erwerbbar Kunststoffzähne aus künstlich hergestellten Zahnmodellen. Da sie den Anatomien humaner Zähne stark ähneln und gleichzeitig die Vorzüge der Kunststoffblöcke nutzen wie beispielsweise die nahezu unbegrenzte Verfügbarkeit, werden solche künstlich hergestellten Zähne häufig in endodontischen Studien sowie in der Ausbildung angehender Zahnärztinnen und Zahnärzte eingesetzt (De-Deus et al. 2022; Kim et al. 2017). Aufgrund der begrenzten Zahntypen, der eingeschränkten anatomischen Variationen sowie der abweichenden Materialeigenschaften des Kunststoffs im Vergleich zum Dentin sind diese künstlich hergestellten Zähne den menschlichen Zähnen dennoch unterlegen (Reis et al. 2022).

Gemäß aktuellem Stand bieten dreidimensional gedruckte Replikate von digitalisierten, humanen Zähnen die realistischsten Anatomien unter den verfügbaren Zahnalternativen aus Kunststoff (Reymus et al. 2020). Die 3D-Zähne eignen sich in vielerlei Hinsicht als Ersatz der Echtzähne und wurden bereits in einigen Studien über Wurzelkanalfüllmaterialien und -techniken eingesetzt (Decurcio et al. 2019; Gok et al. 2017; Karatekin et al. 2019; Reis et al. 2022). Moderne bildgebende Verfahren wie die digitale Volumetomographie oder das Mikro- oder Nano-CT ermöglichen hochauflösende dreidimensionale Scans von extrahierten Zähnen, aus denen mithilfe von Computersoftware 3D-Modelle erstellt werden können. Obwohl die DVT bereits seit vielen Jahren im 3D-Druck Anwendung findet, ist sie in Bezug auf die Präzision und die Auflösung der dreidimensionalen Aufnahmen dem Mikro-CT unterlegen (Kulczyk et al. 2019). Deshalb wurden die humanen Zahnwurzeln in dieser Studie mittels Mikro-CT-Scan digitalisiert, um die höchstmögliche Genauigkeit der Kunststoffreplikate zu gewährleisten. Durch die hohe Präzision des 3D-Drucks entsteht die Möglichkeit, identische Kopien in unbegrenzter Anzahl herzustellen, was eine Standardisierung für ex-vivo-Studien ermöglicht (Hülsmann 2022; Kooanantkul et al. 2023; Reis et al. 2022). Dieser Ansatz umgeht einen potenziellen Einfluss der anatomischen Heterogenität humaner Zähne auf die Studienergebnisse, weshalb dreidimensional gedruckte Zahntypen zunehmend in der endodontischen Forschung Verwendung finden. In zwei ex-vivo-Studien wurden die 3D gedruckten Replikate mit den Kanälen der entsprechenden Echtzähne auf ihre Ähnlichkeit hin verglichen (Cui et al. 2018; Liang et al. 2018). Beide Untersuchungen ergaben keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Kunststoffzähnen und ihren Originalen hinsichtlich der Kanalbeschaffenheiten, was die Eignung der 3D-Zähne als Ersatz für Echtzähne in Studien unterstreicht. Es ist jedoch anzumerken, dass beide Studien eine geringe Fallzahl aufwiesen.

Der 3D-Druck von Echtzähnen bietet zahlreiche Möglichkeiten für die endodontische Forschung, geht jedoch auch mit Einschränkungen und Nachteilen einher. Ein diskutierter Aspekt bei dem Einsatz gedruckter Zahnwurzeln für Studien über Füllungstechniken und -materialien ist die Schwierigkeit, überschüssiges Kunstharz vor Versuchsbeginn aus dem Wurzelkanal zu entfernen (Hülsmann 2022; Reymus et al. 2019). Um die apikale Durchgängigkeit der Wurzelkanäle nach dem 3D-Druck sicherzustellen, wurden die Echtzähne in der durchgeführten Studie vor dem Mikro-CT-Scan ähnlich wie bei Reymus et al. (2019) von retrograd leicht mit einer Handfeile präpariert. Darüber hinaus wurden die zu druckenden

Zahnwurzeln auf dem Druckerbett in einem Winkel von 30-45° positioniert. Dieser Schritt wurde aufgrund der nachweislich besseren Produktion der Zahnwurzeln in einer Druckrichtung von 45° durch den SLA-Drucker durchgeführt (Hada et al. 2020). Besonders relevant für die Durchgängigkeit der Wurzelkanäle nach dem 3D-Druck ist das gründliche Ausspülen überschüssigen Kunstharzes vor dem vollständigen Aushärten der Prüfkörper. Ohne diesen Schritt wäre eine originalgetreue Herstellung und die exakte Reproduktion der Zahnwurzeln nicht möglich. Allerdings beschreibt kaum eine Studie, die 3D-Zähne verwendet, diesen Vorgang ausführlich. Reymus et al. (2019) empfahlen eine zweiminütige Spülung mit Alkohol im Ultraschallbad, gefolgt von einer zehnminütigen Zentrifugation der Probenzähne. In der vorliegenden Studie wurden zusätzlich zu diesen Schritten eine manuelle Spülung im Alkoholbad und eine Spülung mittels Spülkanüle durchgeführt. Insgesamt betrug die Kontaktzeit der Kunststoffwurzeln zu dem Alkohol gemäß der Herstellerangaben nur zehn Minuten, um die Endhärte nicht zu vermindern (Formlabs 2023). Somit wiesen die hergestellten Prüfkörper eine größtmögliche Detailtreue und nahezu vollständige Gleichheit auf.

Ein wesentlicher Nachteil der 3D gedruckten Wurzeln sind ihre unterlegenen biomechanischen Materialeigenschaften im Vergleich zum menschlichen Schmelz und Dentin. Die Endhärte des Kunststoffes liegt mit 20-22 kg/mm² deutlich unter der des Dentins (35-40 kg/mm²) (Hülsmann et al. 2005). Auch die Steifheit und Zugfestigkeit der Kunststoffzähne ist im Vergleich mit dem Dentin humaner Zähne deutlich geringer (Steifheit 2,8 GPa vs. 20-25 GPa, Zugfestigkeit 65 MPa vs. 104 MPa) (Reymus et al. 2019). Aufgrund der geringeren Härte des Kunststoffes empfiehlt es sich, die Aufbereitung der Wurzelkanäle bereits an den humanen Zahnwurzeln vor dem Erstellen der 3D-Kopien durchzuführen (De-Deus et al. 2022; Gok et al. 2017; Peters et al. 2021), was in der vorliegenden Studie so gehandhabt wurde. Dadurch soll ein mögliches Begradigen der Kanäle oder ein Verändern der Kanalgeometrie verhindert und die Herstellung der Kunststoffzähne mit identischem Durchmesser, Querschnitt und Konizität gewährleistet werden. Abgesehen von den geringeren biomechanischen Eigenschaften weisen die Wurzelkanäle der gedruckten Replikat keine Dentintubuli auf, von denen beim Echtzahn (intraoral) eine geringe Restfeuchtigkeit ausgeht. Dies ist ein wichtiger Faktor, der die Interaktion eines Wurzelkanalsealers mit der Kanalwand und gleichzeitig das Auftreten von Hohlräumen an dieser Grenzfläche beeinflusst

(Kooanantkul et al. 2023; Reymus et al. 2020). Zudem kann es vorkommen, dass manche Füllmaterialien bei Kontakt zum Kunststoff nicht vollständig aushärten oder diesen sogar erweichen. Besonders bei hitzebasierten Fülltechniken sollte der Einsatz von gedruckten Kunststoffzähnen kritisch betrachtet werden (De-Deus et al. 2022).

4.1.2 Wurzelkanalfüllung

Aufgrund der vielen Eigenschaften, die ein Wurzelkanalsealer aufweisen sollte, widmet sich die Zahnmedizin fortlaufend der Forschung und Weiterentwicklung der vorhandenen Materialien. Der gegenwärtige Goldstandard und die am häufigsten untersuchten Sealer basieren auf Epoxidharz. In den vergangenen Jahren haben jedoch Sealer auf Kalziumsilikat-Basis in der Endodontologie vermehrt Anwendung gefunden. Durch ihre hervorragende Biokompatibilität und -aktivität, ihre hohe Fließfähigkeit sowie ihre vielversprechende antimikrobielle Wirksamkeit erzielt der Einsatz von biokeramischen Sealern bei der Wurzelkanalfüllung gute klinische Ergebnisse (Candeiro et al. 2019; Chybowski et al. 2018; López-García et al. 2020). Da bereits eine 1 %-ige Schrumpfung des Sealers die Entstehung von Hohlräumen innerhalb der Füllung begünstigen kann (Ørstavik et al. 2001), ist die Dimensionsstabilität der Füllpasten von hoher Bedeutung. Diese positive Eigenschaft wird den biokeramischen Sealern zugeschrieben (Raghavendra et al. 2017), weshalb in der vorliegenden Studie ein Sealer auf Kalziumsilikat-Basis eingesetzt wurde.

Eine ebenfalls neue Methode der Wurzelkanalobturation stellt die Einstiftfülltechnik dar, bei der Wurzelkanäle lediglich mit einem Guttaperchastift abgefüllt werden. Für eine optimale Passung im Wurzelkanal sind diese Guttaperchastifte auf die zuvor verwendeten Aufbereitungsfeilen abgestimmt und haben die gleiche Konizität, den gleichen Durchmesser und die gleiche Länge. Da bei dieser Vorgehensweise auf die Kompaktion mittels zusätzlicher Guttaperchastifte verzichtet wird, sollte die Formstabilität der Füllung durch den Einsatz geeigneter Sealer sichergestellt werden.

In vielen Studien wird daher die Einstiftmethode in Kombination mit einem biokeramischen Sealer empfohlen, um klinisch akzeptable Ergebnisse zu erzielen (Dong und Xu 2023; Huang et al. 2017; Kim et al. 2022). Im Vordergrund stehen bei dieser Art der Wurzelkanalobturation die simple Durchführung und der geringe Zeitaufwand im Vergleich zu anderen gängigen Füllmethoden (Yang et al. 2022). Ein Ziel bei der Wurzelkanalfüllung ist eine möglichst vollständige Benetzung der Kanalwand mit dem Sealer, um das Wurzelkanalsystem

ausreichend und bakteriendicht zu versiegeln. Wünschenswert ist zudem eine tiefe Penetration des Sealers in die Dentintubuli und laterale Kanäle, die von der Fließfähigkeit und der Korngröße des Sealers abhängig ist. In mehreren Studien wurde gezeigt, dass biokeramische Sealer, unter anderem bei Anwendung der Einstiftfüllmethode, ein ausgezeichnetes Penetrationsverhalten in vorhandene Dentintubuli aufweisen (El Hachem et al. 2019; McMichael et al. 2016; Wang et al. 2018). Die Autoren schlussfolgerten daraus, dass Sealer aus Trikalziumsilikat-Verbindungen geeignet sind, akzessorische Kanäle, Unebenheiten und Dentintubuli suffizient zu füllen. Darüber hinaus kann durch den Einsatz der Einstifttechnik im Vergleich zu der lateralen und vertikalen Kondensation eine bessere Verteilung des Sealers im Kanal erreicht werden (Setya et al. 2014). Allerdings sollte der Einsatz der Einstifttechnik bei stärker gekrümmten Zahnwurzeln sowie Kanälen mit größerem Durchmesser kritisch betrachtet werden, da vor allem koronal eine blasenfreie Abdichtung durch den dort erhöhten Sealeranteil erschwert sein könnte (Heran et al. 2019; Kalantar Motamedi et al. 2024).

In der vorliegenden Studie wurden drei verschiedene Techniken bzw. Instrumente für die Applikation des Sealers zum Vergleich des Auftretens von Hohlräumen in der Füllung herangezogen. Zwei dieser Instrumente waren eine schallaktivierbare Polyamidspitze und eine rotierende Lentulo-Spirale, die bereits in vielen Untersuchungen positive Ergebnisse hinsichtlich einer ausreichenden und möglichst blasenfreien Sealerverteilung lieferten und teilweise als Standardmethoden betrachtet werden (Dash et al. 2017; Hoen et al. 1988). Es wurde wiederholt gezeigt, dass maschinelle Instrumente zur Sealerapplikation den Handinstrumenten wie Papierspitzen, Handfeilen oder einzelnen Guttaperchastiften überlegen sind (Bhor et al. 2023; Kahn et al. 1997; Stamos et al. 1995). Daher wurden derartige Einbringmethoden in dieser Untersuchung nicht mit einbezogen. Die dritte eingesetzte Methode war eine Applikationsspritze, die vom Hersteller des biokeramischen Sealers bereitgestellt wird. Diese soll ein vereinfachtes, blasenfreies Einbringen der Füllpaste gewährleisten. Spritzenaufsätze als Instrument der Sealerapplikation wurden bislang nur in wenigen Studien untersucht (Kahn et al. 1997; Nagaveni et al. 2017) und häufig lediglich mit der Lentulo-Spirale verglichen (Guelmann et al. 2004; Nezam et al. 2021; Singh et al. 2017). Daher wurde ihre Eignung zum Einbringen des Sealers in dieser Studie mit den anderen beiden Techniken verglichen.

Die genaue Menge des verwendeten Sealers zu standardisieren, gestaltete sich als schwierig, da diese schwer abzumessen ist und die Literatur kaum exakte Angaben zum verwendeten Gewicht der Füllpaste bietet. Für eine bestmögliche Standardisierung dieser Menge wurde ein kunststoffbeschichtetes Papier zu Hilfe genommen, auf dem die Lentulo-Spirale und die schallaktivierbare Spitze gleichermaßen über ihre markierte Länge mit Sealer benetzt wurden.

Ähnlich wie bei Kahn et al. (1997) wurde die gleichmäßige Beschichtung visuell kontrolliert und beide Instrumente anschließend einen Millimeter kürzer als die Aufbereitungslänge in die Wurzelkanäle eingebracht (Kahn et al. 1997).

Auch die Zeitangaben über den Einsatz der maschinell betriebenen Applikationsinstrumente variieren in der Literatur stark und liegen zwischen 5 und 30 Sekunden. In der durchgeführten Studie wurden die metallische Förderspirale und die schallaktivierbare Spitze, angelehnt an zwei frühere Studien, jeweils fünf Mal für fünf Sekunden eingebracht und aktiviert (Hall et al. 1996; Wiemann und Wilcox 1991), wodurch die effektive Arbeitszeit der Instrumente bei 25 Sekunden lag. Dabei wurde die Lentulo-Spirale rotierend in einer gleichmäßigen Bewegung bis auf die markierte Einbringlänge eingeführt und innerhalb der fünf Sekunden rotierend wieder aus dem Prüfkörper entfernt. Diese Vorgehensweise wurde mehrfach in der Literatur beschrieben (Guinesi et al. 2014; Kahn et al. 1997; Nezam et al. 2021). Analog zu bisherigen Untersuchungen wurde die schallaktivierbare Spitze mit dem Sealer in den Kanal eingeführt, erst auf der entsprechenden Länge aktiviert und nach Ablauf der Zeit aus dem Kanal herausgezogen (Hoen et al. 1988; Kahn et al. 1997; Stamos et al. 1995). Für eine vollständige Benetzung der Kanalwände mit Sealer genügte bei der Applikationsspritze ein einmaliges Einbringen in den Prüfkörper bis zu der markierten Länge. In Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen wurde der Sealer mit einem konstanten, sanften Druck abgegeben, während die Spritze langsam wieder aus dem Kanal gezogen wurde (Guelmann et al. 2004; Nezam et al. 2021; Singh et al. 2017). Zur Vermeidung eines Übungseffektes bei dem Einsatz der untersuchten Applikationstechniken, der die Ergebnisse bestimmter Gruppen verfälschen könnte, wurde jede Methode nur dreimal hintereinander an den verschiedenen Zahntypen eingesetzt. Ein solcher Methodenwechsel erwies sich bereits in einer früheren Studie als sinnvoll (Aguirre et al. 1997).

Um das Risiko einer apikalen Sealerextrusion so gering wie möglich zu halten, wurden gemäß der vorhandenen Literatur alle drei Applikationsinstrumente um einen Millimeter kürzer als die Aufbereitungslänge in die Prüfkörper eingeführt (Arslan et al. 2016; Guelmann et al. 2004;

Singh et al. 2017). Dennoch war bei allen Prüfkörpern nach Einbringen des Guttaperchastiftes eine leichtes Überpressen des Sealers über den Apex hinaus erkennbar. Diese Extrusion wird durch die künstliche Erweiterung der Apices mit Hilfe der Handfeile bedingt sein, die jedoch notwendig war, um die Durchführbarkeit des 3D-Drucks der Zahnwurzeln gewährleisten zu können. Klinisch ist bei Echtzähnen das physiologische Foramen zu finden, welches den Wurzelkanal kurz vor seiner Wurzelspitze als apikale Konstriktion verengt und während der Wurzelkanalaufbereitung nicht künstlich erweitert werden sollte. Dadurch würde bei dem Einbringen des Guttaperchastiftes in den Kanal der überschüssige Sealer vermutlich eher nach koronal als nach apikal abfließen. Starke Sealerextrusionen über den Apex hinaus beeinträchtigen die Langzeitprognose einer Wurzelkanalbehandlung und sind deshalb zu vermeiden (Gulabivala und Ng 2023). Eine leichtes Überpressen des Sealers kann jedoch bei der Verwendung von biokeramischen Füllpasten aufgrund ihrer hohen Biokompatibilität akzeptabel sein und wird sich nicht signifikant auf die Erfolgsrate der Wurzelkanalfüllung auswirken (Chybowski et al. 2018; Subbiya et al. 2022).

Die Simulation der intraoralen Bedingungen während der Aushärtephase des Sealers nach der Wurzelkanalobturation wurde durch eine Lagerung der Prüfkörper in einem Inkubator gewährleistet. Dieser Prozess wird mittlerweile standardmäßig in Studien mit ähnlichem Versuchsaufbau durchgeführt. Dabei sind die Proben meist einer 100 %-igen Humidität sowie einer Temperatur von 36-37 °C ausgesetzt (Celikten et al. 2016; Hoen et al. 1988; Huang et al. 2017; Wiemann und Wilcox 1991). Lediglich die Inkubationszeit der Proben variiert stark und liegt in den aufgeführten Studien zwischen 5 und 10 Tagen. In einer weiteren Studie, in der verschiedene Sealer mit der Einstiftfülltechnik an Kunststoffblöcken untersucht wurden, zeigte sich, dass eine Inkubation der Proben für 24 Stunden ausreichte, um die vollständige Aushärtung der Sealer zu gewährleisten (Heran et al. 2019). Laut Hersteller des in dieser Untersuchung verwendeten Sealers ist eine definitive Aushärtung der biokeramischen Paste innerhalb von 5,5 Stunden zu erwarten. Da es aber bereits Studien gibt, die eine finale Aushärtung von Füllpasten auf Kalziumsilikat-Basis erst nach 20-24 Stunden belegen (Donnermeyer et al. 2022; Souza et al. 2023) und die Abbindezeit durch die fehlenden Dentintubuli der gedruckten Prüfkörper und deren Restfeuchtigkeit verlangsamt wird, wurden die Prüfkörper in dieser Studie für insgesamt 48 Stunden inkubiert.

4.1.3 Auswertung

In der zahnmedizinischen Forschung ist der Einsatz von dreidimensionalen bildgebenden Verfahren für die Untersuchung von Füllungsmaterialien unverzichtbar geworden und hat frühere invasive Analysemethoden und zweidimensionale Bildgebungen wie das Röntgen ersetzt. Die zuvor häufig verwendete digitale beziehungsweise dentale Volumentomographie wurde von dem Mikro-CT abgelöst, das mittlerweile als Goldstandard anzusehen ist (Kulczyk et al. 2019; Torres et al. 2020). Das Mikro-CT ist als hochpräzise und nicht-destruktive 3D-Bildgebung für die Untersuchung von Wurzelkanalfüllungen und -materialien hervorragend geeignet (Gandolfi et al. 2013; Kalantar Motamedi et al. 2021; Kooanantkul et al. 2023; Santos-Junior et al. 2021). Aufgrund seiner höheren Auflösung weist das Mikro-CT im Vergleich zur digitalen Volumentomographie weniger Artefakte auf, die dazu neigen, kleine Strukturen radiologisch größer erscheinen zu lassen. Diese sogenannten "Blooming-Artefakte" werden zusätzlich von den Sealmaterialien beeinflusst, wobei biokeramische Sealer im Vergleich zu Epoxidharz-basierten Sealern weniger Artefakte verursachen (Celikten et al. 2019). Durch die hohe Auflösung der Mikro-CT-Scans, die in den meisten Untersuchungen zwischen 9-19 μm liegt, in dieser Studie bei 13,38 μm , können hochpräzise Dateien der Prüfkörper generiert und eine Analyse der Hohlräume mit größtmöglichem Standard gewährleistet werden (Heran et al. 2019; Kalantar Motamedi et al. 2021; Kim et al. 2021; Torres et al. 2020).

Als dreidimensionale Analyse-Software wurde das Programm Amira verwendet, das bereits häufiger in der Endodontologie eingesetzt wird (Eskandar et al. 2023; Metska et al. 2013). Durch die automatische Segmentierung unterschiedlich dichter Materialien sowie die manuelle Nachjustierung können alle Volumina von Daten aus 3D-Scans mittels Amira präzise berechnet werden (Hsu et al. 2021). Bis dato existiert jedoch noch kein Protokoll über den genauen Ablauf, die angewandten Parameter und die Prozessierungs-Algorithmen. Da sich neben der Segmentierungsprozesse auch die Voxelgröße und Radioopazität der gescannten Materialien auf die Berechnung der Volumina und Hohlräume auswirken können, wäre eine Standardisierung der Bildbearbeitungsprozesse mit der Software Amira sinnvoll (Torres et al. 2020).

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Bei allen Prüfkörpern dieser Studie wurde die Anzahl vorhandener Hohlräume, das Volumen der Hohlräume, das Volumen der Wurzelfüllung sowie die Anzahl an randständigen

Hohlräumen erfasst. Darüber hinaus wurde das Volumenverhältnis der Hohlräume zur Wurzelkanalfüllung und das Verhältnis der Anzahl randständiger Hohlräume an der Gesamtanzahl der Hohlräume gebildet.

Da Hohlräume in der Wurzelkanalfüllung bestmöglich vermieden werden sollten, wären als Ergebnis Prüfkörper mit einer möglichst geringen Anzahl und einem möglichst geringen Volumen an Blasen innerhalb der Wurzelkanalfüllung wünschenswert. Eine vollständig homogene Wurzelkanalfüllung ohne jegliche Blasen ist nur sehr schwer zu erreichen (Guimarães et al. 2014; Lopes et al. 2019; Mutal und Gani 2005; Nezam et al. 2021). Dies zeigte sich auch in der vorliegenden Untersuchung, da keine Wurzelkanalfüllung der 108 untersuchten Prüfkörper vollständig frei von Hohlräumen war. In vergleichbaren Studien fanden sich ebenfalls in allen Proben Hohlräume innerhalb des Sealers (Mutal und Gani 2005; Nezam et al. 2021; Singh et al. 2017), welche auf die physikalischen Eigenschaften der Sealer, das Anmischen der Pasten sowie ihr Einbringen in die Wurzelkanäle zurückzuführen waren. Bei fließfähigen Sealern entstehen im Vergleich zu viskösen Füllpasten weniger Hohlräume (Mutal und Gani 2005). Füllpasten auf Trikalziumsilikat-Basis wird eine ähnlich gute (Zamparini et al. 2022) und teilweise überlegene Fließfähigkeit im Vergleich zu Sealern auf Epoxidharz-Basis, die gegenwärtig als Goldstandard gelten, zugeschrieben (Kooanantkul et al. 2023). In der Regel können Wurzelkanalsealer zum Selbermischen, meist bestehend aus zwei Komponenten, oder als vorgemischte Paste erworben werden. Verglichen mit vorgemischten Präparaten verursacht das manuelle Anmischen der Füllpasten nachweislich mehr Blasen im Sealer (Kooanantkul et al. 2023; Mutal und Gani 2005; Uyanik et al. 2010). Somit kann die Verwendung eines vorgemischten Sealers auf Kalziumsilikat-Basis, wie in dieser Studie, bereits das Risiko von Hohlräumen innerhalb der Füllung im Vergleich zu anderen Füllpasten minimieren.

4.2.1 Ergebnisse in Bezug zur Applikationsmethode

Hinsichtlich der Anzahl der Hohlräume in der Wurzelfüllung zeigten sich zwischen den drei Applikationsmethoden des Sealers keine signifikanten Unterschiede ($p>0,05$). Bei der Applikationsspritze waren allerdings im Schnitt etwas weniger Hohlräume (5,47), verglichen mit der Lentulo-Spirale (6,58) und der schallaktivierten Spitze (6,78), vorhanden. In Übereinstimmung mit der Anzahl der Hohlräume zeigte sich hinsichtlich ihres Volumens ein ähnliches Ergebnis. Im Mittel erzeugte die manuell in den Prüfkörper eingebrachte Spritze das

kleinste Hohlraumvolumen ($0,007 \text{ mm}^3$), während die schallaktivierte Spitze das größte Hohlraumvolumen ($0,022 \text{ mm}^3$) erzeugte; der Unterschied ist allerdings nicht statistisch signifikant ($p > 0,068$). Das durchschnittliche Volumen der Hohlräume, die von der Lentulo-Spirale erzeugt wurden, lag mit $0,012 \text{ mm}^3$ dazwischen. In der Literatur ist kein eindeutiger Konsens zu finden, welche der drei untersuchten Applikationsmethoden für ein blasenfreies Einbringen der Füllpaste in den Wurzelkanal am geeignetsten ist. In einigen Studien erzielte die Spritze, ähnlich zu den Ergebnissen dieser Untersuchung, weniger und kleinere Hohlräume als die Lentulo-Spirale oder die schallaktivierbare Spitze (Heran et al. 2019; Nezam et al. 2021; Singh et al. 2017). Die Applikation des Sealers mittels der Spritze unterscheidet sich von den anderen beiden Instrumenten dadurch, dass sie nur einmalig in den Wurzelkanal eingebracht und bei kontinuierlicher Abgabe der Füllpaste aus dem Kanal gezogen wird. Dabei ermöglicht die Spritzenöffnung die Abgabe einer größeren Menge an Sealer auf einmal. Im Gegensatz dazu erfordert die ausreichende Verteilung der Füllpaste mit Hilfe der Lentulo-Spirale und der schallaktivierten Polyamidspitze ein mehrmaliges zirkuläres Benetzen beider Instrumente mit Sealer und ein wiederholtes Einführen in den Kanal sowie Aktivierung der Instrumente. Dieser Prozess wurde in der vorliegenden Studie jeweils fünf Mal pro Prüfkörper bei beiden Methoden wiederholt. Das wiederholte Einführen und Herausziehen der Förderspirale und der schallaktivierbaren Spitze aus dem Kanal kann die Entstehung von Hohlräumen im Sealer begünstigen (Nezam et al. 2021).

Betrachtet man das Volumenverhältnis der Hohlräume zur Wurzelkanalfüllung, so zeigten sich zwischen keiner der Applikationsmethoden statistisch signifikante Unterschiede ($p > 0,05$). Jedoch fand sich auch hier der größte erkennbare Unterschied ($p > 0,12$) zwischen der Applikationsspritze ($0,12 \%$) und der schallaktivierten Spitze ($0,47 \%$). Die Lentulo-Spirale ($0,20 \%$) erzielte ein ähnlich gutes Volumenverhältnis der Hohlräume zur Wurzelfüllung wie die Spritze. Insgesamt erzeugten alle drei untersuchten Instrumente im Durchschnitt ein Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen der Füllung von weniger als $0,5 \%$. Es existieren in der Literatur bis dato keine definierten Werte, ab welchem Blasenanteil an der Wurzelkanalfüllung die Langzeitprognose der endodontischen Behandlung negativ beeinträchtigt wird. Möglicherweise kann eine Wurzelkanalfüllung mit einem Verhältnis von Hohlraum- zu Füllungsvolumen von unter $0,5 \%$ bereits als überwiegend blasenfrei angesehen werden.

Erwähnenswert ist, dass das größte Volumenverhältnis von Hohlräumen zur Füllung, das durch die manuell in den Kanal eingeführte Applikationsspritze erzeugt wurde, als einzige der drei Techniken unter 1 % lag (Maximalwert 0,97 %), während es bei den anderen beiden Methoden höher war. Der mit Abstand größte Volumenanteil von Hohlräumen an der Wurzelkanalfüllung entstand durch den Einsatz der schallaktivierten Spitze (Maximalwert 7,42 %).

Durch die Schallaktivierung des Sealers kommt es zu einer Übertragung der Energie in den Wurzelkanal sowie zu einer Temperaturerhöhung, was die physikochemischen Eigenschaften der Füllpaste verändern kann (Heran et al. 2019; Hoen et al. 1988). In der Theorie soll die erzeugte Wärme die Viskosität des Sealers herabsetzen, wodurch dieser besser entlang der schallaktivierten Feile sowie in laterale Kanäle fließen soll. Das dadurch ebenfalls verstärkte Eindringen in die Dentintubuli sorgt nachweislich für einen verbesserten Verbund von Füllmaterial zur Wurzelkanalwand (Guimarães et al. 2014; Lopes et al. 2019). Ähnlich zu den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung entstanden bei einer anderen Studie durch die erzeugte Wärme beim Einsatz der schallaktivierbaren Spitze mehr und größere Hohlräume in der Wurzelkanalfüllung (Heran et al. 2019). Der dabei verwendete Sealer basierte allerdings auf einer Epoxidharz-Basis. In einer weiteren Untersuchung zeigte die Schallaktivierung des Sealers ebenfalls keine Vorteile, erwies sich jedoch auch nicht als nachteilhaft, um das Auftreten von Blasen in der Wurzelkanalfüllung zu minimieren (Pérez-Alfayate et al. 2021).

Im Gegensatz dazu stellten Sfeir et al. (2023) bei der Applikation eines Kalziumsilikat-basierten Sealers fest, dass die schallaktivierbare Spitze im Vergleich zu einem Guttaperchastift, der in dieser Studie zum Einbringen des Sealers verwendet wurde, weniger Hohlräume erzeugte (Sfeir et al. 2023). Auch Kahn et al. (1997) bemerkten bei dem Einsatz einer schallaktivierbaren Spitze ein geringeres Hohlraumvolumen in der Füllung im Vergleich zu einer Handfeile und Papierspitze. Allerdings wurden, verglichen mit der Lentulo-Spirale, mehr beziehungsweise größere Hohlräume beobachtet (Kahn et al. 1997).

Die Lentulo-Spirale wird bereits seit einigen Jahrzehnten in der Endodontologie zur Applikation des Sealers in den Wurzelkanal genutzt und hat sich bisher gut bewährt. Durch ihre Windungen und die Flexibilität soll die metallische Förderspirale den Sealer entlang der Kanalwand und im Kanallumen suffizient und blasenfrei verteilen. Einige Studien belegen die Überlegenheit der Förderspirale bei der Sealerapplikation gegenüber Handfeilen und

Papierspitzen (Dash et al. 2017; Kahn et al. 1997), schallaktivierbaren Spitzen (Dash et al. 2017; Galvão et al. 2017; Kahn et al. 1997) sowie gegenüber Guttaperchastiften (Guinesi et al. 2014).

Des Öfteren wurde die Lentulo-Spirale mit einer Applikationsspritze beim Einbringen des Sealers in den Wurzelkanal verglichen. Lediglich in einer einzigen Studie erzielten beide Instrumente ähnlich viele und große Blasen in der Füllung (Kahn et al. 1997). Die Mehrheit der Studien ergab, dass ein geeigneter Spritzenaufsatz bei der Applikation des Sealers in den Kanal weniger und kleinere Hohlräume innerhalb der Füllung und an der Grenzfläche zur Kanalwand produziert als die rotierende Lentulo-Spirale (Guelmann et al. 2004; Nezam et al. 2021; Singh et al. 2017). Dabei ist zu beachten, dass nur die endodontischen Spritzenaufsätze, welche einen größeren und konischen Durchmesser sowie eine höhere Flexibilität aufweisen als beispielsweise Anästhesiekanülen oder Insulinspritzen, die positiven Ergebnisse erzielten (Singh et al. 2017). In Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen erzeugte die Applikationsspritze in der vorliegenden Studie etwas weniger und kleinere Hohlräume, verglichen mit der Lentulo-Spirale und der schallaktivierbaren Spitze. Allerdings waren die Unterschiede zwischen den drei Methoden hinsichtlich der Anzahl und des Volumens der Hohlräume sowie des Volumenverhältnisses der Hohlräume zur Wurzelkanalfüllung statistisch nicht signifikant.

Hohlräume in der Wurzelkanalfüllung lassen sich hinsichtlich ihrer Lokalisation zur Kanalwand in zwei Kategorien einteilen: zum einen in solche, die sich vollständig innerhalb des Sealers befinden, zum anderen in solche, die sich zwischen Sealer und Wurzelkanalwand bilden. Insbesondere die Blasen an dieser Grenzfläche stellen ein Risiko für eine Reinfektion des endodontisch behandelten Zahnes dar, da sie Flüssigkeiten und Bakterien den Zutritt zum Wurzelkanalsystem ermöglichen (Komabayashi et al. 2020). Daher wurde in der vorliegenden Studie für jeden Prüfkörper die Anzahl randständiger Hohlräume erhoben und mit der Gesamtanzahl der vorhandenen Hohlräume pro Prüfkörper ins Verhältnis gesetzt.

Hinsichtlich der Anzahl der randständigen Hohlräume fanden sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den drei Applikationsmethoden ($p > 0,05$). Die Applikationsspritze erzeugte im Durchschnitt ähnlich viele randständige Hohlräume (0,39) wie die schallaktivierbare Spitze (0,61) und die Lentulo-Spirale (0,50). Zudem waren bei jeder Methode höchstens zwei randständige Blasen pro Wurzelkanalfüllung vorhanden. Betrachtet man das Verhältnis der randständigen Hohlräume, so ergaben sich zwischen der Spritze (MW

= 11,72 %), der schallaktivierten Spitze (MW = 14,00 %) sowie der Lentulo-Spirale (MW = 11,61 %) ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$). Insgesamt entstanden bei den Prüfkörpern prozentual mehr Hohlräume innerhalb der Wurzelkanalfüllung als zwischen Sealer und Kanalwand, welche für die Erfolgsprognose der endodontischen Behandlung von größerer Relevanz sind.

Die Interaktion zwischen Sealer und Kanalwand wurde in dieser Studie möglicherweise durch die verwendeten dreidimensional gedruckten Prüfkörper und deren veränderte Materialeigenschaften im Vergleich zum Dentin der Echtzähne beeinträchtigt. Zum einen ist die Oberflächenhärte des Kunstharzes vermindert, zum anderen enthält die Kanalwand der Kunststoffzahnwurzeln keine Dentintubuli. Bei humanen Zähnen kann durch diese Tubuli Restfeuchtigkeit in den Wurzelkanalsealer gelangen. Zudem können Sealerpartikel in die Dentintubuli penetrieren, was die Adhäsion des Sealers an der Wurzelkanalwand verbessert. Diese in vitro fehlenden Faktoren könnten die Entstehung randständiger Hohlräume in den Wurzelkanalfüllungen der Prüfkörper beeinflussen (Kim et al. 2017; Kooanantkul et al. 2023; Lin et al. 2023; Zhang et al. 2021).

Verglichen mit Sealern auf Epoxidharz-Basis oder anderen gängigen Materialien sind randständige Blasen bei Sealern auf Kalziumsilikat-Basis unter Umständen weniger kritisch für eine potenzielle Reinfektion des endodontisch behandelten Zahnes (Zamparini et al. 2022). Ursächlich für diese Annahme ist die Tatsache, dass die randständigen Hohlräume für eine erhöhte Löslichkeit und damit verbundene höhere Ionenfreisetzung sorgen. Bei einer in-vitro Untersuchung fanden sich bei einem biokeramischen Sealer zwar mehr randständige Blasen im Vergleich zu einem Sealer auf Epoxidharz-Basis (Zamparini et al. 2022), allerdings war die erhöhte Löslichkeit des biokeramischen Versiegeler nur in einem wässrigen Medium feststellbar. In vivo wird die Löslichkeit des Sealers von der Bioaktivität der Füllpaste kompensiert und reduziert. Darüber hinaus ist die Löslichkeit von Füllpasten auf Kalziumsilikat-Basis in einem Medium mit Serumproteinen, das den intraoralen Bedingungen ähnelt, ohnehin schon geringer als in Wasser (Gandolfi et al. 2009).

4.2.2 Ergebnisse in Bezug zur Zahnart

Bei dem Vergleich der Frontzahnwurzel, der Prämolarenwurzel und der palatinalen Molarenwurzel fanden sich weder bei der Anzahl oder dem Volumen der Hohlräume noch bei dem Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen der Wurzelkanalfüllung

statistisch signifikante Unterschiede ($p > 0,05$). Auch die Anzahl randständiger Hohlräume sowie deren Verhältnis an der Gesamtanzahl der Hohlräume pro Wurzelfüllung ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den drei Zahnarten ($p > 0,05$). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass keine der drei gewählten Zahnanatomien in der vorliegenden Studie einen Einfluss auf das Auftreten von Hohlräumen in der Wurzelkanalfüllung hatte.

Dabei sollten allerdings die Auswahlkriterien der drei verwendeten Zahntypen im Auge behalten werden. Als Prüfkörper wurden lediglich Zahnwurzeln mit einer Wurzelkrümmung unter 20° , einer möglichst anatoförmigen Präparation des Kanals sowie einer vereinfachten Anatomie eingesetzt, damit eine identische Herstellung der Proben mittels 3D-Druck möglich war. Darüber hinaus wiesen alle Wurzelkanäle der Prüfkörper nach der Präparation einen Durchmesser der ISO-Größen 035 und 045 auf. Der 3D-Druck im SLA-Verfahren ermöglichte mit einer Schichtstärke von $50\text{ }\mu\text{m}$ eine detailgetreue Herstellung dieser Zahnwurzeln. Bei bleibenden Zähnen beträgt der Durchmesser der Dentintubuli nahe der Pulpakammer im Durchschnitt jedoch nur $4,3\text{ }\mu\text{m}$ und nahe des Zahnschmelzes sogar nur $2,4\text{ }\mu\text{m}$ (Lenzi et al. 2013). Diese und ähnlich kleine Unebenheiten oder laterale Kanäle ließen sich dementsprechend nicht mittels dreidimensionalen Druckes reproduzieren.

Bei einer vergleichbaren Studie wurden biokeramische Wurzelkanalsealer unter Anwendung verschiedener Fülltechniken an dreidimensional gedruckten Zahnwurzeln miteinander verglichen (Kooanantkul et al. 2023). Es wurden Prüfkörper mit einfacher und komplexer Kanal Anatomie eingesetzt. Analog zu den Ergebnissen dieser Studie ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Auftretens von Hohlräumen zwischen den beiden Kanal anatomien. Jedoch wiesen auch hier die Prüfkörper eine Wurzelkrümmung unter 30° auf. Zahnwurzeln mit einem Krümmungswinkel über $20\text{--}30^\circ$, größeren Kanaldurchmessern als der ISO-Größe 045 oder noch komplexeren Anatomien wie beispielsweise Wurzelkanäle mit mehreren lateralen Kanälen können möglicherweise einen größeren Einfluss auf das Vorhandensein von Hohlräumen in der Füllung ausüben.

4.3 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit Hilfe des 3D-Druckverfahrens kann eine gute Vergleichbarkeit in Studien durch die Standardisierung aller Prüfkörper geschaffen werden. Der dreidimensionale Druck im SLA-Verfahren eignet sich zur detailgetreuen Herstellung von aufbereiteten, digitalisierten

Zahnwurzeln in unbegrenzter Anzahl. Dies ermöglicht Studien über Wurzelfüllungsmaterialien und -techniken mit einer sehr hohen Fallzahl und identischen Ausgangssituationen und umgeht das Problem der limitierten Verfügbarkeit, das bei extrahierten humanen Zähnen besteht. Für die Herstellung der dreidimensionalen Modelle können mittels Mikro-CT mit einer Auflösung von 9-19 μm realitätsnahe Aufnahmen extrahierter Zähne generiert werden. Darüber hinaus findet das Mikro-CT als nicht-destruktive Auswertungsmethode in der endodontischen Forschung Anwendung und kann in Kombination mit Programmen wie z. B. Amira die Volumina von Wurzelkanalfüllungen und Hohlräumen präzise erfassen.

Sowohl die schallaktivierbare Polyamidspitze als auch die Applikationsspritze und die Lentulo-Spirale eigneten sich in der durchgeführten Studie zum Einbringen des Wurzelkanalsealers in die Kanäle der Prüfkörper. Alle drei Instrumente erzielten im Schnitt einen Blasenanteil an der Wurzelkanalfüllung von unter 0,5 %, allerdings war keine Füllung der Prüfkörper vollständig frei von Hohlräumen. Insgesamt fanden sich weder hinsichtlich der Anzahl oder des Volumens vorhandener Hohlräume noch hinsichtlich des Volumenverhältnisses von den Hohlräumen zur Füllung statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Methoden. Auch die Zahl der randständigen Hohlräume und deren Anteil an der Gesamtanzahl der Hohlräume pro Wurzelkanalfüllung ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Applikationstechniken. Trotz fehlender Signifikanz ließ sich eine Tendenz in den Ergebnissen feststellen, da die Applikationsspritze im Mittel sowohl weniger als auch kleinere Hohlräume in der Füllung erzeugte als die schallaktivierte Polyamidspitze oder die Lentulo-Spirale. Die Sealerapplikation mittels der Spritze zeichnet sich durch eine simple Handhabung und einen geringen Arbeitsaufwand aus. Zudem erfordert das Einbringen des Sealers in den Kanal mit Hilfe der Spritze weniger Zeit im Vergleich zu den anderen beiden Instrumenten, die mehrfach mit Sealer beschichtet und in die Kanäle eingeführt werden müssen. Betrachtet man diese Aspekte zusammen mit den Ergebnissen dieser Untersuchung, so kann die Spritze für die Applikation des Sealers als vorteilhafter angesehen werden.

Für die Prüfkörper wurden drei verschiedene Anatomien, darunter eine Frontzahn-, eine Prämolaren- und eine palatinale Molarenwurzel, mit jeweils nur einem Kanalsystem und einer Wurzelkrümmung unter 20° ausgewählt. Die drei unterschiedlichen Zahntypen hatten hinsichtlich der untersuchten Parameter keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.

Die Arbeitshypothese dieser Studie lautete, dass sich keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Auftretens von Hohlräumen innerhalb der Wurzelkanalfüllungen bei der Verwendung der drei Applikationsmethoden des Sealers finden. Als Nebenhypothese wurde angenommen, dass der Einsatz verschiedener Zahnanatomien ebenfalls keine signifikante Auswirkung auf das Vorhandensein von Hohlräumen in der Wurzelkanalfüllung hat. Anhand der vorliegenden Ergebnisse können beide Hypothesen bestätigt werden.

Aufgrund stetig verbesserter Materialeigenschaften haben Sealer-basierte Wurzelkanalfülltechniken wie die Einstiftfüllmethode in der Endodontologie zunehmend Ansehen erlangt. Grundvoraussetzung für eine Wurzelkanalobturation mit einem hohen Sealeranteil ist die ausreichende Dimensionsstabilität der Füllpaste, die einer Schrumpfung des Materials und der damit verbundenen Entstehung von Blasen entgegenwirkt. Die Einstiftfülltechnik, bei der lediglich ein Guttaperchastift zusammen mit Sealer verwendet wird, liefert vor allem in Verbindung mit Sealern auf Kalziumsilikat-Basis positive klinische Ergebnisse (Dong und Xu 2023; Huang et al. 2017; Kalantar Motamedi et al. 2021). Mögliche Einschränkungen der Füllmethode liegen bei starken Wurzelkrümmungen oder besonders weiten Kanallumen (Heran et al. 2019). Um den Ablauf einer Wurzelkanalfüllung zu vereinfachen, liegt ein Ansatz darin, lediglich Sealer für die Füllung zu verwenden und auf feste Kernmaterialien wie Guttapercha zu verzichten. Bioaktive, Glas basierte Sealer lieferten dabei vielversprechende Resultate, eine suffiziente Wurzelfüllung zu ermöglichen (Washio et al. 2019).

Klinische Ergebnisse sowie Langzeitstudien diesbezüglich stehen noch aus, weshalb bei der Wurzelkanalfüllung gemäß aktuellem Stand der Erkenntnisse noch nicht vollständig auf ein (halb-)festes Kernmaterial verzichtet werden sollte.

Für den 3D-Druck von Kopien humaner Zähne gilt aktuell Kunstharz in verschiedenen Farben als das gängigste Material. Dieses ist allerdings den Echtzähnen in seinen biomechanischen Materialeigenschaften unterlegen. Weiterentwicklungen der Druckmaterialien liegen in einer mikroporösen Hydroxylapatitmatrix (Robberecht et al. 2017) und der Verstärkung des Kunstharzes mit Glas-, Hydroxylapatit- und Porzellanpartikeln (Cresswell-Boyes et al. 2022), welche der mineralischen Substanz von Echtzähnen stark ähneln. Durch diese und andere neue Materialien für den 3D-Druck können dreidimensionale Ausdrücke menschlicher Zähne

wegen ihrer unerschöpflichen Verfügbarkeit extrahierte Echtzähne perspektivisch ersetzen und zukünftig als Goldstandard für ex-vivo Studien angesehen werden.

Limitationen dieser Studie sind die unterschiedlichen Materialeigenschaften des Kunstharzes der Prüfkörper, verglichen mit dem Dentin der humanen Zähne, sowie die geringe Wurzelkrümmung und vereinfachte Anatomie der Prüfkörper. Aufgrund dessen sollten weitere Untersuchungen an stärkeren Wurzelkrümmungen, an komplexeren Anatomien und klinisch an Patienten durchgeführt werden, um die vorliegenden Studienergebnisse zu unterstützen.

5 Zusammenfassung

Für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist ein permanenter und bakteriendichter Verschluss des Wurzelkanals maßgeblich. Dafür werden in der Regel (halb-)feste Wurzelkanalfüllstifte zusammen mit einem Wurzelkanalsealer verwendet. Dieser soll alle Mikrounebenheiten, akzessorische Kanäle und Dentintubuli ausfüllen und einen Verbund der Füllstifte zu der Kanalwand herstellen. Das Auftreten von Hohlräumen innerhalb der Wurzelkanalfüllung wirkt sich nachweislich auf die Langzeitprognose der endodontischen Behandlung aus, weshalb dies bestmöglich vermieden werden sollte. Daher ist ein möglichst blasenfreies Einbringen des Sealers in den Wurzelkanal von hoher Relevanz. Ziel dieser Studie war die Untersuchung des Einflusses von drei unterschiedlichen Applikationsmethoden eines biokeramischen Sealers auf das Auftreten von Hohlräumen in der Wurzelkanalfüllung. Als standardisierte Prüfkörper der Studie dienten dreidimensional gedruckte Zahnwurzeln.

Hierfür wurden bei drei humanen, extrahierten Zähnen, darunter ein Frontzahn, ein Prämolare sowie eine palatinale Molarenwurzel mit jeweils nur einem Wurzelkanalsystem, die Zahnkronen auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze abgetrennt. Die Wurzelkanäle wurden maschinell bis zu den ISO-Größen 035 und 045 und einen Taper von 04 aufbereitet. Anschließend wurden die aufbereiteten Zahnwurzeln mittels Mikro-CT eingescannt und mit einem 3D-Drucker vervielfältigt, sodass insgesamt 108 Prüfkörper mit identischem Wurzelkanal vorlagen. Diese wurden in drei Gruppen mit jeweils 36 Prüfkörpern entsprechend der drei Einbringmethoden des Sealers aufgeteilt: eine schallaktivierbare Polyamidspitze, eine Applikationsspritze und eine maschinell rotierende Lentulo-Spirale. Nach der Applikation des biokeramischen Sealers mit der entsprechenden Methode wurden die Wurzelkanäle mit Hilfe eines zum Feilensystem passenden Guttaperchastiftes, im Sinne der Einstiftfülltechnik, obturiert. Für die vollständige Aushärtung des Sealers folgte eine 48-stündige Lagerung in einem Inkubator bei 36 °C und 100 % Humidität. Schließlich wurden die Prüfkörper erneut mittels Mikro-CT eingescannt und digital hinsichtlich des Volumens der Wurzelfüllung, des Volumens und der Anzahl vorhandener Hohlräume sowie deren Lokalisation zur Kanalwand ausgewertet. Zudem wurde das Volumenverhältnis der Hohlräume zur Füllung sowie das Verhältnis von randständigen Hohlräumen an der Gesamtanzahl der Hohlräume gebildet. Als statistische Tests dienten eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) sowie ein multipler Vergleichstest (Tukey-post-hoc Test).

Sowohl die schallaktivierbare Spitze als auch die Spritze und die Lentulo-Spirale eigneten sich für die Applikation des Sealers in den Wurzelkanal. Zwischen den drei Methoden fanden sich hinsichtlich der Anzahl, dem Volumen, dem Volumenanteil der Hohlräume an der Füllung sowie hinsichtlich der Anzahl an randständigen Hohlräumen und deren Anteil an der Gesamtzahl der Hohlräume pro Füllung keine statistisch signifikanten Unterschiede. Insgesamt fanden sich in allen Wurzelkanalfüllungen der 108 untersuchten Prüfkörper Hohlräume. Die Applikationsspritze erzeugte trotz fehlender Signifikanz im Schnitt weniger und kleinere Hohlräume, verglichen mit den anderen beiden Instrumenten. Zudem war die Sealerapplikation mittels der Spritze weniger aufwendig und zeitintensiv, weshalb die Methode als überlegen betrachtet werden könnte. Darüber hinaus hatte die Wahl der Frontzahn-, der Prämolaren- und der palatinalen Molarenwurzel keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten von Hohlräumen in den Wurzelkanalfüllungen.

Die standardisierten, dreidimensional gedruckten Prüfkörper ermöglichten eine ideale Vergleichbarkeit der Methoden. Allerdings sollten die Ergebnisse dieser Studie aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften des Kunstharzes im Vergleich zum Kanalwanddentin von Echtzähnen klinisch bestätigt werden.

- AAE, A.A.o.E.** (2020) Treatment Standards [Internet].
https://www.aae.org/specialty/wp-content/uploads/sites/2/2018/04/TreatmentStandards_Whitepaper.pdf [zitiert am 09. Juni 2023]
- Aguirre, A.M., M.E. el-Deeb, R. Aguirre,** (1997): The effect of ultrasonics on sealer distribution and sealing of root canals. *J Endod.*23 (12), 759-764.
- Akbar, I.,** (2015): Radiographic study of the problems and failures of endodontic treatment. *Int J Health Sci (Qassim).*9 (2), 111-118.
- Al-Jadaa, A., F. Paqué, T. Attin, M. Zehnder,** (2009): Necrotic pulp tissue dissolution by passive ultrasonic irrigation in simulated accessory canals: impact of canal location and angulation. *Int Endod J.*42 (1), 59-65.
- Anbiaee, N., R. Khodabakhsh, A. Bagherpour,** (2019): Relationship between Anatomical Variations of Sinonasal Area and Maxillary Sinus Pneumatization. *Iran J Otorhinolaryngol.*31 (105), 229-234.
- Anderson, J., J. Wealleans, J. Ray,** (2018): Endodontic applications of 3D printing. *Int Endod J.*51 (9), 1005-1018.
- Arslan, H., A. Abbas, E. Karatas,** (2016): Influence of ultrasonic and sonic activation of epoxy-amine resin-based sealer on penetration of sealer into lateral canals. *Clin Oral Investig.*20 (8), 2161-2164.
- Atmeh, A.R., R. Alharbi, I. Aljamaan, A. Alahmari, A.C. Shetty, A. Jamleh, I. Farooq,** (2022): The Effect of Sealer Application Methods on Voids Volume after Aging of Three Calcium Silicate-Based Sealers: A Micro-Computed Tomography Study. *Tomography.*8 (2), 778-788.
- Bhor, S., A.S. Rao, U. Shah, M. Mathur, R. Reda, F. Pagnoni, L. Testarelli, A.M. Luke, A.M. Pawar,** (2023): Comparative Evaluation of the Sealing Ability of a BioCeramic Sealer (iRoot SP) with AH Plus Sealer with Root Canal Dentin Using Three Different Techniques of Sealer Application: A Combined Dye Extraction and Scanning Electron Microscope Study. *Journal of Composites Science.*7 (3), 106.
- Bock, J.,** (1998): Bestimmung des Stichprobenumfangs: Für biologische Experimente und kontrollierte klinische Studien. R. Oldenbourg.
- Boutsioukis, C.M.T. Arias-Moliz,** (2022): Present status and future directions - irrigants and irrigation methods. *Int Endod J.*55 Suppl 3 (Suppl 3), 588-612.
- Candeiro, G.T.M., A.B. Lavor, I.T.F. Lima, B.C. Vasconcelos, N.V. Gomes, E.F. Iglecias, G. Gavini,** (2019): Penetration of bioceramic and epoxy-resin endodontic cements into lateral canals. *Braz Oral Res.*33 e049.

- Celikten, B., R. Jacobs, K. de Faria Vasconcelos, Y. Huang, E. Shaheen, L.F.P. Nicolielo, K. Orhan,** (2019): Comparative evaluation of cone beam CT and micro-CT on blooming artifacts in human teeth filled with bioceramic sealers. *Clin Oral Investig.*23 (8), 3267-3273.
- Celikten, B., C.F. Uzuntas, A.I. Orhan, K. Orhan, P. Tufenkci, S. Kursun, K. Demiralp,** (2016): Evaluation of root canal sealer filling quality using a single-cone technique in oval shaped canals: An In vitro Micro-CT study. *Scanning.*38 (2), 133-140.
- Cheung, G.S.,** (2002): Survival of first-time nonsurgical root canal treatment performed in a dental teaching hospital. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.*93 (5), 596-604.
- Chybowski, E.A., G.N. Glickman, Y. Patel, A. Fleury, E. Solomon, J. He,** (2018): Clinical Outcome of Non-Surgical Root Canal Treatment Using a Single-cone Technique with Endosequence Bioceramic Sealer: A Retrospective Analysis. *J Endod.*44 (6), 941-945.
- Collado-González, M., D. García-Bernal, R.E. Oñate-Sánchez, P.S. Ortolani-Seltenerich, A. Lozano, L. Forner, C. Llana, F.J. Rodríguez-Lozano,** (2017): Biocompatibility of three new calcium silicate-based endodontic sealers on human periodontal ligament stem cells. *Int Endod J.*50 (9), 875-884.
- Cresswell-Boyes, A.J., G.R. Davis, M. Krishnamoorthy, D. Mills, A.H. Barber,** (2022): Composite 3D printing of biomimetic human teeth. *Sci Rep.*12 (1), 7830.
- Crozeta, B.M., F.C. Lopes, R. Menezes Silva, Y.T.C. Silva-Sousa, L.F. Moretti, M.D. Sousa-Neto,** (2021): Retreatability of BC Sealer and AH Plus root canal sealers using new supplementary instrumentation protocol during non-surgical endodontic retreatment. *Clin Oral Investig.*25 (3), 891-899.
- Cui, Z., Z. Wei, M. Du, P. Yan, H. Jiang,** (2018): Shaping ability of protaper next compared with waveone in late-model three-dimensional printed teeth. *BMC Oral Health.*18 (1), 115.
- Dash, A.K., S. Farista, A. Dash, A. Bendre, S. Farista,** (2017): Comparison of Three Different Sealer Placement Techniques: An In vitro Confocal Laser Microscopic Study. *Contemp Clin Dent.*8 (2), 310-314.
- De-Deus, G., E.M. Souza, E. Silva, F.G. Belladonna, M. Simões-Carvalho, D.M. Cavalcante, M.A. Versiani,** (2022): A critical analysis of research methods and experimental models to study root canal fillings. *Int Endod J.*55 Suppl 2 384-445.
- Decurcio, D.A., E. Lim, G.S. Chaves, V. Nagendrababu, C. Estrela, G. Rossi-Fedele,** (2019): Pre-clinical endodontic education outcomes between artificial versus extracted natural teeth: a systematic review. *Int Endod J.*52 (8), 1153-1161.

- Dong, X., X. Xu**, (2023): Bioceramics in Endodontics: Updates and Future Perspectives. *Bioengineering* (Basel).10 (3).
- Donnermeyer, D., P. Schemkämper, S. Bürklein, E. Schäfer**, (2022): Short and Long-Term Solubility, Alkalizing Effect, and Thermal Persistence of Premixed Calcium Silicate-Based Sealers: AH Plus Bioceramic Sealer vs. Total Fill BC Sealer. *Materials* (Basel).15 (20).
- Dummer, P.M., M.H. Alodeh, M.A. al-Omari**, (1991): A method for the construction of simulated root canals in clear resin blocks. *Int Endod J*.24 (2), 63-66.
- El Hachem, R., I. Khalil, G. Le Brun, F. Pellen, B. Le Jeune, M. Daou, N. El Osta, A. Naaman, M. Abboud**, (2019): Dentinal tubule penetration of AH Plus, BC Sealer and a novel tricalcium silicate sealer: a confocal laser scanning microscopy study. *Clin Oral Investig*.23 (4), 1871-1876.
- El-Sherif, S.M., D.I. Sherief, D.A. El-Refai**, (2022): Evaluation of the pH, calcium ion release, and antibacterial effect of a premixed bioceramic endodontic sealer. *Gen Dent*.70 (1), 40-44.
- Eskandar, R.F., M.A. Al-Habib, M.A. Barayan, H.Y. Edrees**, (2023): Outcomes of endodontic microsurgery using different calcium silicate-based retrograde filling materials: a cohort retrospective cone-beam computed tomographic analysis. *BMC Oral Health*.23 (1), 70.
- Europäische Gesellschaft für Endodontologie**, (2004): Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung. *Endodontie*.13 (3), 271-284.
- European Society of Endodontology**, (2006): Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *International Endodontic Journal*.39, 921-930.
- Fauchard, P.**, (1728): *Le chirurgien dentiste*. Vol. 1. Paris: Jean Mariette, aux Colonnes d'Hercules.
- Faul, F., E. Erdfelder, A.G. Lang, A. Buchner**, (2007): G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods*.39 (2), 175-191.
- Formlabs** (2020) Form Cure time and temperature settings [Internet]. Mai 2023. <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Post-Curing/115001414464-Form%20Cure%20Time%20and%20Temperature%20Settings/FormCurePost-CureSettings.pdf> [zitiert am 15. Mai 2023]
- Formlabs** (2023) Form Wash and Form Wash L time settings [Internet]. Mai 2023. <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Washing/115001347744-Form+Wash+Time+Settings/FormWashSettings.pdf> [zitiert am 15. Mai 2023]

- Galvão, T., B. Camargo, L. Armada, F. Alves**, (2017): Efficacy of three methods for inserting calcium hydroxide-based paste in root canals. *J Clin Exp Dent*.9 (6), e762-e766.
- Gandolfi, M.G., F. Iacono, K. Agee, F. Siboni, F. Tay, D.H. Pashley, C. Prati**, (2009): Setting time and expansion in different soaking media of experimental accelerated calcium-silicate cements and ProRoot MTA. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*.108 (6), e39-45.
- Gandolfi, M.G., A.P. Parrilli, M. Fini, C. Prati, P.M. Dummer**, (2013): 3D micro-CT analysis of the interface voids associated with Thermafil root fillings used with AH Plus or a flowable MTA sealer. *Int Endod J*.46 (3), 253-263.
- Gasner, N.S.M. Brizuela**, (2023): Endodontic Materials Used To Fill Root Canals, in StatPearls. StatPearls Publishing Copyright © 2023, StatPearls Publishing LLC.: Treasure Island (FL).
- Geurtsen, W.**, (2001): Biocompatibility of root canal filling materials. *Aust Endod J*.27 (1), 12-21.
- Gok, T., I.D. Capar, I. Akcay, A. Keles**, (2017): Evaluation of Different Techniques for Filling Simulated C-shaped Canals of 3-dimensional Printed Resin Teeth. *J Endod*.43 (9), 1559-1564.
- Guelmann, M., M. McEachern, C. Turner**, (2004): Pulpectomies in primary incisors using three delivery systems: an in vitro study. *J Clin Pediatr Dent*.28 (4), 323-326.
- Guimarães, B.M., P.A. Amoroso-Silva, M.P. Alcalde, M.A. Marciano, F.B. de Andrade, M.A. Duarte**, (2014): Influence of ultrasonic activation of 4 root canal sealers on the filling quality. *J Endod*.40 (7), 964-968.
- Guinesi, A.S., G. Faria, M. Tanomaru-Filho, I. Bonetti-Filho**, (2014): Influence of sealer placement technique on the quality of root canal filling by lateral compaction or single cone. *Braz Dent J*.25 (2), 117-122.
- Gulabivala, K.Y.L. Ng**, (2023): Factors that affect the outcomes of root canal treatment and retreatment-A reframing of the principles. *Int Endod J*.56 Suppl 2 82-115.
- Gulati, N., S. Chandra, P.K. Aggarwal, J.N. Jaiswal, M. Singh**, (1991): Cytotoxicity of eugenol in sealer containing zinc-oxide. *Endod Dent Traumatol*.7 (4), 181-185.
- Hada, T., M. Kanazawa, M. Iwaki, T. Arakida, Y. Soeda, A. Katheng, R. Otake, S. Minakuchi**, (2020): Effect of Printing Direction on the Accuracy of 3D-Printed Dentures Using Stereolithography Technology. *Materials (Basel)*.13 (15).
- Hall, M.C., D.J. Clement, S.B. Dove, W.A. Walker, 3rd**, (1996): A comparison of sealer placement techniques in curved canals. *J Endod*.22 (12), 638-642.

- Heran, J., S. Khalid, F. Albaaj, P.L. Tomson, J. Camilleri,** (2019): The single cone obturation technique with a modified warm filler. J Dent.89 103181.
- Hoan, M.M., G.L. LaBounty, D.L. Keller,** (1988): Ultrasonic endodontic sealer placement. J Endod.14 (4), 169-174.
- Hoover, J., G.W. Thoma, R.M. Madden,** (1980): The effect of endodontic sealers on bone. J Endod.6 (6), 586-590.
- Hsu, P., V. Ramos, Jr., A. Sadr,** (2021): Microcomputed tomography evaluation of cement shrinkage under zirconia versus lithium disilicate veneers. J Prosthet Dent.125 (2), 307-315.
- Huang, Y., B. Celikten, K. de Faria Vasconcelos, L. Ferreira Pinheiro Nicolielo, N. Lippiatt, A. Buyuksungur, R. Jacobs, K. Orhan,** (2017): Micro-CT and nano-CT analysis of filling quality of three different endodontic sealers. Dentomaxillofac Radiol.46 (8), 20170223.
- Hülsmann, M.,** (2008a): Checklisten der Zahnmedizin: Endodontie. Vol. 1. Stuttgart: Thieme. 122.
- Hülsmann, M.,** (2008b): Checklisten der Zahnmedizin: Endodontie. Vol. 1. Stuttgart: Thieme. S. 170-173.
- Hülsmann, M.,** (2022): A critical appraisal of research methods and experimental models for studies on root canal preparation. Int Endod J.55 Suppl 1 95-118.
- Hülsmann, M., M. Heckendorff, A. Lennon,** (2003): Chelating agents in root canal treatment: mode of action and indications for their use. Int Endod J.36 (12), 810-830.
- Hülsmann, M., O.A. Peters, P.M. Dummer,** (2005): Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. Endodontic Topics.10 (1), 30-76.
- Hülsmann, M., Schäfer, E.,** (2005): Gemeinsame Stellungnahme der DGZ und der DGZMK. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift.06 (8).
- Jasrasaria, N., A.P. Tikku, R. Bharti,** (2023): Analysis of porosity, sealer dissolution and apical extrusion of endodontic sealers: A micro computed tomography study. J Oral Biol Craniofac Res.13 (4), 495-499.
- Kahn, F.H., P.A. Rosenberg, L. Schertzer, G. Korthals, P.N. Nguyen,** (1997): An in-vitro evaluation of sealer placement methods. Int Endod J.30 (3), 181-186.
- Kalantar Motamedi, M.R., B.E. Gilbert, W.N. Ha,** (2024): Enhancing Coronal Adaptation of Root Canal Fillings with a Modified Single-Cone Obturation Technique: Two Case Reports. Iran Endod J.19 (1), 50-55.
- Kalantar Motamedi, M.R., A. Mortaheb, M. Zare Jahromi, B.E. Gilbert,** (2021): Micro-CT Evaluation of Four Root Canal Obturation Techniques. Scanning.2021 6632822.

- Karatekin, A., A. Keleş, N. Gençoğlu**, (2019): Comparison of continuous wave and cold lateral condensation filling techniques in 3D printed simulated C-shape canals instrumented with Reciproc Blue or Hyflex EDM. PLoS One.14 (11), e0224793.
- Khorsandi, D., A. Fahimipour, P. Abasian, S.S. Saber, M. Seyedi, S. Ghanavati, A. Ahmad, A.A. De Stephanis, F. Taghavinezhaddilami, A. Leonova, R. Mohammadinejad, M. Shabani, B. Mazzolai, V. Mattoli, F.R. Tay, P. Makvandi**, (2021): 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. Acta Biomater.122 26-49.
- Kim, G.B., S. Lee, H. Kim, D.H. Yang, Y.H. Kim, Y.S. Kyung, C.S. Kim, S.H. Choi, B.J. Kim, H. Ha, S.U. Kwon, N. Kim**, (2016): Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. Korean J Radiol.17 (2), 182-197.
- Kim, H., E. Kim, S.J. Lee, S.J. Shin**, (2015): Comparisons of the Retreatment Efficacy of Calcium Silicate and Epoxy Resin-based Sealers and Residual Sealer in Dentinal Tubules. J Endod.41 (12), 2025-2030.
- Kim, J.H., S.Y. Cho, Y. Choi, D.H. Kim, S.J. Shin, I.Y. Jung**, (2022): Clinical Efficacy of Sealer-based Obturation Using Calcium Silicate Sealers: A Randomized Clinical Trial. J Endod.48 (2), 144-151.
- Kim, S., S. Kim, J.W. Park, I.Y. Jung, S.J. Shin**, (2017): Comparison of the Percentage of Voids in the Canal Filling of a Calcium Silicate-Based Sealer and Gutta Percha Cones Using Two Obturation Techniques. Materials (Basel).10 (10).
- Kim, S.Y., Y.E. Jang, B.S. Kim, E.K. Pang, K. Shim, H.R. Jin, M.K. Son, Y. Kim**, (2021): Effects of Ultrasonic Activation on Root Canal Filling Quality of Single-Cone Obturation with Calcium Silicate-Based Sealer. Materials (Basel).14 (5).
- Komabayashi, T., D. Colmenar, N. Cvach, A. Bhat, C. Primus, Y. Imai**, (2020): Comprehensive review of current endodontic sealers. Dent Mater J.39 (5), 703-720.
- Kooanantkul, C., R.M. Shelton, J. Camilleri**, (2023): Comparison of obturation quality in natural and replica teeth root-filled using different sealers and techniques. Clin Oral Investig.27 (5), 2407-2417.
- Kulczyk, T., M. Rychlik, D. Lorkiewicz-Muszyńska, M. Abreu-Głowacka, A. Czajka-Jakubowska, A. Przysańska**, (2019): Computed Tomography versus Optical Scanning: A Comparison of Different Methods of 3D Data Acquisition for Tooth Replication. Biomed Res Int.2019 4985121.
- Lee, K.W., M.C. Williams, J.J. Camps, D.H. Pashley**, (2002): Adhesion of endodontic sealers to dentin and gutta-percha. J Endod.28 (10), 684-688.
- Lenzi, T.L., A. Guglielmi Cde, V.E. Arana-Chavez, D.P. Raggio**, (2013): Tubule density and diameter in coronal dentin from primary and permanent human teeth. Microsc Microanal.19 (6), 1445-1449.

- Liang, X., W. Liao, H. Cai, S. Jiang, S. Chen,** (2018): 3D-Printed Artificial Teeth: Accuracy and Application in Root Canal Therapy. *J Biomed Nanotechnol.*14 (8), 1477-1485.
- Lin, P.H., D.J. Lin, H.L. Huang, J.T. Hsu, M.G. Tu,** (2023): Comparison sealing ability in three bioceramic sealers applied in hydraulic condensation technique by using micro-computed tomography. *J Dent Sci.*18 (3), 1258-1263.
- Lopes, F.C., C. Zangirolami, J.F. Mazzi-Chaves, A.C. Silva-Sousa, B.M. Crozeta, Y.T.C. Silva-Sousa, M.D. Sousa-Neto,** (2019): Effect of sonic and ultrasonic activation on physicochemical properties of root canal sealers. *J Appl Oral Sci.*27 e20180556.
- López-García, S., B. Myong-Hyun, A. Lozano, D. García-Bernal, L. Forner, C. Llana, J. Guerrero-Gironés, L. Murcia, F.J. Rodríguez-Lozano,** (2020): Cytocompatibility, bioactivity potential, and ion release of three premixed calcium silicate-based sealers. *Clin Oral Investig.*24 (5), 1749-1759.
- Love, R.M.,** (1996): Regional variation in root dentinal tubule infection by *Streptococcus gordonii*. *J Endod.*22 (6), 290-293.
- Marturello, D.M., J.C. James, K.L. Perry, L.M. Déjardin,** (2023): Accuracy of anatomic 3-dimensionally printed canine humeral models. *Vet Surg.*52 (1), 116-126.
- McMichael, G.E., C.M. Primus, L.A. Opperman,** (2016): Dentinal Tubule Penetration of Tricalcium Silicate Sealers. *J Endod.*42 (4), 632-636.
- Metska, M.E., A. Parsa, I.H. Aartman, P.R. Wesselink, A.R. Ozok,** (2013): Volumetric changes in apical radiolucencies of endodontically treated teeth assessed by cone-beam computed tomography 1 year after orthograde retreatment. *J Endod.*39 (12), 1504-1509.
- Mohammadi, Z., S. Shalavi, H. Jafarzadeh,** (2013): Extra roots and root canals in premolar and molar teeth: review of an endodontic challenge. *J Contemp Dent Pract.*14 (5), 980-986.
- Montaser, O.K., D.M. Fayyad, N. Abdelsalam,** (2023): Efficacy of different irrigant activation techniques for cleaning root canal anastomosis. *BMC Oral Health.*23 (1), 142.
- Mozo, S., C. Llana, L. Forner,** (2012): Review of ultrasonic irrigation in endodontics: increasing action of irrigating solutions. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.*17 (3), e512-516.
- Muliyar, S., K.A. Shameem, R.P. Thankachan, P.G. Francis, C.S. Jayapalan, K.A. Hafiz,** (2014): Microleakage in endodontics. *J Int Oral Health.*6 (6), 99-104.
- Mutal, L.O. Gani,** (2005): Presence of pores and vacuoles in set endodontic sealers. *Int Endod J.*38 (10), 690-696.

- Nagaveni, N.B., S. Yadav, P. Poornima, V.S. Reddy, N.M. Roshan, (2017):** Volumetric Evaluation of Different Obturation Techniques in Primary Teeth Using Spiral Computed Tomography. *J Clin Pediatr Dent.*41 (1), 27-31.
- Nagendrababu, V., J. Jayaraman, A. Suresh, S. Kalyanasundaram, P. Neelakantan, (2018):** Effectiveness of ultrasonically activated irrigation on root canal disinfection: a systematic review of in vitro studies. *Clin Oral Investig.*22 (2), 655-670.
- Nezam, S., C.G. Mukherjee, J.N. Shukla, A. Jha, S.A. Khan, A.S. Tanwar, (2021):** Comparative Evaluation of Efficacy of Obturation Techniques in Deciduous Teeth Using Cone-beam Computed Tomography: An In Vivo Study. *Int J Clin Pediatr Dent.*14 (1), 75-80.
- Ng, Y.L., V. Mann, S. Rahbaran, J. Lewsey, K. Gulabivala, (2008):** Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature -- Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J.*41 (1), 6-31.
- Oliveira, K.V., B.M.D. Silva, D.P. Leonardi, B.M. Crozeta, M.D. Sousa-Neto, F. Baratto-Filho, M.C.L. Gabardo, (2017):** Effectiveness of different final irrigation techniques and placement of endodontic sealer into dentinal tubules. *Braz Oral Res.*31 e114.
- Ørstavik, D., I. Nordahl, J.E. Tibballs, (2001):** Dimensional change following setting of root canal sealer materials. *Dent Mater.*17 (6), 512-519.
- Padoin, K., T.C. Bohrer, L.G. Ceolin, C.A.S. Bier, R.A.D. Rosa, R.D. Morgental, (2022):** Does ultrasonic activation improve the bond strength and root canal filling quality of endodontic sealers? *Braz Dent J.*33 (3), 28-37.
- Pérez-Alfayate, R., M. Mercade, J. Algar-Pinilla, R. Cisneros-Cabello, F. Foschi, S. Cohen, (2021):** Root Canal Filling Quality Comparison of a Premixed Calcium Silicate Endodontic Sealer and Different Carrier-Based Obturation Systems. *J Clin Med.*10 (6).
- Peters, O., R. Scott, A. Arias, E. Lim, F. Paque, S. Almassi, S. Hejlawy, (2021):** Evaluation of Dental Students' Skills Acquisition in Endodontics Using a 3D Printed Tooth Model. *Eur Endod J.*6 (3), 290-294.
- Raghavendra, S.S., G.R. Jadhav, K.M. Gathani, P. Kotadia, (2017):** Bioceramics in endodontics - a review. *J Istanb Univ Fac Dent.*51 (3 Suppl 1), S128-s137.
- Reis, T., C. Barbosa, M. Franco, C. Baptista, N. Alves, P. Castelo-Baz, J. Martin-Cruces, B. Martin-Biedma, (2022):** 3D-Printed Teeth in Endodontics: Why, How, Problems and Future-A Narrative Review. *Int J Environ Res Public Health.*19 (13).
- Reymus, M., C. Fotiadou, A. Kessler, K. Heck, R. Hickel, C. Diegritz, (2019):** 3D printed replicas for endodontic education. *Int Endod J.*52 (1), 123-130.

- Reymus, M., B. Stawarczyk, A. Winkler, J. Ludwig, S. Kess, G. Krastl, R. Krug,** (2020): A critical evaluation of the material properties and clinical suitability of in-house printed and commercial tooth replicas for endodontic training. *Int Endod J.*53 (10), 1446-1454.
- Robberecht, L., F. Chai, M. Dehurtevent, P. Marchandise, T. Bécavin, J.C. Hornez, E. Deveaux,** (2017): A novel anatomical ceramic root canal simulator for endodontic training. *Eur J Dent Educ.*21 (4), e1-e6.
- Said, H.M., W.Z. Bakar, M. Farea, A. Husein,** (2012): The effect of different sealer placement techniques on sealing Ability: An in vitro study. *J Conserv Dent.*15 (3), 257-260.
- Santos-Junior, A.O., M. Tanomaru-Filho, J.C. Pinto, K.I.M.C. Tavares, F.F.E. Torres, J.M. Guerreiro-Tanomaru,** (2021): Effect of obturation technique using a new bioceramic sealer on the presence of voids in flattened root canals. *Brazilian Oral Research.* 35.
- Sanz, J.L., S. López-García, F.J. Rodríguez-Lozano, M. Melo, A. Lozano, C. Llena, L. Forner,** (2022): Cytocompatibility and bioactive potential of AH Plus Bioceramic Sealer: An in vitro study. *Int Endod J.*55 (10), 1066-1080.
- Seltzer, S., I.B. Bender, J. Smith, I. Freedman, H. Nazimov,** (1967): Endodontic failures--an analysis based on clinical, roentgenographic, and histologic findings. *I. Oral Surg Oral Med Oral Pathol.*23 (4), 500-516.
- Setya, G., A. Nagpal, S. Kumar, N.A. Ingle,** (2014): Comparison of root canal sealer distribution in obturated root canal: An in-vitro study. *J Int Soc Prev Community Dent.*4 (3), 193-197.
- Sfeir, G., F. Bukiet, M.K. Kaloustian, N. Kharouf, L. Slimani, B. Casel, C. Zogheib,** (2023): Evaluation of the Impact of Calcium Silicate-Based Sealer Insertion Technique on Root Canal Obturation Quality: A Micro-Computed Tomography Study. *Bioengineering (Basel).*10 (11).
- Shabahang, S.,** (2005): State of the art and science of endodontics. *J Am Dent Assoc.*136 (1), 41-52; quiz 89-90.
- Simsek, N., L. Akinci, O. Gecor, H. Alan, F. Ahmetoglu, E. Taslidere,** (2015): Biocompatibility of a new epoxy resin-based root canal sealer in subcutaneous tissue of rat. *Eur J Dent.*9 (1), 31-35.
- Singh, A., N. Gupta, N. Agarwal, D. Kumar, A. Anand,** (2017): A Comparative Volumetric Evaluation of Four Obturating Techniques in Primary Teeth Using Cone Beam Computed Tomography. *Pediatr Dent.*39 (2), 11-16.
- Siqueira Junior, J.F., I.D.N. Rôças, M.F. Marceliano-Alves, A.R. Pérez, D. Ricucci,** (2018): Unprepared root canal surface areas: causes, clinical implications, and therapeutic strategies. *Braz Oral Res.*32 (suppl 1), e65.

- Sousa-Neto, M.D., Y.C. Silva-Sousa, J.F. Mazzi-Chaves, K.K.T. Carvalho, A.F.S. Barbosa, M.A. Versiani, R. Jacobs, G.B. Leoni, (2018):** Root canal preparation using micro-computed tomography analysis: a literature review. *Braz Oral Res.*32 (suppl 1), e66.
- Souza, L.C., G.S.T. Neves, T. Kirkpatrick, A. Letra, R. Silva, (2023):** Physicochemical and Biological Properties of AH Plus Bioceramic. *J Endod.*49 (1), 69-76.
- Spent, A.H. Kahn, (1979):** The use of a plastic block for teaching root canal instrumentation and obturation. *J Endod.*5 (9), 282-284.
- Stamos, D.E., J.L. Gutmann, B.H. Gettleman, (1995):** In vivo evaluation of root canal sealer distribution. *J Endod.*21 (4), 177-179.
- Subbiya, A., A. Kishen, A.R. Pradeepkumar, N. Srinivasan, S. JothiLatha, B. Janani, (2022):** Clinical Outcome of Nonsurgical Root Canal Treatment Using a Matched Single-Cone Obturation Technique with a Calcium Hydroxide-based Sealer: A Retrospective Analysis. *J Endod.*48 (12), 1486-1492.
- Susila, A.J. Minu, (2019):** Activated Irrigation vs. Conventional non-activated Irrigation in Endodontics - A Systematic Review. *Eur Endod J.*4 (3), 96-110.
- Tomson, R.M., N. Polycarpou, P.L. Tomson, (2014):** Contemporary obturation of the root canal system. *Br Dent J.*216 (6), 315-322.
- Torres, F.F.E., R. Jacobs, M. EzEldeen, K. de Faria-Vasconcelos, J.M. Guerreiro-Tanomaru, B.C. Dos Santos, M. Tanomaru-Filho, (2020):** How image-processing parameters can influence the assessment of dental materials using micro-CT. *Imaging Sci Dent.*50 (2), 161-168.
- Uyanik, M.O., E. Nagas, H.E. Cubukcu, F. Dagli, Z.C. Cehreli, (2010):** Surface porosity of hand-mixed, syringe-mixed and encapsulated set endodontic sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.*109 (6), e117-122.
- Velozo, C., V.F.F. Prado, I. Sousa, M.B.A. Albuquerque, L. Montenegro, S. Silva, P. Silva, D. Albuquerque, (2021):** Scope of Preparation of Oval and Long-Oval Root Canals: A Review of the Literature. *ScientificWorldJournal.*2021 5330776.
- Wang, Y., S. Liu, Y. Dong, (2018):** In vitro study of dentinal tubule penetration and filling quality of bioceramic sealer. *PLoS One.*13 (2), e0192248.
- Washio, A., T. Morotomi, S. Yoshii, C. Kitamura, (2019):** Bioactive Glass-Based Endodontic Sealer as a Promising Root Canal Filling Material without Semisolid Core Materials. *Materials (Basel).*12 (23).
- Weber, T., (2016):** Memorix: Zahnmedizin. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Wiemann, A.H., L.R. Wilcox, (1991):** In vitro evaluation of four methods of sealer placement. *J Endod.*17 (9), 444-447.

- Wu, M.K., A.J. De Gee, P.R. Wesselink**, (1994): Leakage of four root canal sealers at different thickness. *Int Endod J.*27 (6), 304-308.
- Wu, M.K., L.W. Van Der Sluis, P.R. Wesselink**, (2004): Fluid transport along gutta-percha backfills with and without sealer. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.*97 (2), 257-262.
- Yang, X.Q., R.Q. Yang, J. Tian, X. Wei**, (2022): Application status and prospect of single-cone obturation technique with bioceramic sealers. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.*57 (4), 424-429.
- Younis, O., J.H. Hembree**, (1976): Leakage of different root canal sealants. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.*41 (6), 777-784.
- Yu, C., P.V. Abbott**, (2007): An overview of the dental pulp: its functions and responses to injury. *Aust Dent J.*52 (1 Suppl), 4-16.
- Zamparini, F., C. Prati, P. Taddei, A. Spinelli, M. Di Foggia, M.G. Gandolfi**, (2022): Chemical-Physical Properties and Bioactivity of New Premixed Calcium Silicate-Bioceramic Root Canal Sealers. *Int J Mol Sci.*23 (22).
- Zehnder, M., B. Lehnert, K. Schönenberger, T. Waltimo**, (2003): Irrigants and intracanal medicaments in endodontics. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.*113 (7), 756-763.
- Zhang, P., K. Yuan, Q. Jin, F. Zhao, Z. Huang**, (2021): Presence of voids after three obturation techniques in band-shaped isthmuses: a micro-computed tomography study. *BMC Oral Health.*21 (1), 227.
- Zias, J., K. Numeroff**, (1987): Operative dentistry in the second century BCE. *J Am Dent Assoc.*114 (5), 665-666.

7 Anhang

7.1 Materialliste

Tabelle 8: Materialliste.

Materialbezeichnung	Produktbezeichnung & Informationen	Hersteller
3D-Drucker	Form 3	Formlabs Inc., Somerville, MA, USA
Amira	Amira Software Life Sciences, Vers.: 6.2.0	Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA
Anmischblock	HS-Anmischblock Pergament	Henry Schein, Melville, NY, USA
Applikationsspritze	Endo Tips	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
Aufbewahrungsboxen		Tinyyo Limited, London, GB
Automatische Spülstation	Form Wash	Formlabs Inc., Somerville, MA, USA
Bandsägemaschine	Nr. 30/40, 220 V, 50 Hz, 0,7 kW, 1 A	Exakt Apparatebau, Norderstedt, D
Biokeramischer Sealer	KometBioSeal	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
CTAn	CT Analyser, Vers.: 1.20.8.0	SkyScan, Bruker, Billerica, MA, USA
EDTA	CanalPro™ EDTA 17 %	COLTENE Holding AG, Altstätten, CHE
Einmalkunststoffspritze	BD Discardit II, 2 ml	Becton Dickinson GmbH, Heidelberg, D
Endomotor EndoPilot ¹	REF 109 2310; 12 V; 1,25 A	Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, D
Ethanol	70 %	Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D
F360 NiTi-Feilen	NiTi shank stainless steel; Torque 1,8 Ncm	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
F360-Feile ISO 025	F04L25.204.025	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
F360-Feile ISO 035	F04L25.204.035	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
F360-Feile ISO 045	F04L25.204.045	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
G*Power	Vers.: 3.1.9.2	Franz Faul, Universität Kiel, D
GraphPad Prism	Vers.: 9.5.1	GraphPad Software, San Diego, USA
Guttapercha	F360 Guttaperchaspitzen, Taper .02	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
Inkubator	hermo Heraeus B 6060 Brutschrank Incubator Wärmeschrank 57 L 50 °C	Heraeus INSTRUMENTS, Hanau, D
Isopropanol	2-Propanol Ph.-Eur.	Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D
K-Feile ISO 10	VDW®STERILE K-Feilen ISO 010/21 mm	VDW GmbH, München, D

Materialbezeichnung	Produktbezeichnung & Informationen	Hersteller
K-Feile ISO 15	VDW®STERILE K-Feilen ISO 015/21 mm	VDW GmbH, München, D
Kunstharz, weißes	White, V4 FLGPWH04, Standardresin	Formlabs Inc., Somerville, MA, USA
Lentulo-Spirale	Lentulo®, Größe 2, blau, 17 mm Länge	Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA
Lichthärtetofen	Form Cure, 60 min, 60 °C, 405 nm	Formlabs Inc., Somerville, MA, USA
Manuelle Spülstation	Finish Kit	Formlabs Inc., Somerville, MA, USA
Mikro-CT-Scanner	SkyScan 1172; Seriennummer 09H01131;	Bruker, Billerica, MA, USA
Natriumhypochlorit	HISTOLITH NaOCl 3 %	lege artis Pharma GmbH & Co. KG, Dettenhausen, D
Netfabb	Vers.: 2021.1	Autodesk GmbH, München, D
NRecon	Vers.: 1.6.9.4	Skyscan, Bruker, Billerica, MA, USA
Opener	OP10L19.204.030	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
PathGlider	PG03L21/L25/L31.204.015	Komet Dental – Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D
Plugger	Plugger mit Silikongriff	Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA
PreForm	Vers.: 13.18.0	Formlabs Inc., Somerville, MA, USA
Röntgengerät	Oralix AC 9869 000 00101 Gendex Division, 20 ms, 7.5 mA, 65 kV	Dentsply, Italy
Schallaktivierte Spitze	EDDY™	VDW GmbH, München, D
Silikon	Flexitime Correct Flow	Kulzer GmbH, Hanau, D
Silikonstopper	Silikon Stops	Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA
Sonde	HS-Thomas-Color Instrumente, PKT-1 gold	Henry Schein, Melville, NY, USA
Sonic Handstück	KaVo SONICflex 2003L	KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D
Spülkanüle	Einmalkanüle 70 mm	Interlock Medizintechnik GmbH, Lensahn, D
Spülnadel	Miraject Endotec Duo, Luer	Hager & Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, D
Ultraschallbad	Souvirex RK 102 Transistor; Typ-Nr. 25187, 220 V, 0,7 A, 50-80 Hz, HF-Frequ. 35 kHz, HF-Leist. 120/240 W	Bandelin electronic GmbH & Co. KG, Berlin, D
Universalklebewachs	Supradent-Klebewachs	Oppermann-Schwedler, Bonn, D
Universalkürette	Figur 23A, Griff 6	Mfg. Co., LLC., Frankfurt am Main, D
Winkelstück, grünes	INTRACompact 0767 LHC, Übersetzung 5,4:1	KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D
Zentrifuge	CompactStar CS 4	VWR International GmbH, Darmstadt, D
Zentrifugenröhrchen	Schraubröhre, 15 ml, 120x17 mm, 60 sek bei 6500 min ⁻¹ /4.000xg	Sarstedt, Nümbrecht, D

7.2 Materialbezeichnung in dem Programm „Amira“

Tabelle 9: Materialbezeichnungen in dem Programm Amira

[E]: Schallaktivierte Spitze, [S]: Applikationsspritze, [L]: Lentulo-Spirale.

Materialbezeichnung in Amira	Material
WF_E	Wurzelfüllung (Guttapercha + Sealer) der Gruppe 1 [E]
Luft_E	Hohlräume in der Wurzelfüllung der Gruppe 1 [E]
WF_S	Wurzelfüllung (Guttapercha + Sealer) der Gruppe 2 [S]
Luft_S	Hohlräume in der Wurzelfüllung der Gruppe 2 [S]
WF_L	Wurzelfüllung (Guttapercha + Sealer) der Gruppe 3 [L]
Luft_L	Hohlräume in der Wurzelfüllung der Gruppe 3 [L]

**MEDIZINISCHE FAKULTÄT
DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL**

ETHIK-KOMMISSION



Universitäts-Kinderklinik • Schwanenweg 20 • 24105 Kiel

Dr. med. Sebastian Paris
Klinik für Zahnerhaltungskunde und
Parodontologie
UKSH, Campus Kiel
Arnold-Heller-Str. 3, Haus 26
24105 Kiel

Schwanenweg 20
D-24105 Kiel

Telefon 0431 / 597-1809
Telefax 0431 / 597-1831

Datum: **25.08.2010**

AZ.: D 444/10 (bitte stets angeben)
Studienplan: **Extrahierte Zähne – Verschiedene In-vitro-Versuche mit**
dentalen Materialien
Antrag, Informationsblatt und Einverständniserklärung

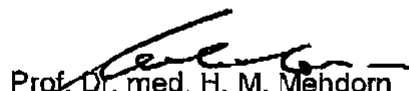
Antragsteller: **Dr. med. Sebastian Paris, PD Dr. med. Hendrik Meyer-Lückel**
Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie, UKSH,
Campus Kiel

Datum des
Antrages: **11.08.2010(Eingang 17.08.2010)**

Sehr geehrter Herr Kollege Paris, sehr geehrter Herr Kollege Meyer-Lückel,

vielen Dank für Ihren obengenannten Antrag. Nach Durchsicht der Unterlagen durch
die Geschäftsstelle und durch mich als Vorsitzenden der Ethik-Kommission bestehen
gegen die Durchführung der Studie keine berufsethischen und berufsrechtlichen
Bedenken.

Mit freundlichen kollegialen Grüßen


Prof. Dr. med. H. M. Mehdorn
Vorsitzender der Ethik-Kommission


Dr. med. Christine Glinicke
Geschäftsführung der Ethik-Kommission

9 Danksagung

Herrn Professor Dr. Christof Dörfer, Direktor der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel, möchte ich mich herzlich für die Möglichkeit meine Promotion in der Zahnklinik durchzuführen zu können, danken.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Doktormutter, Frau Professorin Dr. Birte Größner-Schreiber, für die Bereitstellung meines Promotionsthemas sowie ihre wertvolle Unterstützung und Betreuung während der gesamten wissenschaftlichen Arbeit.

Für die Überlassung des Promotionsthemas, die Planung der Versuchsdurchführung sowie die Hilfe bei der Statistik danke ich Herrn Dr. David William Christofzik.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Patrick Glandorf, der mir mit zahlreichen Anregungen und hilfreichen Tipps von Beginn der Promotion an beistand und so wesentlich zum Gelingen meiner Promotion beigetragen hat.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Dr. Sebastian Büsse für die viele Hilfe bei den Mikro-CT-Scans sowie der digitalen Auswertung.

Des Weiteren möchte Frau Dr. Freitag-Wolf für die Hilfe bei der anfänglichen Statistik beziehungsweise Fallzahlberechnung für die Studie bedanken.

Zudem danke ich herzlich Herrn Dr. Harald Wellhäußer für seine Unterstützung bei der Veröffentlichung sowie der Überarbeitung meiner Dissertation.

Mein persönlicher Dank gilt meiner ganzen Familie, insbesondere meiner Mutter Astrid Rienau, die mir mein Studium und diesen Lebensweg ermöglicht hat und mir stets zur Seite stand.

Schließlich möchte ich auch meinen engen Freunden und Kollegen für ihre Ratschläge, den emotionalen Beistand und ihre fortwährende Motivation danken.

Wissenschaftliche Präsentation und Veröffentlichung des Abstracts

**11/2023 5. Gemeinschaftstagung der DGZ mit der DGET, DGPZM & DGR²Z
23.11. - 25.11.2023, München | 8. DGZ-Tag der Wissenschaft am
23.11.2023**

N. A. Rienau, S. Büsse, D. W. Christofzik, P. Glandorf, K. M. Fawzy El-Sayed,
B. Größner-Schreiber, S. N. Gorb, C. Dörfer

"Einfluss der Applikationsmethode eines biokeramischen Sealers auf die
Qualität von Wurzelkanalfüllungen an 3D gedruckten Zähnen"

[https://www.dget.de/content/4-veranstaltungen/abstracts-
5.gemeinschaftstagung-muenchen-2023.pdf](https://www.dget.de/content/4-veranstaltungen/abstracts-5.gemeinschaftstagung-muenchen-2023.pdf)