

Aus der Klinik für
Zahnerhaltungskunde und Parodontologie
(Direktor: Prof. Dr. C. Dörfer)
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

***Die minimalinvasive Zugangskavität bei der
Wurzelkanalbehandlung -
Der Einfluss von 2D-Bildgebung, dentaler
Volumentomographie sowie einer 3D-Planungssoftware auf
die Größe der Trepanationsöffnung***

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

vorgelegt von
Patrick Glandorf
aus Bassum

Kiel 2021

1. Berichterstatterin: Prof. Dr. Birte Größner-Schreiber

2. Berichterstatter: Priv.- Doz. Dr. Dr. Falk Birkenfeld

Tag der mündlichen Prüfung: 05.12.2022

Zum Druck genehmigt, Kiel, den 24.08.2022

gez.: Prof. Dr. Birte Größner-Schreiber
(Vorsitzende der Prüfungskommission)

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

I	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
II	TABELLENVERZEICHNIS	V
III	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
1	EINLEITUNG	1
1.1	Begriffserklärung	1
1.2	Trepanationsöffnung bei der Wurzelkanalbehandlung	2
1.3	Intraorale diagnostische Bildgebung	4
1.4	Digitale Volumentomographie	4
1.5	Endodontische Planungssoftware	5
1.6	Dreidimensional gedruckte Kopien menschlicher Zähne	6
1.7	Fragestellung und Arbeitshypothese	7
2	MATERIAL UND METHODEN	8
2.1	Studiendesign	8
2.2	Einteilung der Probanden	10
2.3	Randomisierung der Prüfkörper	10
2.4	Vorbereitende Maßnahmen	12
2.4.1	Herstellung der Modellhalterung	12
2.4.2	Herstellung der Prüfkörper	13
2.4.3	Druck der dreidimensionalen Dateien	16
2.5	Kalibrierung des diamantierten Bohrers auf den Kunststoffzahn	18
2.6	Versuchsaufbau	18
2.7	Versuchsdurchführung	19
2.8	Datenerhebung	21
2.8.1	Ermittlung von Trepanationsfehlern	21
2.8.2	Oberflächenscan	22
2.8.3	Ausrichtung mit GOM Inspect	22
2.8.4	Volumenmessung und Berechnung	23
2.8.5	Flächenbestimmung der Restzahnhartsubstanz	23
2.9	Statistische Auswertung	24
2.9.1	Powerberechnung	24
2.9.2	Trepanationsfehler	24
2.9.3	Bestimmung des Volumens und der verbliebenen Fläche der Restzahnhartsubstanz	25
2.9.4	Fragebogenauswertung	25

3 ERGEBNISSE	26
3.1 Fehler während des Anlegens der primären Zugangskavität	26
3.1.1 <i>Perforation</i>	27
3.1.2 <i>Bearbeitung des Pulpakammerbodens</i>	28
3.1.3 <i>Belassen des Pulpakammerdaches</i>	29
3.2 Volumenmessung	31
3.2.1 <i>Entferntes Volumen in Bezug zur diagnostischen Bildgebung</i>	31
3.2.2 <i>Entferntes Volumen in Bezug zur Erfahrungsstufe</i>	32
3.3 Fläche der Restzahnhartsubstanz	32
3.3.1 <i>Fläche auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur diagnostischen Bildgebung</i>	32
3.3.2 <i>Fläche auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur Erfahrungsstufe</i>	33
3.4 Fragebogenauswertung	34
3.4.1 <i>Subjektive Sofort-Bewertung der diagnostischen Bildgebung</i>	35
3.4.2 <i>Platzierung hinsichtlich der Sicherheit beim Anlegen der Zugangskavität</i>	35
3.4.3 <i>Platzierung hinsichtlich der Handhabung der diagnostischen Bildgebung</i>	36
3.4.4 <i>Platzierung hinsichtlich der Schnelligkeit im Umgang mit der diagnostischen Bildgebung</i>	36
4 DISKUSSION	37
4.1 Diskussion von Material und Methoden	37
4.1.1 <i>Limitation der Prüfkörper</i>	37
4.1.2 <i>Studienteilnehmer</i>	40
4.1.3 <i>Auswertung</i>	41
4.2 Diskussion der Ergebnisse	42
4.2.1 <i>Substanzabtrag und verbliebene Fläche der Zahnhartsubstanz</i>	42
4.2.2 <i>Auftreten von Behandlungsfehlern</i>	47
4.2.3 <i>Fragebogen</i>	51
4.2.4 <i>Schlussfolgerung und Ausblick</i>	54
5 ZUSAMMENFASSUNG	57
6 LITERATURVERZEICHNIS	59
7 ANHANG	70
7.1 Auswahl der Prüfkörper	70
7.2 Probandenschemata	71
7.3 Fragebogen	72
7.4 Shore Härte von Formlabs Standard Kunststoffen	77
7.5 Kalibrierung des diamantierten Bohrers auf den Kunststoffzahn	78
7.6 Ergebnisse der Abweichung bei der Ausrichtung der Prüfkörper	81
7.6.1 <i>Abweichung der einzelnen Prüfkörper</i>	81

7.6.2	<i>Statistische Auswertung der Abweichung der Prüfkörper</i>	83
7.6.3	<i>Zusammenfassung der Abweichung der Prüfkörper</i>	86
7.7	Protokoll zur Erstellung der Prüfkörper	87
7.7.1	<i>Erstellung der Begrenzung zwischen koronalem und apikalem Anteil</i>	89
7.7.2	<i>Erstellen des Gleit- und Führungsmechanismus</i>	90
7.7.3	<i>Anpassung des apikalen Bereiches der STL-Zahn-Kopie</i>	94
7.7.4	<i>Zusammenführen von Begrenzungsdatei, Gleit- und Führungshilfe sowie STL-Zahn-Kopie mit apikaler Verlängerung</i>	95
7.7.5	<i>Zusammenfassung der Prüfkörper Herstellung</i>	96
8	ETHIKANTRAG	98
9	DANKSAGUNG	99
10	PUBLIKATIONEN	100

Gender Erklärung:

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

I Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
HU	Hounsfield Unit (Hounsfield Einheit auf der Hounsfield Skala) (Abschwächung von Röntgenstrahlung in Graustufenbildern)
ISO	International Organisation for Standardization (internationale Normierungsorganisation)
Max	Maximum
Min	Minimum
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
mm ³	Kubikmillimeter
MW	Mittelwert
RIO	Region of Interest
RVG	Radiovisiographie
STL	Standard Triangulation Language
Std.	Standardabweichung
U/min	Umdrehungen pro Minute
vs.	Versus
z.B.	zum Beispiel

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aufteilung der Prüfkörper auf die Erfahrungsstufe und die diagnostische Bildgebung	11
Tabelle 2:	Übersicht über die Anzahl und das Auftreten (in Prozent) der Trepanationsfehler in Bezug zur Zahngruppe, zur Erfahrungsstufe und zur diagnostischen Bildgebung.	26
Tabelle 3:	Deskriptive Statistik des entfernten Volumens [in mm ³] in Bezug zur diagnostischen Bildgebung.	31
Tabelle 4:	Deskriptive Statistik des entfernten Volumens [in mm ³] in Bezug zur Erfahrungsstufe.	32
Tabelle 5:	Deskriptive Statistik der Fläche [in mm ²] auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur diagnostischen Bildgebung.	33
Tabelle 6:	Deskriptive Statistik der verbliebenen Fläche [in mm ²] auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur Erfahrungsstufe.	34
Tabelle 7:	Detaillierte Darstellung der in den Fragebögen erfassten Parameter von 34 Probanden vor der Versuchsdurchführung.	34
Tabelle 8:	Eigenschaften der verwendeten Prüfkörper.	70
Tabelle 9:	Exemplarisches Behandlungsschema der Erfahrungsstufe „Studierende“ vor der Randomisierung.	71
Tabelle 10:	Herstellerangaben der eingesetzten Schleifkörper samt Spezifikation.	78
Tabelle 11:	Ergebnis der Messungen der unterschiedlichen Schleifkörpern.....	79
Tabelle 12:	Zusammenfassung der Messungen.	80
Tabelle 13:	Abweichung bei der Ausrichtung der Prüfkörper.	81
Tabelle 14:	Deskriptive Statistik der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur Zahngruppe.	84
Tabelle 15:	Deskriptive Statistik der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler.	85

Tabelle 16: Deskriptive Statistik der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur diagnostischen Bildgebung.	86
---	----

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema der Nomenklatur und Topographie des Endodonts nach Hellwig et al. (2018b).....	2
Abbildung 2 :	Darstellung der Behandlungsplanung (a.) sowie der Trepanationsöffnung (b.) mithilfe der endodontischen Planungssoftware.....	6
Abbildung 3:	Flussdiagramm zum Versuchsablauf.....	9
Abbildung 4:	Planung der Halterung für die Phantomeinheit der studentischen Ausbildung mit künstlichen Alveolen an der Position von Frontzähnen, Prämolaren und Molaren zum Einführen von Zähnen.	12
Abbildung 5:	Erstellung einer dreidimensionalen Oberfläche anhand einer digitalen Volumentomographie mit InVesalius.....	14
Abbildung 6:	Modellhalter für Oberkiefer (links) und Unterkiefer (rechts) mit der Unterseite auf dem Druckbett samt Stützstrukturen.	16
Abbildung 7:	Ansicht einer Frontzahn-Perforation in koronaler (a.), sagittaler (b.) und axialer (d.) Projektion der dentalen digitalen Volumentomographie samt Volumendarstellung (c.).....	21
Abbildung 8:	Screenshot aus CEREC AC und CEREC Primescan Intraoralscanner von Dentsply Sirona mit dem Scan eines Prüfkörpers.....	22
Abbildung 9:	Darstellung der Überlagerung des Prüfkörpers und der Ausgangsdatei mit Hilfe des Programms GOM Inspect (GOM Software 2019, GOM GmbH, Braunschweig, D).	23
Abbildung 10:	Der Prüfkörper setzte sich aus der ausgerichteten STL – Zahn-Kopie (türkis), aus der künstlichen Gingiva (orange) und dem Gleit und Führungsmechanismus (rot) für das Einführen in die künstliche Alveole des Modellhalters zusammen.	87

Abbildung 11: Vorher und Nachher: Die Ausrichtung des Modellhalters (grün) wurde auf den Oberflächenscan (rot) mit Hilfe der Align Funktion des Programmes Meshlab deckungsgleich übertragen.....	88
Abbildung 12: Übertragung der Lageinformation aus dem Oberflächenscan (grün) auf die Ebenen der STL-Zahn-Kopie (rot).....	88
Abbildung 13: Die ausgerichtete STL-Zahn-Kopie (weiß) im Modellhalter (lila) in derselben Stellung und Neigung wie der ihr zugrunde liegende humane Zahn.....	88
Abbildung 14: Rechteckige Ausgangsdatei.....	89
Abbildung 15: Zerschnittener Modellhalter mit rechteckiger Ausgangsdatei (links) und zerschnittenem Modellhalter mit runder Begrenzung (rechts).	90
Abbildung 16: Zerschnittener Halter mit runder Begrenzung und STL-Zahn-Kopie (links) und zerschnittener Halter mit runder Begrenzung und Ausschnitt für jeweilige STL-Zahn-Kopie (rechts).....	90
Abbildung 17: Stift (links) und Rechteckhülse mit mittigem Ausschnitt (rechts).	91
Abbildung 18: Hülse mit 16 Stiften für den Frontzahn und Prämolaren Bereich (links) und Hülsen mit 28 Stiften für den Molaren-Bereich (rechts).	91
Abbildung 19: Die beschnittene Halterung mit unbeschnittenen Gleit- und Führungsmechanismus (links) und die beschnittene Halterung mit beschnittenem Gleit- und Führungsmechanismus (rechts).	92
Abbildung 20: Gleit- und Führungsmechanismus mit 1mm apikaler Verlängerung (distal).....	93
Abbildung 21: Die beschnittene Halterung mit apikalem Anteil des Gleit- und Führungsmechanismus (links) und die Einsenkung für Gleit und Führungsmechanismus (rechts).....	93
Abbildung 22: Jeweilige Halterung mit Einsenkung am Boden jeder Alveole sowie dem Wasserabfluss für den Oberkiefer (links) und für den Unterkiefer (rechts).....	94

Abbildung 23: STL-Zahn-Kopie samt Begrenzung (links) und STL-Zahn-Kopie mit apikaler Modifikation samt Begrenzung (rechts).....	95
Abbildung 24: Gleit und Führungsmechanismus ohne STL-Zahn-Kopie mit Verlängerung (links) und rot markierte Position der Spüllöcher (rechts).	96
Abbildung 25: Druckbarer Frontzahn-Prüfkörper mit Beschriftung für die Variante 001 (links) und druckbare Molaren-Prüfkörper mit Beschriftung für den Zahn 26 (rechts).	97
Diagramm 1: Häufigkeit einer Perforation in Bezug zur behandelten Zahngruppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich.	27
Diagramm 2: Häufigkeit der Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur behandelten Zahngruppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich.....	28
Diagramm 3: Häufigkeit des Belassens des Pulpakammerdaches in Bezug zur behandelten Zahngruppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich.....	30
Diagramm 4: Entferntes Volumen [in mm ³] in Bezug zur Bildgebung (a.) und zur Erfahrungsstufe (b.); (*) = signifikant unterschiedlich.	31
Diagramm 5: Verbliebene Fläche [in mm ²] auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze- in Bezug zur Bildgebung (a.) und zur Erfahrungsstufe (b.); (*) = signifikant unterschiedlich.	33
Diagramm 6: Bewertung der diagnostischen Bildgebung direkt im Anschluss an die Trepanation der Prüfkörper; (*) = signifikant unterschiedlich.	35
Diagramm 7: Platzierung der diagnostischen Bildgebung hinsichtlich der Sicherheit beim Anlegen der Zugangskavität (a.), der Handhabung (b.) und in der Schnelligkeit (c.) im Umgang mit der Bildgebung; (*) = signifikant unterschiedlich.....	36

Diagramm 8: Auswertung der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur Zahngruppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich. 84

1 Einleitung

1.1 Begriffserklärung

In der Zahnmedizin bezeichnet die Trepanation die erste invasive Maßnahme der Wurzelkanalbehandlung. Das Wort leitet sich vom altgriechischen „trýpanon“ ab und bedeutet „Bohrer“. In der Medizin beschreibt der Begriff ein operatives Verfahren, bei dem eine umschlossene Körperhöhle mechanisch eröffnet wird. In der Neurochirurgie ist die Trepanation ein Synonym für die Kraniotomie, das heißt die operative Öffnung des Schädels. In der zahnärztlichen Behandlung ist die Trepanation der erste Schritt beim Anlegen einer endodontischen Zugangskavität (Pschyrembel, 2019).

Die Endodontie ist ein Teilbereich der Zahnerhaltung. Diese befasst sich neben der Anatomie und der Physiologie des Endodonts mit der Ätiologie, der Prävention, der Pathologie sowie der Diagnostik und Therapie bei Verletzungen und Erkrankungen. Das Endodont umfasst die Zahnpulpa sowie das umgebende und mit diesem in physiologischen Kontakt stehende Gewebe, wie das Dentin sowie das laterale und periapikale Parodont (Weber, 2016).

Vielseitige Gründe führen zu einer Wurzelkanalbehandlung. Im überwiegenden Teil der Fälle liegt die Ursache in einer kariösen Läsion des Zahnes, einhergehend mit einer irreversibel geschädigten oder nekrotischen Zahnpulpa. Aus prothetischen Gesichtspunkten kann die drohende Pulpaeröffnung bei der Präparation eines Zahnes mit Fehlstellung, einem zweifelhaften Pulpazustand und die Devitalisierung zur Verankerung eines Wurzelstifts eine Wurzelkanalbehandlung begründen. Aus chirurgischer Sicht stellen die geplante Wurzelresektion oder Hemisektion sowie die Wurzelspitzenresektion eine Indikation zur Wurzelkanalbehandlung dar (Europäische Gesellschaft für Endodontologie, 2004).

Zusätzlich können thermische, chemische oder traumatisch geschädigte Zähne zu einer Entzündung der Pulpa führen, die eine Wurzelkanalbehandlung nötig macht (Koçkapan, 2003a). Ziele einer endodontischen Behandlung sind die Erhaltung des erkrankten Zahnes und die Verhinderung einer schädlichen Ausbreitung auf Nachbarstrukturen (Hellwig et al., 2018a).

1.2 Trepanationsöffnung bei der Wurzelkanalbehandlung

Die Zahnpulpa ist der Weichgewebskern eines Zahnes und besteht aus vaskularisiertem und innerviertem Bindegewebe. Wie in Abbildung 1 zu sehen, füllt das Pulpagewebe die Pulpakammer aus, es wird zwischen Kronenkavum mit Kronenpulpa und Wurzelkanälen mit Wurzelpulpa unterschieden. Die Pulpakammer ist von Dentin umgeben, ihre Ausdehnung entspricht der verkleinerten Zahnumrissform. Okklusale Ausläufer werden als Pulpahörner bezeichnet und die Dentinschicht, die das Kronenkavum bedeckt, ist das Pulpakammerdach (Hellwig et al., 2018b).

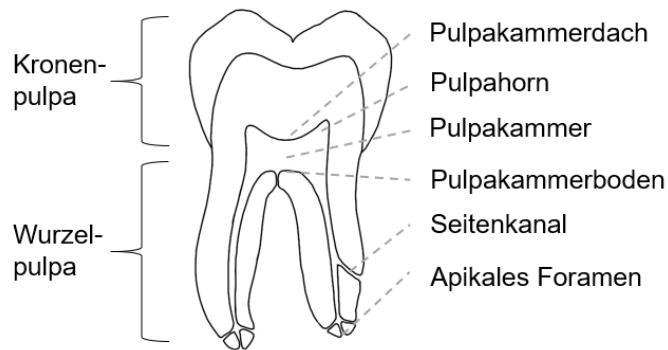


Abbildung 1: Schema der Nomenklatur und Topographie des Endodonts nach Hellwig et al. (2018b).

Bei der Trepanation mit rotierenden Instrumenten, das bedeutet beim Zugang zum Endodont, unterscheidet man zwischen der primären Zugangskavität, die den Zugang in die Pulpakammer darstellt, und der sekundären Zugangskavität, die den Zugang zum Wurzelkanalsystem freigibt (Hülsmann et al., 2019). In der Vergangenheit wurde für die Dimensionierung der Zugangskavität für jeden Zahn idealisiert ein Standardverfahren angewandt, ohne auf die jeweils zugrunde liegende Morphologie des Zahnes speziell einzugehen (Hargreaves und Berman, 2015). Durch die Nutzung von Lupenbrille und Operationsmikroskop in der modernen Endodontie orientiert sich die Größe der Zugangskavität eher an der individuellen Pulpakammer des Zahns, der gerade behandelt wird (Patel und Rhodes, 2007). Als Hilfestellung zum Auffinden der Pulpakammer wurde ein Regelwerk verfasst, zusätzlich sind fundierte Kenntnisse über die Lage der Pulpakammer sowie der Wurzelkanalanatomie der einzelnen Zähne von grundlegender Bedeutung (Friedrichs, 2010). Als äußere anatomische Struktur dient

der Übergang zwischen Zahnschmelz und Wurzelzement, die sogenannte Schmelz-Zement-Grenze. Auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze befindet sich die Pulpakammer im Zentrum des Zahnes und folgt konzentrisch der äußeren Zahnform (Krasner und Rankow, 2004, Krasner et al., 2010). Das Ziel der Zugangskavität ist es das Pulpakammerdach vollständig zu entfernen und sich erst dann auf die Suche nach den Wurzelkanaleingängen zu machen (Weller und Hartwell, 1989, Rankow und Krasner, 1995). Die Kanaleingänge befinden sich am Übergang von Pulpakammerboden zu Pulpakammerwand sowie in den Ecken der Pulpakammerwände (Krasner und Rankow, 2004). Die Neigung der Zugangskavität sollte so gewählt werden, dass eine vollständige Übersicht über den Pulpakammerboden besteht und die Kanaleingänge lokalisierbar sind. Zudem sollten die Wurzelkanalinstrumente gerade und spannungsfrei in die Wurzelkanäle eingeführt werden können (Hellwig et al., 2018d). Gleichzeitig soll die Präparation so substanzschonend wie möglich durchgeführt werden und einer provisorischen Restauration genügend Retention bieten (Koçkapan, 2003b).

Typische Fehler entstehen beim Anlegen der Zugangskavität und der Suche des Wurzelkanalsystems, wenn die Zahnachse nicht beachtet wird oder wenn ausreichende Kenntnisse über die anatomischen Verhältnisse nicht vorhanden sind (Nicholls, 1962, Kvinnslund et al., 1989, Tsesis und Fuss, 2006). Dies kann leicht zu einer iatrogen bedingten Wurzelperforation führen, die eine künstliche Kommunikation zwischen der Pulpa sowie dem Wurzelkanalsystem und dem umgebenden Gewebe ermöglicht (Fuss und Trope, 1996). Eine Vorstufe der Perforation ist die Bearbeitung des Pulpakammerbodens infolge falsch dimensionierter Bohrer oder deren unangepasste Anwendung während des Entfernens des Pulpakammerdaches oder während der Suche nach den Wurzelkanaleingängen (Bryan et al., 1999, Silveira et al., 2008). Dies kann vor allem bei mehrwurzeligen Zähnen am Boden der Pulpakammer zwischen den einzelnen Wurzeln, das heißt auf Höhe der Furkation, zu einer Perforation führen (Camilo do Carmo Monteiro et al., 2017). Daher sollte eine Beschädigung des Pulpakammerbodens durch die Nutzung geeigneter Bohrer verhindert werden (Hellwig et al., 2018d). Der komplette Abtrag des Pulpakammerdaches wird als notwendig angesehen, da zum einen die Möglichkeit besteht, sofern der Übergang zwischen Pulpakammerwand und Pulpakammerboden nicht einsehbar ist, dass sich unter dem Überhang Wurzelkanaleingänge verbergen

können und zum anderen, um alle Gewebereste in der Pulpakammer sicher zu entfernen (Rankow und Krasner, 1995). Das bedeutet, dass auch das Gewebe in den Pulpahörnern restlos entfernt werden muss, da es sonst, vor allem bei Frontzähnen, im Verlauf zu Verfärbungen und einer Reinfektion des Zahnes kommen kann (Attin et al., 2003, Koçkapan, 2003b).

1.3 Intraorale diagnostische Bildgebung

Eine Wurzelkanalbehandlung kann unter Zahnärzten mit Stress, Frustration und fehlender Kontrolle assoziiert sein. Dies kann zum einen an der Komplexität von Wurzelkanälen im Allgemeinen aber auch in der eingeschränkten Möglichkeit liegen, die Kanäle mit zweidimensionalen Röntgenbildern präzise zu diagnostizieren (Dahlstrom et al., 2017). Neben der Anamnese, der Beurteilung der Hauptbeschwerden und einer ausführlichen klinischen Untersuchung hängt die Therapieentscheidung jedoch zum großen Anteil von der radiologischen Untersuchung ab. Die American Association of Endodontists und die American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology empfehlen in einer veröffentlichten Stellungnahme weiterhin als Mittel der Wahl die intraorale Röntgenaufnahme in Form eines Zahndiapositives (AAE and AAOMR., 2015). Vor der Trepanation muss ein Röntgenbild vorliegen, da die intraorale Aufnahme Informationen über die Form und Ausdehnung der Pulpakammer, der anatomischen Strukturen sowie die Anzahl der Wurzeln und der Wurzelkanäle enthält. Sinnvoll ist eine periapikale Röntgenaufnahme in Parallel- oder Rechtwinkeltechnik und in orthoradialer Projektion (Koçkapan, 2003b, Hülsmann, 2008). Die diagnostische Aussagekraft nur einer Aufnahme ist dadurch begrenzt, dass ein dreidimensionales Objekt zweidimensional dargestellt wird. Um zusätzliche Wurzeln und Wurzelkanäle zu detektieren, kann es hilfreich sein neben den orthoradialen Aufnahmen eine weitere mesial oder distal exzentrische Aufnahme anzufertigen (Hellwig et al., 2018c).

1.4 Digitale Volumentomographie

Als weitere radiologische Bildgebung ist die digitale dentale Volumentomographie (DVT) in der modernen Endodontie ein wichtiger Bestandteil. Der größte Vorteil des DVTs liegt in der dreidimensionalen Darstellung anatomischer Strukturen. Bei der

konventionellen Röntgenbildtechnik kann es durch die Summierung von knöchernen Strukturen zu Überlagerungen kommen (Tamse et al., 1980, Pasler, 2008). Fehlinterpretation von Kalzifizierungen, zusätzlichen Wurzeln und Wurzelkanalkrümmungen sowie das Übersehen von apikalen Läsionen können erschwerend hinzu kommen (Sherwood, 2012). Das DVT bietet gegenüber der konventionellen intraoralen Röntgenaufnahme eine überlagerungsfreie und präzise Darstellung räumlicher Strukturen (Lofthag-Hansen et al., 2007, Michetti et al., 2010). Das bessere diagnostische Spektrum reicht von der Morphologie der Zähne hinsichtlich der Anzahl an Wurzeln und Wurzelkanälen über das Auffinden von periapikalen Parodontopathien und Wurzelfrakturen bis hin zu resorptiven Prozessen (Cotton et al., 2007, Matherne et al., 2008, Hassan et al., 2009, Nakata et al., 2009, Kottoor et al., 2010). Vor allem in schwierigen Fällen steigt das diagnostische Vertrauen sowie die präzise Beurteilung komplexer Wurzelkanalanatomien gegenüber dem konventionellen Zahnfilm (Sousa et al., 2017, Viana Wanzeler et al., 2019). Die Therapieentscheidung wird durch die zusätzlichen Informationen der dreidimensionalen Röntgentechnik erheblich beeinflusst (Mota de Almeida et al., 2014, Rodriguez et al., 2017). Im endodontischen Behandlungsspektrum ist das DVT somit keine Übertherapie, sondern kann entscheidend zum Behandlungserfolg beitragen (Chogle et al., 2020).

1.5 Endodontische Planungssoftware

Eine zusätzliche Möglichkeit der radiologischen Bildgebung ist durch eine von Sirona Dentsply entwickelten Planungssoftware gegeben (3D Endo™ Software Version 1.0.9, Maillefer Instruments Holding Sàrl, Ballaigues, Schweiz), welche durch Nutzung der Bilddaten der digitalen Volumentomographie eine präendodontische Behandlungsplanung ermöglicht. Nach dem Laden des DVT Datensatzes wird der Behandler intuitiv durch das Programm geleitet. Die Anzahl der Wurzelkanäle wird bestimmt und für jeden Kanal separat der Kanaleingang sowie das apikale Foramen durch den Behandler markiert. Durch eine Markierung der koronalen Referenz und des Pulpakammerbodens kann die Tiefe der Zugangskavität bestimmt werden. Wie in Abbildung 2 ersichtlich können nach der Projektion von Wurzelkanalinstrumenten in die Kanäle gradlinige Zugänge sowie koronale Erweiterungen geplant werden. Besonders im Falle einer komplexen Anatomie des Zahnes lassen sich bereits vor der

Behandlung die notwendige Ausdehnung sowie die Ausrichtung der Zugangskavität planen (Tchorz, 2017). In einer Ex-vivo-Studie konnte zudem belegt werden, dass durch diese Planungssoftware die Länge des Wurzelkanals in komplexen Fällen präzise vorhersagbar ist (Tchorz et al., 2018).

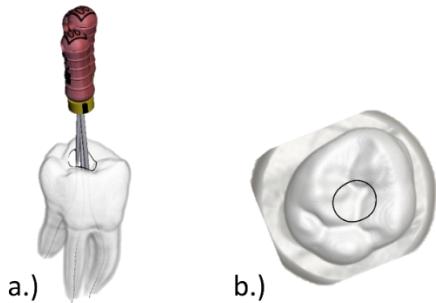


Abbildung 2 : Darstellung der Behandlungsplanung (a.) sowie der Trepanationsöffnung (b.) mithilfe der endodontischen Planungssoftware.

1.6 Dreidimensional gedruckte Kopien menschlicher Zähne

Das Anlegen einer Zugangskavität sowie die gesamte Wurzelkanalbehandlung erfordert von Zahnärzten viel manuelles Geschick. Die endodontische Ausbildung findet daher typischerweise unter realen Bedingungen am extrahierten Zahn statt (De Moor et al., 2013). Um die Limitationen extrahierter und künstlich hergestellter Zähne wie die begrenzte Verfügbarkeit, die schwierige Vergleichbarkeit sowie die reduzierte Anzahl unterschiedlicher Anatomien zu umgehen (DeWald, 1997, Reymus et al., 2019), werden seit einigen Jahren Kopien menschlicher Zähne verwendet, welche in einem additiven Fertigungsverfahren mit Hilfe eines dreidimensionalen (3D) Druckers hergestellt werden (Kroger et al., 2017). Durch eine hochauflösende aber gleichzeitig kleinvolumige Aufnahme mittels dentaler digitaler Volumentomographie lassen sich Struktur- und Oberflächeninformationen extrahierter Zähne abgreifen (Reymus et al., 2019). Der 3D Druckprozess findet im Stereolithographie (SLA) Verfahren statt, bei dem sich ein photosensitiver Kunststoff am Boden eines Kunststofftanks befindet (Groth et al., 2014). Durch einen Laser werden einzelne Punkte polymerisiert und das gedruckte Volumen setzt sich präzise Punkt für Punkt zusammen. Die Reproduktion komplexer geometrischer Strukturen, auch in Form von Hohlräumen, ist dadurch realisierbar. Durch dieses Verfahren lassen sich exakte Kopien von extrahierten

Zähnen samt Pulpakammer und Wurzelkanälen herstellen, welche aufgrund der Vergleichbarkeit und unerschöpflichen Verfügbarkeit für standardisierte Versuchsverfahren Verwendung finden können (Reymus et al., 2019).

1.7 Fragestellung und Arbeitshypothese

Die durchgeführte Studie verwendet 3D gedruckte Kopien von extrahierten Zähnen verschiedener Zahntypen mit unterschiedlicher Anatomie samt Pulpakammer und Wurzelkanalsystem. In dem Versuch sollen drei bildgebende Diagnostikverfahren in Bezug auf die Größe der angelegten primären Zugangskavität miteinander verglichen werden. Dabei geht es vor allem um den Substanzabtrag im Vergleich zum Ursprungszahn, außerdem wird die Fläche der belassenen Restzahnhartsubstanz auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze mit der ursprünglichen Fläche verglichen. Zum anderen werden auftretende Trepanationsfehler wie Perforationen, die Bearbeitung des Pulpakammerbodens oder das Belassen von Resten des Pulpakammerdaches erfasst. Zweitrangig wird der Einfluss der Erfahrung des Probanden ausgewertet. Zusätzlich wird anhand eines Fragebogens die persönliche Erfahrung mit der bildgebenden Diagnostik ermittelt. Für den Vergleich zwischen konventioneller radiologischer Diagnostik und der digitalen dentalen Volumentomographie gibt es bereits eine Studie, die keinen Unterschied in Bezug auf den Zahnhartsubstanzverlust feststellen konnte (Connert et al., 2014a). Einen Vergleich des Hartsubstanzabtrages mit der neuen endodontischen Planungssoftware gibt es nicht. Die Datenerhebung der Aufbereitungsfehler findet visuell und zusätzlich mittels dentaler digitaler Volumentomographie statt. Für die Ermittlung des Hartsubstanzverlustes kommt ein Intraoralscanner zur Anwendung. Das Volumen sowie die Fläche vor und nach der Trepanationsöffnung werden dabei miteinander verglichen.

Die Arbeitshypothese lautet, dass die endodontische Planungssoftware gegenüber der dentalen digitalen Volumentomographie sowie der zweidimensionalen Bildgebung eine zuverlässigere Lokalisation der Pulpakammer sowie der Wurzelkanäle ermöglicht und somit weniger gesunde Zahnhartsubstanz geopfert werden muss. Als Nebenhypothese wird angenommen, dass die berufliche Erfahrung einen Einfluss auf den Zahnhartsubstanzabtrag hat.

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

In der durchgeführten Studie wurden an insgesamt 306 dreidimensional gedruckten Kopien von humanen Zähnen von 34 Probanden unter zu Hilfenahme von drei verschiedenen diagnostischen Bildbetrachtungsprogrammen primäre Zugangskavitäten für die Wurzelkanalbehandlung angelegt. Die Probanden wurden anhand ihrer zahnärztlichen Erfahrung in Erfahrungsstufen eingeteilt. Um Ermüdungserscheinungen vorzubeugen, wurde der Versuchsdurchgang durch eine Pause auf zwei Sitzungen aufgeteilt. Zur Vermeidung eines Lerneffektes erhielten die Probanden drei Varianten eines Frontzahnes, drei Varianten eines Prämolaren sowie drei Varianten eines Molaren. Die Prüfkörper waren für jeden Teilnehmer identisch, allerdings in einer randomisierten Reihenfolge auf die zwei Sitzungen aufgeteilt. Jeder Variante wurde eine der drei möglichen diagnostischen Bildgebungen fest zugeordnet. Es standen den Probanden folgende Computer-Programme zu Verfügung: Für die konventionelle Bildgebung mit digitalen Zahndaten (2D) das Programm JiveX DICOM Viewer (JiveX DICOM Viewer Version 5.0.2 RC04, Visus Health GmbH, Bochum, D), für die dentale digitale Volumentomographie (3D) der Ansichtsmodus des Programms Blue Sky Plan (Blue Sky Plan Version 4.5.9 (64bit), Blue Sky Bio, LLC, Libertyville, USA) und für die dreidimensionale Wurzelkanal-Planungssoftware (PS) das Programm 3D Endo™ (3D Endo™ Software Version 1.0.9, Maillefer Instruments Holding Sàrl, Ballaigues, Schweiz). Ein internetbasierter Fragebogen (unipark.com Umfragesoftware, Questback GmbH, Köln, D; Firefox Quantum 69.0 (64bit), Mozilla Corporation, Mountain View, USA) hielt das subjektive Empfinden der Probanden im Umgang mit den diagnostischen Bildgebungen während des Versuches fest (siehe Anhang 7.3.). Die Prüfkörper wurden nach der Versuchsdurchführung auf Behandlungsfehler wie Perforationen, Bearbeitung des Pulpakammerbodens und Belassen des Pulpakammerdaches untersucht. Abschließend wurde der durch das Anlegen der Zugangskavität resultierende Substanzverlust von der Okklusalfläche bis zur Schmelz-Zement-Grenze bestimmt. Zusätzlich wurde die Fläche der verbliebenen Zahnhartsubstanz ebenfalls auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze ermittelt. Im Folgenden wird der Versuchsablauf durch ein Flussdiagramm verdeutlicht (siehe Abbildung 3).

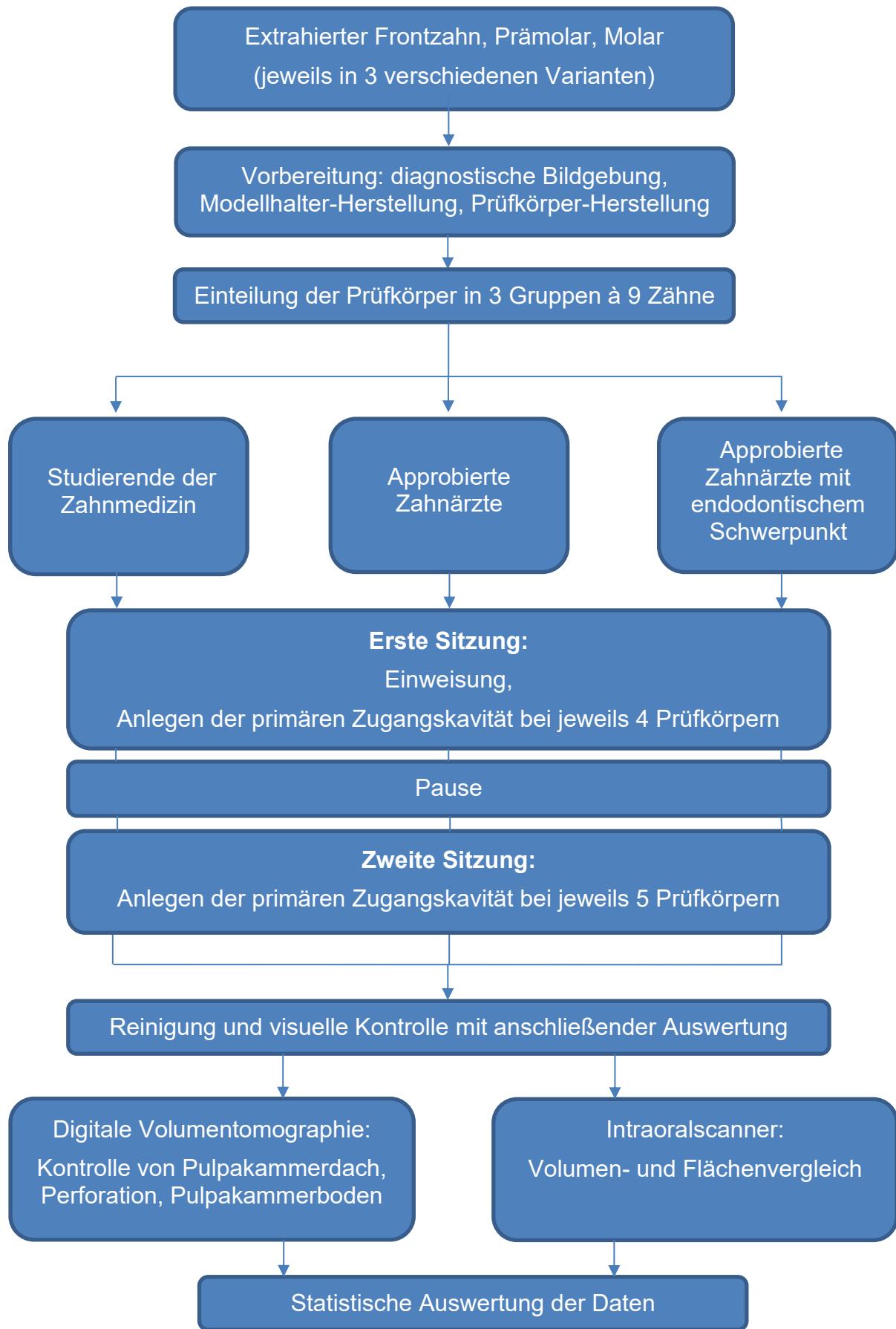


Abbildung 3: Flussdiagramm zum Versuchsablauf.

2.2 Einteilung der Probanden

Die Teilnahme der Probanden erfolgte freiwillig und unentgeltlich. 34 Probanden wurden je nach Erfahrung in unterschiedliche Erfahrungsstufen eingeteilt.

Die Voraussetzung für die Zuteilung zur Erfahrungsstufe „Studierende“ war der Besuch der ersten drei klinischen Fachsemester des Studienganges Zahnmedizin, wodurch erste Erfahrungen in der Anlegung von Zugangskavitäten an humanen Zähnen vorhanden waren (n = 12 Teilnehmer).

Eine Zuteilung zur Erfahrungsstufe „Zahnarzt“ erfolgte, wenn es sich um approbierte Zahnärzte handelte, die weniger als 80 Prozent ihrer Behandlungszeit mit endodontischen Therapien verbringen. Eine Weiterbildung auf dem Gebiet der Endodontologie war bei keinem der Probanden vorhanden (n = 12 Teilnehmer).

Die Zugehörigkeit zur Erfahrungsstufe „Spezialist“ sah approbierte Zahnärzte vor, die mehr als 80 Prozent ihrer Behandlungszeit mit endodontischen Therapien verbringen. Eine Weiterbildung im Bereich der Endodontologie war bei allen Teilnehmern vorhanden (n = 10 Teilnehmer).

Alle Probanden waren mit der Anlegung von Zugangskavitäten an menschlichen Zähnen vertraut, hatten aber keine Vorerfahrung in der Handhabung mit dreidimensional gedruckten Probekörpern. Die Verwendung eigener Lupenbrillen wurde freigestellt.

2.3 Randomisierung der Prüfkörper

Innerhalb der Erfahrungsstufe wurden die Probanden per Zufallsprinzip (www.random.org) einem der zwölf möglichen Probandenschemata zugeteilt (siehe Anhang 7.2).

Innerhalb eines Probandenschemas bearbeitete jede Versuchsperson während der beiden Sitzungen die neun unterschiedlichen Prüfkörper in zufälliger Reihenfolge (www.random.org). Die Randomisierung wurde vor Versuchsbeginn für jedes Probandenschema festgelegt.

Die Prüfkörper gehörten drei Zahngruppen des Oberkiefers an. Die Zahngruppen bestanden aus einem oberen ersten Frontzahn, einem oberen ersten Prämolaren und einem oberen ersten Molaren. Jede Zahngruppe besaß drei Zahnvarianten mit unterschiedlicher Wurzelkanalanatomie und damit verbunden wechselndem Schwierigkeitsgrad. Jede Variante wurde während des gesamten Versuchs 34-mal von den unterschiedlichen Probanden bearbeitet. In der Erfahrungsstufe „Studierende“ und „Zahnarzt“ wurden 108 Prüfkörper bearbeitet, in der Erfahrungsstufe „Spezialist“ wurden 90 Prüfkörper bearbeitet. Die drei diagnostischen Bildgebungen wurden im Probandenschema ebenfalls den jeweiligen Varianten fest zugeordnet und teilten sich gleichmäßig auf jeweils 102 Prüfkörper auf (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Aufteilung der Prüfkörper auf die Erfahrungsstufe und die diagnostische Bildgebung.

Studierende	Zahnarzt	Spezialist
12 Probanden	12 Probanden	10 Probanden
Zahngruppe - Frontzahn - Prämolar - Molar	Zahngruppe - Frontzahn - Prämolar - Molar	Zahngruppe - Frontzahn - Prämolar - Molar
Jeweils 3 Varianten	Jeweils 3 Varianten	Jeweils 3 Varianten
= 108 Prüfkörper	= 108 Prüfkörper	= 90 Prüfkörper
Insgesamt 306 Prüfkörper		
davon 102 Prüfkörper	davon 102 Prüfkörper	davon 102 Prüfkörper
Konventionelle Röntgenbildtechnik (2D)	Dentale digitale Volumentomographie (3D)	Wurzelkanal Planungssoftware (PS)

2.4 Vorbereitende Maßnahmen

2.4.1 Herstellung der Modellhalterung

Wie in Abbildung 4 erkennbar, diente eine vom Doktoranden selbst entworfene Halterung für die Verwendung von bis zu acht Zähnen an unterschiedlichen Positionen als Arbeitsgrundlage (Autodesk Fusion 360, Autodesk Direct Limited, Farnborough, UK).

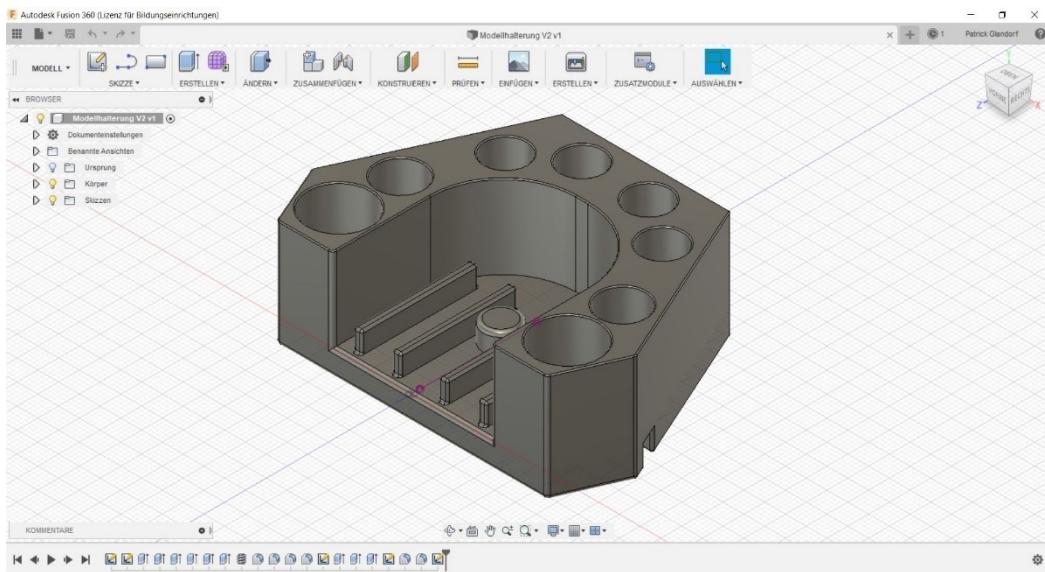


Abbildung 4: Planung der Halterung für die Phantomeinheit der studentischen Ausbildung mit künstlichen Alveolen an der Position von Frontzähnen, Prämolaren und Molaren zum Einführen von Zähnen.

Die Halterung wurde in Anlehnung an die Modellbasis des Produktes KaVo Studienmodell Basic (KaVo Studienmodelle Basic, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D), welche zu Studien- und Ausbildungszwecken in der Zahnmedizin verwendet wird, entworfen. Durch die Übereinstimmung der Abmessungen von Führungshilfen und Schraubmechanismus konnte die Halterung in den Kiefersimulator (G40, KaVo Dental GmbH, Biberbach, D) der studentischen Phantomeinheit (KaVo DSEclinical 5198, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D) eingespannt werden. Die entworfene Halterung war sowohl für den Oberkiefer als auch den Unterkiefer verwendbar und beinhaltete acht im Durchmesser unterschiedliche künstliche Alveolen an der Position von verschiedenen Zahnguppen (Front-, Eck- und Seitenzähnen), in die jeweils ein Zahn eingeführt werden konnte.

2.4.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper für diesen Versuch wurden nach der Vorlage menschlicher Zähne hergestellt. Für die Verwendung von extrahierten humanen Zähnen lag ein genehmigter Ethikantrag des Ethik-Komitees der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel vor (D444/10).

Nach der äußereren Reinigung der humanen Zähne mit einem Einmalskalpell (Fig.11 CUTFIX® Einmal-Skalpell, B.Braun Melsungen AG, Melsungen, D) wurden die Ausmaße der Pulpa durch ein digitales Röntgenbild beurteilt (Oralix AC 9869 000 00101 Gendex Division, 20 ms, 7.5 mA, 65 kV, Dentsply, Italy; Intraoralscanner Carestream RVG 6200 und CS Imaging Software 7.0.2.8 mit Filter 3: Adapted Optimized Contrast Endo, Carestream Dental LLC, Atlanta, USA).

Es wurden je Zahn drei unterschiedliche Variationen zu Grunde gelegt, wobei die Zähne grundsätzlich füllungs- und kariesfrei waren. Die eigentlichen Prüfkörper wurden basierend auf anatomischen Besonderheiten wie Obliterationen, zusätzlichen Wurzelkanälen oder einer Abweichung der Kronen-Wurzel Ausrichtung ausgewählt. Die Auswahlkriterien der Prüfkörper sind in tabellarischer Form im Anhang unter Punkt 7.1 dargestellt.

2.4.2.1 Erstellung der dreidimensionalen Oberfläche

Mit Hilfe der digitalen Volumentomographie wurde von den ausgewählten humanen Zähnen ein 5x5cm großes Volumen in Form eines exportierbaren DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) Datensatzes erzeugt (Orthopantomograph OP300 Maxio, FOV 5x5, Voxel Größe: 85µm, 8.7s, 8.0mA, 90kV, 596mGycm², CLINIVIEW™ 10.2.6.3 und OnDemand3D™ Dental Version 1.0, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D).

Der DICOM Datensatz wurde zur Erstellung der dreidimensionalen Oberfläche in das Programm InVesalius (InVesalius 3.1.1, Center for Information Technology Renato Archer, Campinas - SP, Brasilien) geladen (Amorim et al., 2015). Das Programm stellt ohne signifikanten Unterschied die Abmessungen von röntgenopaken Strukturen dar (Tolentino et al., 2018). Nach der Bestimmung der Region of interest (ROI) mit dem Anfangswert 226 Hounsfield unit (HU) und dem

Endwert 1900 HU für die Erkennung von Zahnstrukturen, erfolgte die Erzeugung der dreidimensionalen Oberfläche. Wie in Abbildung 5 ersichtlich, entstand eine exakte Kopie des jeweiligen Zahnes samt Pulpa und Wurzelkanälen im druckbaren Standard Triangulation Language (STL) Format (STL-Zahn-Kopie).

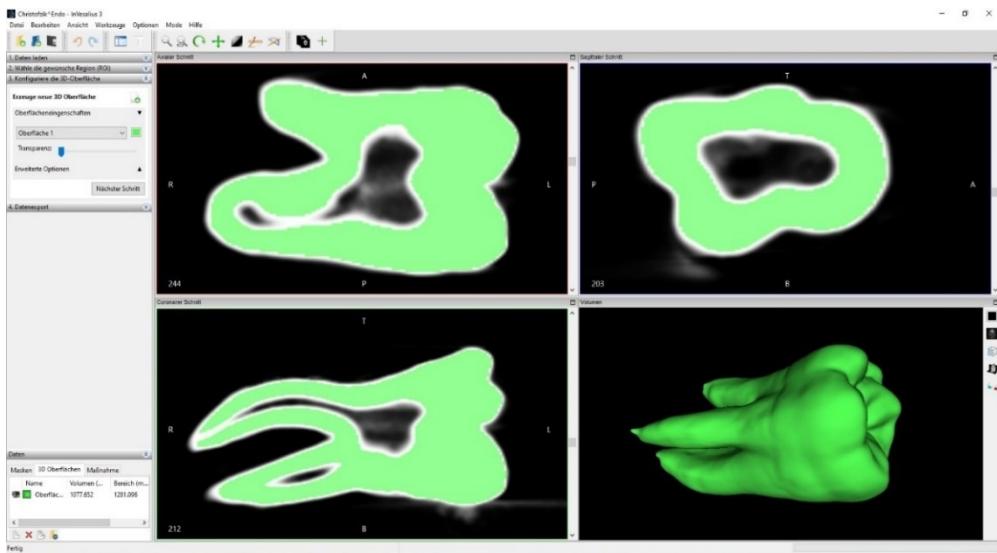


Abbildung 5: Erstellung einer dreidimensionalen Oberfläche anhand einer digitalen Volumentomographie mit InVesalius.

2.4.2.2 Röntgenaufnahmen

Die humanen Zähne wurden bis zum koronalen Anteil der Wurzeln jeweils dreimal in heißes Wachs (Modelling Wax Pinnacle Standard, Dentsply Sirona Inc., York, USA) getaucht, um einen Parodontal-Spalt im Röntgenbild zu erzeugen.

Zur weiteren Vorbereitung wurden die so angepassten Zähne mit dem A-Silikon Gammasil (gammasil® PERFECT TEC A85 Base & Katalysator, Müller-Omicron GmbH & Co.KG, Lindlar, D), welches sich im Röntgenbild knochenähnlich darstellt, zur Erstellung der Röntgenbilder in die künstlichen Alveolen des Modellhalters eingebettet. In Anlehnung an die Studie von Connert et al. wurde dabei auf eine anatomische und achsgerechte Ausrichtung geachtet (Connert et al., 2014b).

Es wurden von den eingebetteten humanen Zähnen sowohl orthoradiale Röntgenbilder als auch mesial-exzentrische Zahnenfilme bei mehrwurzeligen Zähnen, angefertigt (Oralix AC 9869 000 00101 Gendex Division, 20 ms, 7.5 mA, 65 kV, Dentsply, Italy; Intraoralscanner Carestream RVG 6200 und CS Imaging Software 7.0.2.8 mit Filter 3: Adapted Optimized Contrast Endo, Carestream Dental LLC,

Atlanta, USA). Die Zahnfilme wurden entsprechend ihrer ursprünglichen anatomischen Position im Ober- oder Unterkiefer um 180° gedreht und im Röntgenbilddateiformat RVG gespeichert.

Zur Herstellung der dentalen digitalen Volumentomographie wurden die noch eingebetteten humanen Zähne samt Halter entsprechend ihrer anatomischen Position in das Röntgengerät positioniert und ein exportierbarer DICOM Dateiensatz erstellt (Orthopantomograph OP300 Maxio, FOV 5x5, Voxel Größe: 85µm, 8.7s, 8.0mA, 90kV, 596mGycm², CLINIVIEW™10.2.6.3 und OnDemand3D™Dental Version1.0, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D). Dieser erzeugte DICOM Datensatz diente als Grundlage zur späteren Anwendung sowohl in der dreidimensionalen Diagnostiksoftware als auch im endodontischen Planungsprogramm.

2.4.2.3 Verschlüsselung der Ausrichtung der humanen Zähne

Die Stellung und Neigung der humanen Zähne waren im Röntgenbild und in der dentalen digitalen Volumentomographie sichtbar und konnten nicht mehr verändert werden. Um für alle Studienteilnehmer einheitliche Voraussetzungen zu schaffen, wurde die im Röntgenbild festgelegte Neigung und Stellung der Zähne durch einen Oberflächenscan erfasst (CEREC Omnicam, CEREC AC und CEREC SW, Version 4.6.2, Dentsply Sirona Inc., York, USA). Durch diesen Oberflächenscan konnte die Ausrichtung der humanen Zähne auf die Prüfkörper übertragen werden.

Die verwendeten humanen Zähne wurden anschließend aus dem jeweiligen Halter ausgebettet und vernichtet.

2.4.2.4 Ausrichtung der STL Zahn-Kopie an die humanen Zähne

Der Modellhalter, die STL Zahn-Kopie sowie der Oberflächenscan wurden in Beziehung zueinander gebracht. Die Lageinformation des Modellhalters diente als Ausgangswert und alle weiteren Ausrichtungen orientierten sich an dieser Grundlage.

Die detaillierte Beschreibung der vom Doktoranden selbst hergestellten Prüfkörper befindet sich im Anhang unter Punkt 7.7. Es wurde je eine Halterung für den Ober- und Unterkiefer erzeugt und mit Kopien von Front, Eck- und Seitenzähnen für den jeweiligen Quadranten bestückt.

2.4.3 Druck der dreidimensionalen Dateien

Die Halter für Ober- und Unterkiefer sowie die Prüfkörper wurden im STL-Format in das Programm PreForm (PreForm, Ver.: 3.0.1, Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA) geladen.

Die Halter wurden mit der flächigen Unterseite und die Prüfkörper mit dem apikalen Ende auf dem Druckerbett ausgerichtet. Es wurden automatisiert Stützstrukturen mit einer Dichte von 1,00mm und einer Berührungs punktgröße von 0,70mm generiert (siehe Abbildung 6).

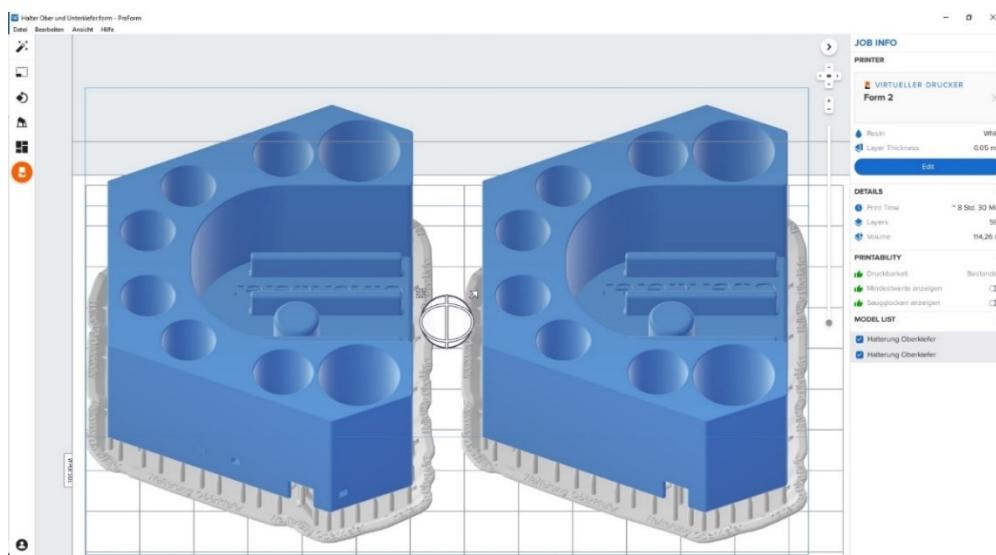


Abbildung 6: Modellhalter für Oberkiefer (links) und Unterkiefer (rechts) mit der Unterseite auf dem Druckbett samt Stützstrukturen.

Der Druck erfolgte mit weißem Standard Kunstharz (White; V4 FLGPWH04; Standardresin, Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA) mit einer Schichtstärke von 50µm am 3D-Drucker FORM 2 (FORM 2, Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA).

Nach Durchführung des Druckvorganges wurden die Ausdrucke von der Konstruktionsplattform entfernt und für eine Minute in einem Alkoholbad (2-Propanol Ph.-Eur., Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D) des Formlab Finishkits (Finishkit, Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA) von groben Rückständen des nicht polymerisierten und dadurch noch flüssigen Kunstharzes gereinigt. Danach wurden die Ausdrucke für vier Minuten in die automatische Reinigung (Form Wash,

Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA) in eine Alkohollösung gelegt (2-Propanol Ph.-Eur., Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D).

Jeder Prüfkörper wurde anschließend von Hand mit einer Kunststoffspritze (BD Discardit II, Becton Dickinson GmbH, Heidelberg, D) samt Einmalkanüle (Einmalkanüle 70mm, Interlock Medizintechnik GmbH, Lensahn, D) mit 10ml Alkohol (2-Propanol Ph.-Eur., Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D) an den Spüllöchern durchspült, welche dafür eingefügt wurden, um flüssige Kunststoffreste aus dem Inneren der Ausdrucke zu entfernen.

Es folgte die Reinigung von Haltern und Prüfkörpern für vier Minuten mit Alkohol (2-Propanol Ph.-Eur., Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken, D) im Ultraschallbad (Sonorex Super RK 102, BANDELIN electronic GmbH & Co. KG, Berlin, D). Zum Schluss erfolgte nochmals ein einminütiger Waschgang in der automatisierten Reinigung mit einer Alkohollösung.

Die Ausdrucke wurden dann im Lichthärte-Ofen (Form Cure, Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA) mit einer Wellenlänge von 405nm bei 60° Celsius für 60 Minuten platziert, wodurch die Endhärte (Formlabs, 2020) der Prüfkörper erreicht wurde.

Als letzter Schritt wurden die Stützstrukturen mit einem Filament-Cutter (Plato 170, Techspray – European office, Hoofddorp, NL) und einem Einmalskalpell (Fig.11 CUTFIX® Einmal-Skalpell, B.Braun Melsungen AG, Melsungen, D) entfernt. Der Halter und die gedruckten Prüfkörper wurden auf Einschiebbarkeit in die künstlichen Alveolen überprüft.

2.5 Kalibrierung des diamantierten Bohrers auf den Kunststoffzahn

Die Härte von Zahnhartsubstanzen wird durch Messverfahren bestimmt und ist bei Schmelz und Dentin unterschiedlich. Die Härte für Dentin wird in der Literatur mit einer Vickers Härte von 46 und für Schmelz mit einer Vickers Härte von 260 angegeben (Wongkhantee et al., 2006). Die Härte des Standard Kunstharses, welches für die Herstellung der Prüfkörper verwendet wird, beträgt 87D Shore Härte nach dem vollständigen Aushärten und ist in der Anlage unter Punkt 7.4 angegeben. Eine direkte Umrechnung der Werte ist nicht möglich, die Härte der Prüfkörper weicht allerdings von der Härte der humanen Zähne ab (Reymus et al., 2020). Es bedurfte daher einer Kalibrierung des für die Trepanation eingesetzten Diamantschleifers. Um den Abtrag des diamantierten Bohrers am Prüfkörper an den Abtrag vom diamantierten Bohrer am humanen Zahn anzugeleichen, wurde ein Vorversuch durchgeführt. Der Unterschied des Substanzabtrages fiel bei der Anwendung eines rot-gebrühten Diamantbohrers mit einer Korngröße von 46µm bei 20.000U/Min im roten Winkelstück am geringsten aus. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich im Anhang unter 7.5.

2.6 Versuchsaufbau

Jedem Versuchsteilnehmer stand eine Simulationseinheit zur Verfügung (KaVo DSEclinical 5198, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D). Die Probanden erhielten ein rotes Winkelstück (KAVO 24LN Lux2 INTRAmatic, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D) mit Wasserkühlung. Wie im Vorversuch (im Anhang unter 7.5) ermittelt, wurde für jeden Probanden als Schleifkörper ein neuer Finierdiamant in Form eines Zylinders (Referenznr.: 8837KR 314 012, Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D) sowie ein konischer, diamantiert Finierer mit unbelegter Spitze (Referenznr.: 8851 314 012, Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, D) zur Verfügung gestellt. Des Weiteren hatte jeder Proband zwei Mundspiegel (Relax 7106, E. Hannenkratt GmbH, Königsbach-Stein, D), eine zahnärztliche Pinzette (DP18, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC., Frankfurt am Main, D), eine zahnärztliche Sonde (Sonde 6XL mit rundem Griff #30, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC., Frankfurt am Main, D), eine Parodontal-Sonde (Sonde CP-15 mit Griff #30, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC., Frankfurt am Main, D), eine Hækchen-Sonde (Sonde 17 mit Griff #30, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC., Frankfurt am Main, D), einen

Micro-Opener (Micro-Opener, Dentsply Sirona Inc., York, USA) zum Ertasten von Dentinüberhängen und Kanaleingängen, eine Kunststoffspritze (BD Discardit II, Becton Dickinson GmbH, Heidelberg, D) samt Einmalkanüle (STERICAN Gr. 30/23 0,4 x 25 mm, B. Braun Melsungen AG, Melsungen, D) mit 2ml Alkohol (Alko-pharm 80, BrüggemannAlcohol Heilbronn GmbH, Heilbronn, D, 2ml), Papierspitzen der ISO Größe 25 (13973 Standard Sizes NR. 25, KerrHawe SA, Bioggio, Schweiz), einen Speichelsauger (HS-Speichelsauger weiß, abnehmbare Kappe, Henry Schein Dental Deutschland GmbH, Langen, D) sowie jeweils eine Kerr Feile der ISO Größen 08 bis 25 (14127 K-Files™ 08/21mm; 06003 K-Files™; 10/21mm; 06004 K-Files™ 15/21mm; 06005 K-Files™ 20/21mm; 06014 K-Files™ 25/21mm, alle Feilen von KerrHawe SA, Bioggio, Schweiz) im Clean Stand (Clean Stand, Dentsply Sirona Inc., York, USA) mit Schaumstoffeinsatz (Schaumstoffeinsatz Rund, Ø 50 mm, Dentsply Sirona Inc., York, USA) vorliegen.

Die Betrachtung der bildgebenden Diagnostik erfolgte an den zur Simulationseinheit dazugehörigen Computern (HP ProDesk 400 G3 DM, HP Inc., Palo Alto, USA mit 2002L, Elo Touch Solutions, Inc., Milpitas, USA). Der internetbasierte Fragebogen wurde an einem zusätzlich bereitgestellten Laptop mit dem Mozilla Firefox Browser online ausgefüllt (unipark.com Umfragesoftware, Questback GmbH, Köln, D; Firefox Quantum 69.0 (64bit), Mozilla Foundation, Mountain View, USA).

2.7 Versuchsdurchführung

Der Versuch begann mit einer standardisierten Aufklärung der Probanden über die Versuchsanforderungen. Die Pseudonymisierung der Teilnehmer erfolgte durch die Zuteilung einer Identifikationsnummer (Studien-ID).

Im Anschluss erhielten die Teilnehmer eine circa 10-minütige standardisierte Einweisung zur praktischen Anwendung der für den Versuch relevanten Röntgenbetrachtungsprogramme (2D, 3D und PS). Ein gedrucktes Exemplar dieser Einweisungsunterlagen lag während der gesamten Versuchsdurchführung zur Einsicht aus.

Der erste Versuchsteil startete mit dem exemplarisch im Anhang unter 7.3 ersichtlichen Online Fragebogen, in dem individuelle Parameter des jeweiligen

Probanden (Geschlecht, Luppenbrillenverwendung, Winkelstück Händigkeit, Selbsteinschätzung der Erfahrungsgruppe, zahnärztliche berufliche Erfahrung und endodontische berufliche Erfahrung) abgefragt wurden. Die Probanden wechselten vom Fragebogen an die Simulationseinheit. Ohne Zeitvorgabe wurde den Studienteilnehmern die Möglichkeit eingeräumt, die jeweilige diagnostische Bildgebung zu analysieren. Im Anschluss wurde die primäre Zugangskavität im eigenen Ermessen angelegt. Nach der Trepanation erfolgte keine weitere Bearbeitung der Wurzelkanäle. Zum Abschluss des Prüfkörperdurchgangs wechselten die Probanden zurück an den Online-Fragebogen und bewerteten direkt im Anschluss die jeweilige Betrachtungsmöglichkeit anhand von Schulnoten mit einem Schieberegler (1 – sehr gut, 2 – gut, 3 – befriedigend, 4 – ausreichend, 5 – mangelhaft, 6 – schlecht). In der zweiten Frage wurde über eine Einfachauswahl (Ja – Nein Fragenbox) erfasst, ob alle Wurzelkanaleingänge aufgefunden werden konnten. Nach vier Durchgängen mit unterschiedlichen Prüfkörpern endete der erste Versuchsteil.

Der zweite Versuchsteil begann nach einer Pause. Die Probanden starteten erneut mit dem Online-Fragebogen und führten weitere fünf Durchgänge mit unterschiedlichen Prüfkörpern durch.

Zum Abschluss des Versuches bewerteten die Probanden die diagnostische Bildgebung hinsichtlich der gefühlten Sicherheit beim Anlegen der Zugangskavität, der Handhabung in der Anwendung sowie der Schnelligkeit in der Anwendung auf einer Skala von 1 – 3 (1 – 1. Platz, 2 – 2. Platz, 3. – 3. Platz). Jede Zahl konnte nur einmal vergeben werden.

2.8 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte verblindet durch den Doktoranden mittels pseudonymisierter Prüfkörper, welche durch die zugeteilte Identifikationsnummer gekennzeichnet waren.

2.8.1 Ermittlung von Trepanationsfehlern

Eine visuelle Kontrolle der trepanierten Prüfkörper bezüglich Perforationen unabhängig von deren Lokalisation, einer Bearbeitung des Pulpakammerbodens sowie auf den kompletten Abtrag des Pulpakammerdaches wurde mit einer Lupenbrille (HDL™ 2,5 MICRO mit Brillenfassung Victory™, Sigma Dental Optics GmbH, Handewitt, D) unter Zuhilfenahme eines Micro-Openers und einer zahnärztlichen Pinzette durchgeführt. Zusätzlich wurde von den Prüfkörpern eine dentale digitale Volumentomographie angefertigt und im DICOM Datensatz gespeichert. Die Daten der digitalen Volumentomographie im DICOM Format wurden im Ansichtsmodus in der MPR Betrachtung des Programms Blue Sky Plan (Blue Sky Plan Version 4.5.9 (64bit), Blue Sky Bio, LLC, Libertyville, USA) ausgewertet und dienten zur Überprüfung der visuellen Kontrolle auf Perforationen (siehe Abbildung 7), dem kompletten Abtrag des Pulpakammerdaches und der Bearbeitung des Pulpakammerbodens.

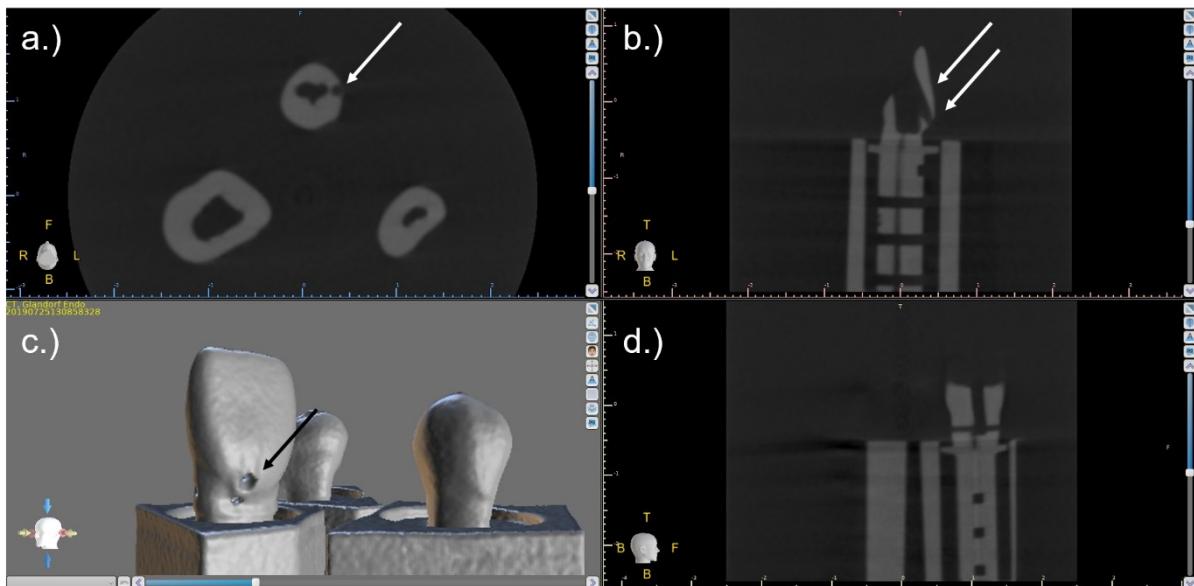


Abbildung 7: Ansicht einer Frontzahn-Perforation in koronaler (a.), sagittaler (b.) und axialer (d.) Projektion der dentalen digitalen Volumentomographie samt Volumendarstellung (c.).

2.8.2 *Oberflächenscan*

Für die Erstellung der Oberflächenscans kam der Primescan Intraoralscanner (CEREC Primescan, CEREC AC und CEREC SW, Version 5.0.2, Dentsply Sirona Inc., York, USA) zur Anwendung. Dafür wurde jeder Prüfkörper in eine eigens gedruckte Halterung eingesteckt. Wie in Abbildung 8 zu erkennen, wurde der Oberflächenscan angefertigt und ohne Qualitätsverlust im STL Format abgespeichert.

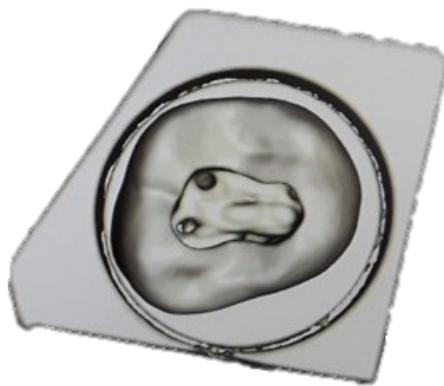


Abbildung 8: Screenshot aus CEREC AC und CEREC Primescan Intraoralscanner von Dentsply Sirona mit dem Scan eines Prüfkörpers.

2.8.3 *Ausrichtung mit GOM Inspect*

Die einheitliche Ausrichtung aller Prüfkörper erfolgte computergestützt mit dem Analyse Programm GOM Inspect (GOM Software 2019, GOM GmbH, Braunschweig, D). Zur Ausrichtung mussten Soll- und Ist-Element vorgegeben werden. Als Soll-Element für den jeweiligen Prüfkörper diente die zu Beginn des Versuchs erstellte STL-Zahn-Kopie (siehe 2.4.2.1). Das Ist-Element war der jeweilige Oberflächenscan (siehe 2.8.2). Nach einer initialen Vorausrichtung durch eine manuelle 3-Punkt-Ausrichtung, fand die Hauptausrichtung durch ein computerberechnetes lokales Best-Fit über dem Soll-Element statt (siehe Abbildung 9). Der maximale Abstand zwischen den Bauteilen war mit 0.100mm voreingestellt. Beim lokalen Best-Fit minimiert der Algorithmus der Software die Abweichung zwischen dem Ist-Element und dem Soll-Element. Der so ausgerichtete Prüfkörper wurde im STL Format gesichert.

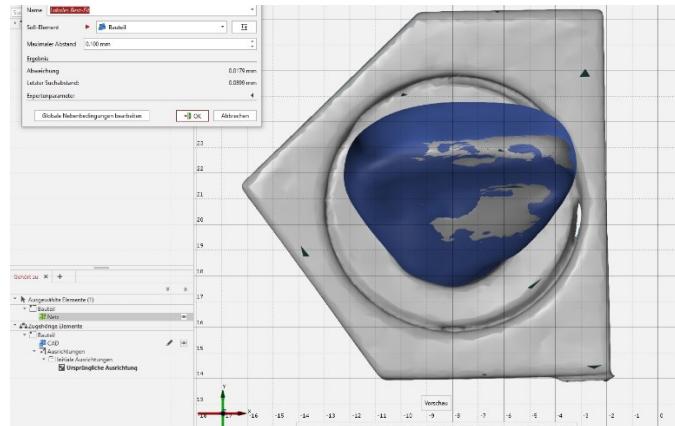


Abbildung 9: Darstellung der Überlagerung des Prüfkörpers und der Ausgangsdatei mit Hilfe des Programms GOM Inspect (GOM Software 2019, GOM GmbH, Braunschweig, D).

Überflüssige Anteile unterhalb der Spüllöcher wurden mit dem Programm Autodesk® Meshmixer™ (Autodesk® Meshmixer™, Version 3.6.747, Autodesk Direct Limited, Farnborough, UK) und durch die Programmefunktion „Edit-Planecut“ entfernt und die veränderte Datei wiederum im STL Format gespeichert.

2.8.4 ***Volumenmessung und Berechnung***

Die ausgerichteten und auf die relevanten Anteile zurecht geschnittenen Prüfkörper wurden zur Volumenmessung in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 (Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2, 64-bit Edition, Build: 1932, Release: 2019.2, Autodesk Direct Limited, Farnborough, UK) geladen. Um die Volumina der Prüfkörper vergleichen zu können, wurde ein einheitlicher Schnitt auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze mit Hilfe der Schnitt-Funktion des Programms durchgeführt. Die Volumina der Prüfkörper sowie einer intakten Referenz konnten direkt abgelesen werden. Das Volumen steht in Korrelation zu dem entsprechenden Substanzverlust der Prüfkörper. Das Volumen, welches für die Anfertigung der primären Zugangskavität entfernt wurde, wird wie folgt berechnet:

$$V_{\text{Intakte Referenz}} - V_{\text{Prüfkörper}} = V_{\text{Zugangskavität}}$$

2.8.5 ***Flächenbestimmung der Restzahnhartsubstanz***

Mithilfe des Programms Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 wurde zusätzlich die Fläche der jeweiligen Schnittebene untersucht. Mit einem einzustellenden

Grenzwinkel von 15° wurde die Unterseiten-Schnittfläche, welche der Fläche auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze entspricht, ermittelt.

2.9 Statistische Auswertung

Im Rahmen der Datenauswertung wurden Perforationen, die Bearbeitung des Pulpakammerbodens, das Belassen des Pulpakammerdaches, das entfernte Volumen sowie die verbliebene Fläche auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze untersucht und statistisch mit Hilfe von GraphPad Prism analysiert (GraphPad Prism Version 9.0.2 für Windows, GraphPad Software, San Diego, USA).

2.9.1 Powerberechnung

Mit der Powerberechnung wird die Wahrscheinlichkeit, einen echten Effekt zu entdecken, festgelegt. Die Berechnung wurde mit einer Fallzahl von $n = 34 \times 9 = 306$ behandelten Zähnen mit der Software G*Power (G*Power Version 3.1.9.2, Franz Faul, Universität Kiel, D) durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0.05$ festgelegt (Faul et al., 2007, Faul et al., 2009). Die Effektstärke wurde für einen mittleren Effekt mit $f = 0.25$ und für einen geringen Effekt mit $f = 0.10$ festgelegt (Cohen, 1977). Bei mittlerer Effektstärke beträgt die Power für einen Haupteffekt: 0.926 und bei geringer Effektstärke beträgt die Power für einen Haupteffekt: 0,341.

2.9.2 Trepanationsfehler

Es wurde zwischen Vorliegen (= 1) und Nicht-Vorliegen (= 0) unterschieden. Die statistische Auswertung der Abweichung erfolgte durch GraphPad Prism. Eine statistische Signifikanz lag bei $p < 0,05$ vor. In Bezug auf die Zahnguppe (Frontzahn, Prämolar, Molar), die Erfahrungsstufe (Studierende, Zahnarzt, Spezialist) und die diagnostische Bildgebung (2D, 3D und PS) wurde eine Varianzanalyse durchgeführt (ANOVA One-Way). Durch einen multiplen Vergleichstest (Kruskal-Wallis Test) wurden signifikante Unterschiede zwischen den drei Zahnguppen, den Erfahrungsstufen und den diagnostischen Bildgebungen angezeigt. Das Vorkommen von Trepanationsfehlern wurde grafisch als Balken-Diagramm dargestellt.

2.9.3 Bestimmung des Volumens und der verbliebenen Fläche der Restzahnhartsubstanz

Die Software GraphPad Prism wurde zudem für die statistischen Analysen des Trepanationsvolumens und der verbliebenen Fläche der Restzahnhartsubstanz verwendet. Alle Tests wurden zweiseitig durchgeführt und ein Signifikanzniveau von 0,05 gewählt. Interessante Einflussfaktoren waren die diagnostische Bildgebung (2D, 3D und PS), das Erfahrungs niveau der Probanden (Studierende, Zahnarzt, Spezialist) und die Zahnguppe (Frontzahn, Prämolar, Molar). In Bezug auf die Zahnguppe, die Erfahrungsstufe und die diagnostische Bildgebung erfolgte eine Varianzanalyse (ANOVA One-Way). Zur Ermittlung signifikanter Unterschiede wurde ein multipler Vergleichstest (Kruskal-Wallis Test) in den drei Zahnguppen, den Erfahrungsstufen sowie der diagnostischen Bildgebung durchgeführt. Die grafische Darstellung erfolgte mit Hilfe von Balken-Diagrammen.

2.9.4 Fragebogenauswertung

Die subjektive Beurteilung der diagnostischen Bildgebung wurde mit Hilfe eines internetbasierten Fragebogens durch die Probanden durchgeführt. Die Untersuchung auf Signifikanz erfolgte ebenfalls durch das Programm GraphPad Prism. Eine ANOVA One way Analyse wurde mit folgenden Variablen durchgeführt: Hilfestellung durch die diagnostische Bildgebung, die Sicherheit im Anlegen der Zugangskavität, die Handhabung im Umgang mit der diagnostischen Bildgebung sowie die Schnelligkeit im Umgang mit der Bildgebung.

Signifikante Unterschiede zwischen den drei Zahnguppen, den Erfahrungsstufen und den diagnostischen Bildgebungen wurden durch einen multiplen Vergleichstest (Kruskal-Wallis Test) angezeigt. Die Auswertung wurde grafisch als Balken-Diagramm dargestellt.

3 Ergebnisse

3.1 Fehler während des Anlegens der primären Zugangskavität

Während des Anlegens der primären Zugangskavität wurden bei 20 Prüfkörpern eine iatrogene Perforation auf der Suche nach dem Kanalsystem, bei 42 Prüfkörpern eine Bearbeitung des Pulpakammerbodens sowie bei 132 Prüfkörpern das Belassen von Resten des Pulpakammerdaches als Trepanationsfehler gewertet. Eine detaillierte Übersicht über die Anzahl sowie die Häufigkeit von Trepanationsfehlern (angegeben in Prozent) zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht über die Anzahl und das Auftreten (in Prozent) der Trepanationsfehler in Bezug zur Zahnguppe, zur Erfahrungsstufe und zur diagnostischen Bildgebung.

Zahnguppe				
	Anzahl	Perforation	Bearbeitung Pulpakammerboden	Belassen Pulpakammerdach
Frontzahn	102	3/102 (2,94%)	4/102 (3,92%)	20/102 (19,61%)
Prämolar	102	14/102 (13,73%)	1/102 (0,98%)	28/102 (27,45%)
Molar	102	3/102 (2,94%)	37/102 (36,27%)	84/102 (82,35%)
Total	306	20/306 (6,53%)	42/306 (13,73%)	132/306 (43,14%)
Erfahrungsstufe				
	Anzahl	Perforation	Bearbeitung Pulpakammerboden	Belassen Pulpakammerdach
Studierende	108	10/108 (9,26%)	16/108 (14,81%)	43/108 (39,81%)
Zahnarzt	108	8/108 (7,41%)	18/108 (16,67%)	53/108 (49,07%)
Spezialist	90	2/90 (2,22%)	8/90 (8,89%)	36/90 (40,00%)
Total	306	20/306 (6,53%)	42/306 (13,73%)	132/306 (43,14%)
Bildgebung				
	Anzahl	Perforation	Bearbeitung Pulpakammerboden	Belassen Pulpakammerdach
2D	102	7/102 (6,86%)	16/102 (15,69%)	42/102 (41,18%)
3D	102	3/102 (2,94%)	12/102 (11,76%)	43/102 (42,16%)
PS	102	10/102 (9,80%)	14/102 (13,73%)	47/102 (46,08%)
Total	306	20/306 (6,53%)	42/306 (13,73%)	132/306 (43,14%)

3.1.1 *Perforation*

3.1.1.1 *Perforation in Bezug zur Zahngruppe*

Die Auswertung mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests zeigte eine signifikant höhere Häufigkeit einer Perforation bei Prämolaren im Vergleich mit Frontzähnen (13,73% vs. 2,94%; $p=0,0056$) und auch im Vergleich mit Molaren (13,73% vs. 2,94%; $p=0,0056$). Zwischen Frontzähnen und Molaren lag kein signifikanter Unterschied vor (2,94% vs. 2,94%; $p>0,9999$; siehe Diagramm 1a).

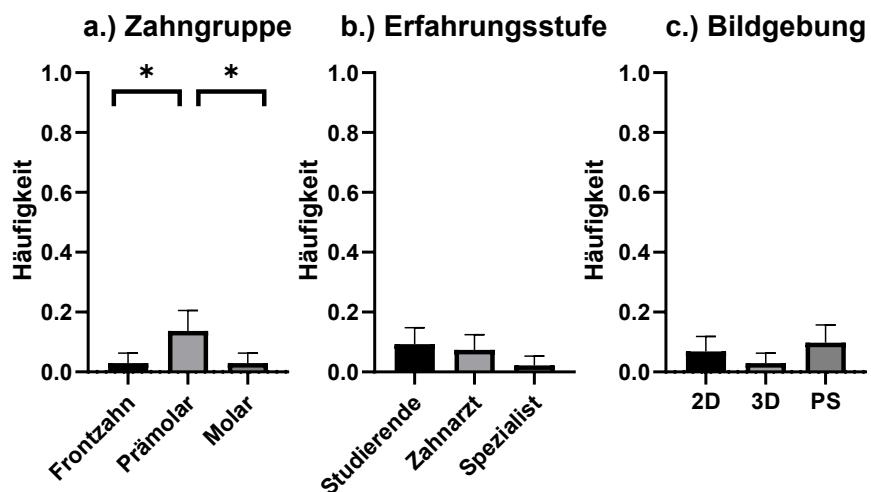


Diagramm 1: Häufigkeit einer Perforation in Bezug zur behandelten Zahngruppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich.

3.1.1.2 *Perforation in Bezug zur Erfahrungsstufe*

Die Auswertung der Häufigkeit einer Perforation in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen Studierenden und Zahnärzten (9,26% vs. 7,41%; $p>0,9999$), zwischen Zahnärzten und Spezialisten (7,41% vs. 2,22%; $p=0,4267$) und zwischen Studierenden und Spezialisten (9,26% vs. 2,22%; $p=0,1392$; siehe Diagramm 1b).

3.1.1.3 *Perforation in Bezug zur diagnostischen Bildgebung*

Die Auswertung der Häufigkeit einer Perforation in Bezug zur diagnostischen Bildgebung zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen der

konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D: 6,86% vs. 3D: 2,94%; $p=0,7739$), noch zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D: 6,86% vs. PS: 9,80%; $p>0,9999$) und auch nicht zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (2D: 2,94% vs. PS: 9,80; $p=0,1432$; siehe Diagramm 1c).

3.1.2 Bearbeitung des Pulpakammerbodens

3.1.2.1 Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur Zahngruppe

Die Auswertung der Häufigkeit der Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur Zahngruppe mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen Frontzähnen und Prämolaren (3,92% vs. 0,98%; $p>0,9999$), wohingegen ein hoch signifikanter Unterschied sowohl zwischen Prämolaren und Molaren (0,98% vs. 36,27%; $p<0,0001$) als auch zwischen Frontzähnen und Molaren vorlag (3,92% vs. 36,27%; $p<0,0001$; siehe Diagramm 2a).

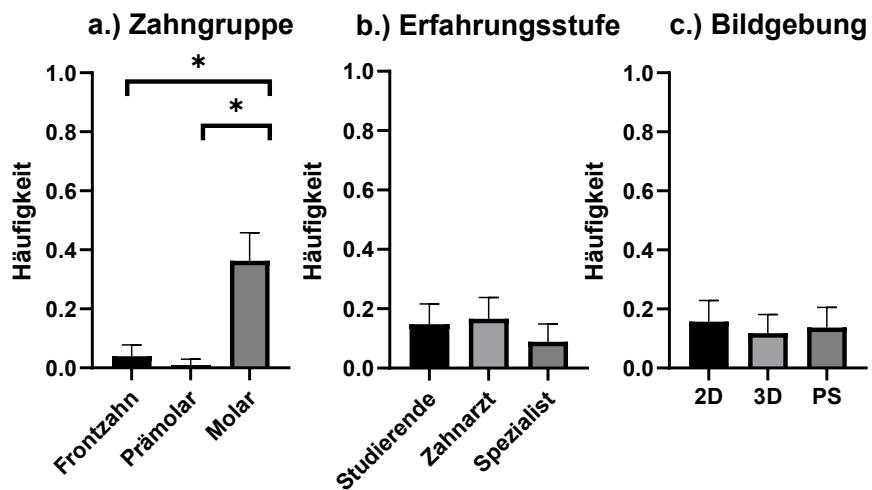


Diagramm 2: Häufigkeit der Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur behandelten Zahngruppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich.

3.1.2.2 Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur Erfahrungsstufe

Die Auswertung der Häufigkeit der Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen

den Studierenden und Zahnärzten (14,81% vs. 16,67%; $p>0,9999$), noch zwischen Zahnärzten und Spezialisten (16,67% vs. 8,89%; $p=0,3416$) und auch nicht zwischen Studierenden und Spezialisten (14,81% vs. 8,89%; $p=0,6851$; siehe Diagramm 2b).

3.1.2.3 Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur diagnostischen Bildgebung

Die Auswertung der Häufigkeit der Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur diagnostischen Bildgebung zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D: 15,69% vs. 3D: 11,76%; $p>0,9999$) noch zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D: 15,69% vs. PS: 13,73%; $p>0,9999$) und auch nicht zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D: 11,76% vs. PS: 13,73%; $p>0,9999$; siehe Diagramm 2c).

3.1.3 Belassen des Pulpakammerdaches

3.1.3.1 Belassen des Pulpakammerdaches in Bezug zur Zahngruppe

Die Auswertung der Häufigkeit des Belassens des Pulpakammerdaches in Bezug zur Zahngruppe mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen Frontzähnen und Prämolaren (19,61% vs. 27,45%; $p=0,7766$), wohingegen sowohl zwischen Prämolaren und Molaren (27,45% vs. 82,35%; $p<0,0001$) als auch zwischen Frontzähnen und Molaren (19,61% vs. 82,35%; $p<0,0001$) ein hoch signifikanter Unterschied vorlag (siehe Diagramm 3a).

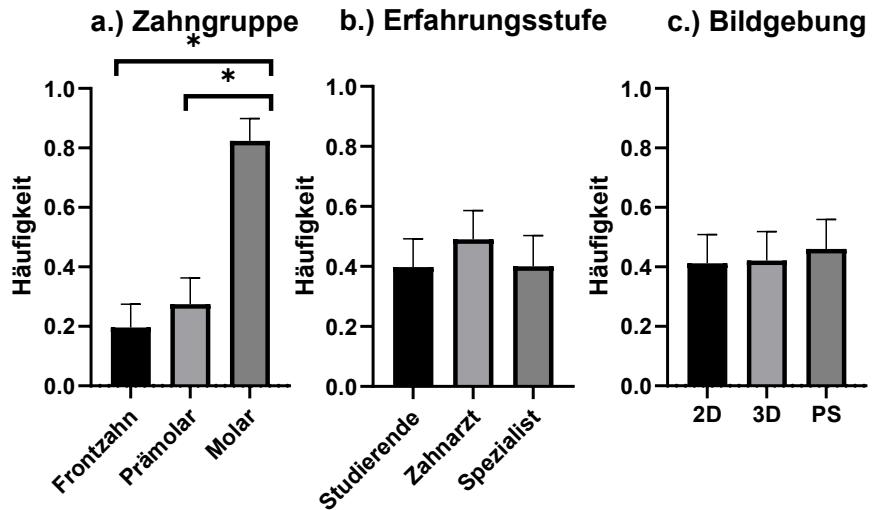


Diagramm 3: Häufigkeit des Belassens des Pulpakammerdaches in Bezug zur behandelten Zahnguppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich.

3.1.3.2 Belassen des Pulpakammerdaches in Bezug zur Erfahrungsstufe

Die Auswertung der Häufigkeit des Belassens des Pulpakammerdaches in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen den Studierenden und Zahnärzten (39,81% vs. 49,07%; $p=0,5106$), noch zwischen Zahnärzten und Spezialisten (49,07% vs. 40,00%; $p=0,600$) und auch nicht zwischen Studierenden und Spezialisten (39,81% vs. 40,00%; $p>0,9999$; siehe Diagramm 3b).

3.1.3.3 Belassen des Pulpakammerdaches in Bezug zur diagnostischen Bildgebung

Die Auswertung der Häufigkeit des Belassen des Pulpakammerdaches in Bezug zur diagnostischen Bildgebung zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D: 41,18% vs. 3D: 42,16%; $p>0,9999$), noch zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D: 41,18%PS vs. 46,08%; $p>0,9999$) und auch nicht zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D: 42,16% vs. 46,08%; $p>0,9999$; siehe Diagramm 3c).

3.2 Volumenmessung

3.2.1 Entferntes Volumen in Bezug zur diagnostischen Bildgebung

Die Auswertung des entfernten Volumens in Bezug zur diagnostischen Bildgebung mit Hilfe der Mixed-Effects-Analyse zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D MW: $49,32 \pm 36,08 \text{ mm}^3$ vs. 3D MW: $46,59 \pm 34,96 \text{ mm}^3$; $p=0,3610$), noch zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D MW: $49,32 \pm 36,08 \text{ mm}^3$ vs. PS MW: $46,73 \pm 33,13 \text{ mm}^3$; $p=0,3761$) und auch nicht zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D MW: $46,59 \pm 34,96$ vs. PS MW: $46,73 \pm 33,13 \text{ mm}^3$; $p=0,9402$; siehe Tabelle 3 und Diagramm 4a).

Tabelle 3: Deskriptive Statistik des entfernten Volumens [in mm^3] in Bezug zur diagnostischen Bildgebung.

Statistik	2D	3D	PS
Minimum [mm^3]	5,00	8,00	10,00
Median [mm^3]	33,00	24,00	23,00
Maximum [mm^3]	135,00	187,00	155,00
Mittelwert [mm^3]	49,32	46,59	46,73
Std. Abweichung [mm^3]	36,08	34,96	33,13

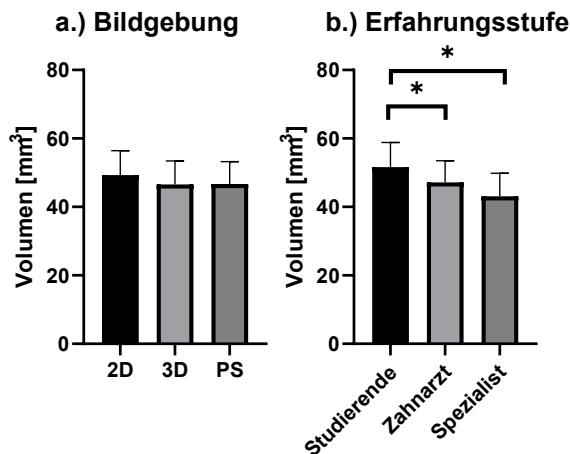


Diagramm 4: Entferntes Volumen [in mm^3] in Bezug zur Bildgebung (a.) und zur Erfahrungsstufe (b.); (*) = signifikant unterschiedlich.

3.2.2 Entferntes Volumen in Bezug zur Erfahrungsstufe

Die Auswertung des entfernten Volumens in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler mit Hilfe der Mixed-Effects-Analyse zeigte einen signifikant unterschiedlichen Volumenabtrag zwischen Studierenden und Zahnärzten (MW: $51,61 \pm 37,71 \text{ mm}^3$ vs. MW: $47,19 \pm 33,21 \text{ mm}^3$; $p=0,0423$), wohingegen das entfernte Volumen zwischen Zahnärzten und Spezialisten (MW: $47,19 \pm 33,21 \text{ mm}^3$ vs. MW: $43,09 \pm 32,23 \text{ mm}^3$; $p=0,0685$) nicht signifikant unterschiedlich war. Zwischen Studierenden und Spezialisten (MW: $51,61 \pm 37,71 \text{ mm}^3$ vs. MW: $43,09 \pm 32,23 \text{ mm}^3$; $p=0,0003$) lag wiederum ein signifikanter Unterschied vor (siehe Tabelle 4 und Diagramm 4b).

Tabelle 4: Deskriptive Statistik des entfernten Volumens [in mm^3] in Bezug zur Erfahrungsstufe.

Statistik	Studierende	Zahnarzt	Spezialist
Minimum [mm³]	8,00	5,00	5,00
Median [mm³]	35,00	31,50	27,50
Maximum [mm³]	187,00	132,00	135,00
Mittelwert [mm³]	51,61	47,19	43,09
Std. Abweichung [mm³]	37,71	33,21	32,23

3.3 Fläche der Restzahnhartsubstanz

3.3.1 Fläche auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur diagnostischen Bildgebung

Die Auswertung der verbliebenen Fläche der Restzahnhartsubstanz in Bezug zur diagnostischen Bildgebung mit Hilfe der Mixed-Effects-Analyse zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D MW: $39,31 \pm 15,48 \text{ mm}^2$ vs. 3D MW: $39,78 \pm 15,77 \text{ mm}^2$; $p=0,1986$) noch zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D MW: $39,31 \pm 15,48 \text{ mm}^2$ vs. PS MW: $39,79 \pm 16,09 \text{ mm}^2$; $p=0,2265$) und auch nicht zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D MW: $39,78 \pm 15,77 \text{ mm}^2$ vs. PS MW: $39,79 \pm 16,09 \text{ mm}^2$; $p=0,9726$; siehe Tabelle 5 und Diagramm 5a).

Tabelle 5: Deskriptive Statistik der Fläche [in mm²] auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur diagnostischen Bildgebung.

Statistik	2D	3D	PS
Minimum [mm²]	20,30	20,50	18,80
Median [mm²]	33,20	34,45	33,70
Maximum [mm²]	68,70	71,70	69,70
Mittelwert [mm²]	39,31	39,78	39,79
Std. Abweichung [mm²]	15,48	15,77	16,09

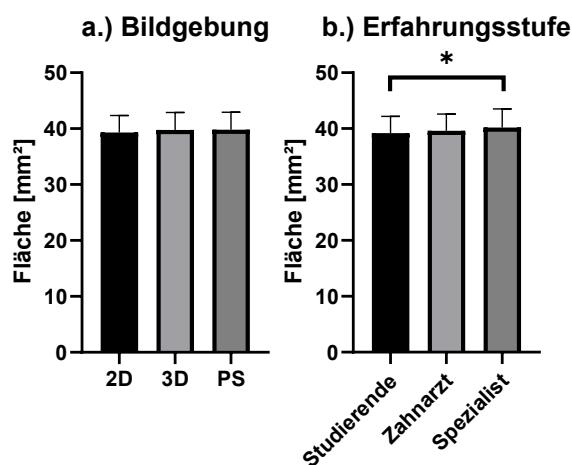


Diagramm 5: Verbliebene Fläche [in mm²] auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze- in Bezug zur Bildgebung (a.) und zur Erfahrungsstufe (b.); (*) = signifikant unterschiedlich.

3.3.2 Fläche auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur Erfahrungsstufe

Die Auswertung der verbliebenen Fläche in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler mit Hilfe der Mixed-Effects-Analyse zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen Studierenden und Zahnärzten (MW $39,19 \pm 15,72 \text{ mm}^2$ vs. MW $39,60 \pm 15,72 \text{ mm}^2$; $p=0,1281$) noch zwischen Zahnärzten und Spezialisten (MW: $39,60 \pm 15,72 \text{ mm}^2$ vs. MW $40,19 \pm 15,92 \text{ mm}^2$; $p=0,1144$). Zwischen Studierenden und Spezialisten (MW: $39,19 \pm 15,72 \text{ mm}^2$ vs. $40,19 \pm 15,92 \text{ mm}^2$; $p=0,0032$) lag wiederum ein signifikanter Unterschied vor (siehe Tabelle 6 und Diagramm 5b).

Tabelle 6: Deskriptive Statistik der verbliebenen Fläche [in mm²] auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze in Bezug zur Erfahrungsstufe.

Statistik	Studierende	Zahnarzt	Spezialist
Minimum [mm²]	20,30	18,80	21,30
Median [mm²]	33,50	33,15	34,05
Maximum [mm²]	69,70	68,90	71,70
Mittelwert [mm²]	39,19	39,60	40,19
Std. Abweichung [mm²]	15,72	15,72	15,92

3.4 Fragebogenauswertung

Der Fragebogen wurde in digitaler Form erfasst, die Daten lagen pseudonymisiert vor. Vor der Versuchsdurchführung wurden von 34 Probanden allgemeine Parameter erhoben, diese sind detailliert in Tabelle 7 ersichtlich:

Tabelle 7: Detaillierte Darstellung der in den Fragebögen erfassten Parameter von 34 Probanden vor der Versuchsdurchführung.

Variable	Anzahl	Prozent
Geschlecht (n=34)		
weiblich	20	58,82%
männlich	14	41,18%
divers	0	0,00%
Verwendung Luppenbrille (n=34)		
Ja	30	88,24%
Nein	4	11,76%
Händigkeit (n=34)		
Rechts	29	85,29%
Links	5	14,71%
Beidseits	0	0,00%
Gruppenzugehörigkeit (n=34)		
Studierende	12	35,29%
Zahnarzt/Zahnärztin	12	35,29%
Zahnarzt/Zahnärztin mit endodontischem Schwerpunkt	10	29,41%
Berufliche Erfahrung (n=34)		
Keine	13	38,24%
< 1 Jahr	4	11,76%
1 Jahr	1	2,94%
2 Jahre	2	5,88%
2 – 5 Jahre	4	11,76%
> 5 Jahre	10	29,41%
Wurzelkanalbehandlungen pro Woche (n=34)		
Keine	10	29,41%
< 1 Behandlung	10	29,41%
1 Behandlung	2	5,88%
bis zu 5 Behandlungen	3	8,82%
> 5 Behandlungen	9	26,47%

3.4.1 *Subjektive Sofort-Bewertung der diagnostischen Bildgebung*

Die Auswertung der diagnostischen Bildgebung mit einer Schulnoten-Bewertung direkt im Anschluss an die jeweilige Trepanation der Prüfkörper mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests zeigte eine signifikant schlechtere Bewertung der konventionellen Röntgenbildtechnik sowohl im Vergleich mit der dentalen digitalen Volumentomographie (2D MW: $3,40 \pm 1,30$ vs. 3D MW: $1,91 \pm 0,85$; $p < 0,0001$) als auch gegenüber der endodontischen Planungssoftware (2D MW: $3,40 \pm 1,30$ vs. PS MW: $2,04 \pm 1,08$; $p < 0,0001$). Zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D MW: $1,91 \pm 0,85$ vs. PS MW: $2,04 \pm 1,08$; $p > 0,9999$) lag kein signifikanter Unterschied in der Bewertung vor (siehe Diagramm 6).

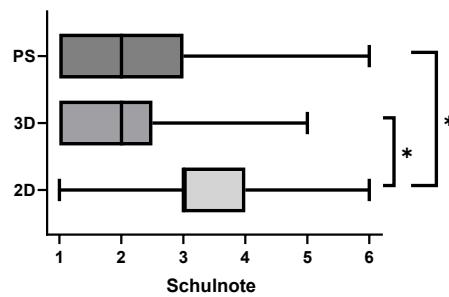


Diagramm 6: Bewertung der diagnostischen Bildgebung direkt im Anschluss an die Trepanation der Prüfkörper; (*) = signifikant unterschiedlich.

3.4.2 *Platzierung hinsichtlich der Sicherheit beim Anlegen der Zugangskavität*

Die Auswertung der Platzierung zum Abschluss des Versuches hinsichtlich der Sicherheit durch die diagnostische Bildgebung beim Anlegen der Zugangskavität mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests zeigte einen hoch signifikanten Unterschied zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D MW: $2,94 \pm 0,24$ vs. 3D MW: $1,50 \pm 0,50$; $p < 0,0001$) sowie zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D MW: $2,94 \pm 0,24$ vs. PS MW: $1,56 \pm 0,60$; $p < 0,0001$). Zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D MW: $1,50 \pm 0,50$ vs. PS MW: $1,56 \pm 0,60$; $p > 0,9999$) lag kein signifikanter Unterschied vor (siehe Diagramm 7a)

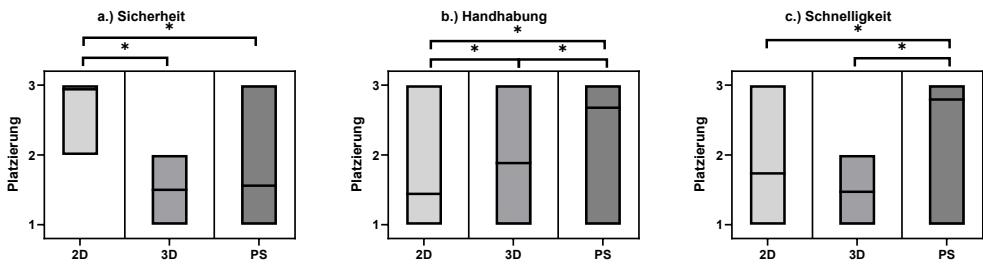


Diagramm 7: Platzierung der diagnostischen Bildgebung hinsichtlich der Sicherheit beim Anlegen der Zugangskavität (a.), der Handhabung (b.) und in der Schnelligkeit (c.) im Umgang mit der Bildgebung; (*) = signifikant unterschiedlich.

3.4.3 Platzierung hinsichtlich der Handhabung der diagnostischen Bildgebung

Die Auswertung der Platzierung zum Abschluss des Versuches hinsichtlich der Handhabung im Umgang mit der diagnostischen Bildgebung zeigte sowohl ein signifikant besseres Abschneiden der konventionellen Röntgenbildtechnik im Vergleich mit der dentalen digitalen Volumentomographie (2D MW: $1,44 \pm 0,70$ vs. 3D MW: $1,88 \pm 0,63$; $p < 0,0004$) als auch im Vergleich mit der endodontischen Planungssoftware (2D MW: $1,44 \pm 0,70$ vs. PS MW: $2,68 \pm 0,58$; $p < 0,0001$). Die Handhabung der dentalen digitalen Volumentomographie wurde zudem im Vergleich mit der endodontischen Planungssoftware als signifikant besser bewertet (3D MW: $1,88 \pm 0,63$ vs. PS MW: $2,68 \pm 0,58$; $p < 0,0001$; siehe Diagramm 7b).

3.4.4 Platzierung hinsichtlich der Schnelligkeit im Umgang mit der diagnostischen Bildgebung

Die Auswertung der Platzierung zum Abschluss des Versuches hinsichtlich der Schnelligkeit im Umgang mit der diagnostischen Bildgebung mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D MW: $1,74 \pm 0,74$ vs. 3D MW: $1,47 \pm 0,50$; $p = 0,0624$), jedoch einen hoch signifikanten Unterschied sowohl zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D MW: $1,74 \pm 0,74$ vs. PS MW: $2,79 \pm 0,47$; $p < 0,0001$) als auch zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D MW: $1,47 \pm 0,50$ vs. PS MW: $2,79 \pm 0,47$; $p < 0,0001$; siehe Diagramm 7c).

4 Diskussion

Durch das Anlegen der primären Zugangskavität zu Beginn einer Wurzelkanalbehandlung geht Zahnhartsubstanz irreversibel verloren. Je substanzschonender diese Trepanationsöffnung gewählt wird, ohne dabei die Anforderungen an eine Zugangskavität außer Acht zu lassen, desto geringer sind die Auswirkungen auf die Frakturanfälligkeit des wurzelkanalbehandelten Zahnes (Howe und McKendry, 1990, Johnson, 2009). Die durchgeführte In-vitro-Studie untersuchte erstmals den Effekt von drei bildgebenden Diagnostikverfahren auf den Zahnhartsubstanzabtrag bei der primären Zugangskavität an 3D gedruckten Kopien von menschlichen Zähnen. Im Anschluss fand eine Bewertung der diagnostischen Bildgebungen durch die Probanden statt. Diese Bewertung wurde dahingehend untersucht, ob das subjektive Empfinden der Probanden mit dem Ergebnis der Auswertung der Prüfkörper übereinstimmt.

4.1 Diskussion von Material und Methoden

4.1.1 *Limitation der Prüfkörper*

Von Zahnärzten und angehenden Zahnärzten wird für das Auffinden der Pulpakammer, der Wurzelkanaleingänge sowie für die Bearbeitung und Füllung der Wurzelkanäle viel manuelles Geschick verlangt (De Moor et al., 2013). Extrahierte menschliche Zähne nehmen zum realistischen Erlernen dieser Schritte seit Jahrzehnten vor allem in der prägraduierenden Ausbildung eine führende Rolle ein. Die Verfügbarkeit von extrahierten Zähnen nimmt jedoch stetig ab, zudem sind sie weiteren Limitationen unterworfen: strengen ethischen Voraussetzungen, zeitintensive Suche nach passenden Zähnen, potentiell infektiöse Zähne, Abweichungen von der Normanatomie sowie nicht einheitliche Prüfungsvoraussetzungen (DeWald, 1997, Bourvis et al., 2007, Tchorz et al., 2015). Um Infektionen vorzubeugen, müssten extrahierte Zähne autoklaviert und zum Beispiel eventuell vorhandene Amalgamfüllungen zuvor entfernt werden, um eine unkontrollierte Ausbreitung der Quecksilberdämpfe zu verhindern (Dominici et al., 2001, Kohn et al., 2004).

Um diese Nachteile auszugleichen, wird seit den 1970er Jahren für die endodontische Ausbildung ein durchsichtiger Acryl-Kunststoffblock mit einem simulierten Kanal verwendet (Spenst und Kahn, 1979). Der durchsichtige Acrylblock stellt für das Erlernen von erforderlichen Behandlungsabläufen für die Wurzelkanalbehandlung eine sinnvolle, da unerschöpfliche und standardisierte Alternative zum menschlichen Zahn dar (Weine et al., 1975). Durch das durchsichtige Material sind das Auffinden und die Aufbereitung des Kanals allerdings erleichtert. Zudem wird kein vollständiges Kanalsystem mit Pulpakammer dargestellt und es ist nicht realistisch genug für standardisierte Versuche, die der klinischen Situation am Patienten entsprechen (Reymus et al., 2019).

Entsprechend kam es zur Einführung von industriell gefertigten, künstlichen Zähnen mit Pulpakammer und Wurzelkanalsystem, welche als mögliche Alternative zum extrahierten Zahn beworben wurden (Nassri et al., 2008). In der präklinischen endodontischen Ausbildung zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen künstlichen und natürlichen Zähnen (Bitter et al., 2016). Bei den künstlichen Zähnen zeigen sich weder Effekte auf die Qualität der Wurzelkanalbehandlung noch auf die Position sowie die Relation des Wurzelkanals. Die Zähne zeigen gegenüber menschlichen Zähnen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied bei der Erzeugung von Aufbereitungsfehlern mit unterschiedlichen Aufbereitungsinstrumenten (Tchorz et al., 2015). Obwohl die künstlichen Zähne annähernd der klinischen Situation entsprechen und durch ihren standardisierten Produktionsprozess für vergleichende Studien geeignet sind, zeigen sich Limitationen in der Verfügbarkeit von unterschiedlichen Zahntypen und Anatomien. Zudem sind die Zähne sehr teuer und haben lange Lieferzeiten (Reymus et al., 2019).

Durch die Erfassung von individuellen geometrischen Strukturen und der Oberfläche mit Hilfe der dentalen digitalen Volumentomographie und dem Einsatz von additiven Fertigungstechniken mittels dreidimensionaler Drucker können kostengünstige Kopien von extrahierten Zähnen mit unterschiedlichsten Anatomien hergestellt werden. Aufgrund der Vergleichbarkeit und unerschöpflichen Verfügbarkeit können diese besonders für standardisierte Versuchsverfahren eingesetzt werden (Reymus et al., 2019). Die eingesetzten Prüfkörper wiesen damit den derzeit höchstmöglichen Grad der Standardisierung bei gleichzeitig bestmöglicher Realitätsnähe auf.

Dennoch weisen dreidimensional gedruckte Zähne Limitationen auf. Konventionelle Kunststoffharze für den 3D Druck sind bislang nicht in der Lage die biomechanischen Eigenschaften biologischer Strukturen wie Schmelz und Dentin zu imitieren (Reymus et al., 2020). 3D gedruckte Zähne weisen eine geringere Materialsteifigkeit und -festigkeit als natürliche Zähne auf (Reymus et al., 2019). Das Elastizitätsmodul von Kunststoff ist im Vergleich zum menschlichen Dentin deutlich geringer (2.8 GPa vs. 20-25 GPa), auch die Zugfestigkeit des Kunststoffs ist gegenüber dem Dentin reduziert (65 MPa vs. 104 MPa) (Sano et al., 1994, Kinney et al., 2003, Formlabs, 2017). Um die geringere Materialhärte der dreidimensional gedruckten Prüfkörper zu kompensieren, wurde in dieser Studie in einem Vorversuch das Abtragverhalten des eingesetzten Bohrers auf die Materialfestigkeit angepasst. Anstelle von groben Diamantschleifern mit einer Körnung ab 107µm, die häufig für den initialen Trepanationsschritt am humanen Zahn verwendet werden (Adams und Tomson, 2014), wurden in dieser Studie Finierdiamanten mit einer Körnung von 46µm bei maximal 20.000 Umdrehung pro Minute eingesetzt. Bei dieser Kompensation handelt es sich nur um eine annäherungsweise Angleichung. Eine komplette Gleichstellung von 3D gedruckten Zähnen mit menschlichen Zahnhartsubstanzen ist dadurch auch weiterhin nicht gegeben.

Eine weitere Limitation ist durch die homogene weiße Farbe der 3D gedruckten Prüfkörper gegeben. Menschliche Zähne, hier vor allem das Dentin, haben eine unterschiedliche Farbgebung, die während der Wurzelkanalbehandlung bei der klinischen Suche nach den Kanaleingängen herangezogen werden kann (Friedrichs, 2010). Dadurch kann das Auffinden der Kanaleingänge erleichtert sein. Diese anatomische Besonderheit entfällt bei den einfarbig 3D gedruckten Zähnen gänzlich (Connert et al., 2019). Die Verwendung der Lupenbrille wurde den Probanden freigestellt, jedoch konnte sich ein Blendeffekt durch die helle Farbe des Kunststoffes bei zeitgleicher Verwendung der klinischen Behandlungslampe und einer Lupenbrille mit integrierter Beleuchtung einstellen. Es ist nicht auszuschließen, dass dieser Blendeffekt einen Einfluss auf den Trepanationsvorgang haben kann.

4.1.2 Studienteilnehmer

Für die Verwendung der digitalen Volumentomographie wird eine besondere Schulung empfohlen (Brown et al., 2014). Auf die Endodontologie spezialisierte Zahnärzte in den USA haben für ihre Behandlung in 80 – 90 Prozent der Fälle Zugriff auf ein DVT Gerät, von denen die Hälfte der Geräte in der eigenen Praxis steht (Setzer et al., 2017, Alzamzami et al., 2019). In Deutschland setzen auf Endodontologie spezialisierte Zahnärzte die DVT Technik für die präoperative Behandlungsplanung vermehrt ein, wenn sie ein Gerät in ihrer eigenen Praxis haben und es sich um eine schwierige Ausgangssituation handelt. Gleichzeitig sind die Spezialisten daran gewöhnt, die konventionelle, zweidimensionale Bildgebung zur Diagnostik in schwierigen Fällen standardgemäß anzuwenden (Krug et al., 2019). Die Probanden aller Erfahrungsstufen wurden vor der Versuchsdurchführung durch eine einheitliche Einführung in die verwendete Software geschult und konnten während des gesamten Versuchs auf eine ausgelegte Arbeitshilfe zurückgreifen. Dennoch bringt die Erfahrungsstufe der Spezialisten von Haus aus einen routinierten Umgang mit den bereitgestellten diagnostischen Bildbetrachtungsprogrammen mit, ganz gleich, ob es sich dabei um die konventionelle Bildgebung in Form von zweidimensionalen Zahnenfilmen oder der dreidimensionalen digitalen dentalen Volumentomographie handelt. Einzig die endodontische Planungssoftware ist für alle Probanden neu. Die Software verwendet allerdings einen DVT Datensatz als Grundlage, wodurch die Spezialisten in dieser Anwendung wiederum einen Vorteil haben. Es ist also nicht auszuschließen, dass der routinierte Umgang der Spezialisten mit zwei- und dreidimensionalen Bildgebungen sich auf die Ergebnisse ausgewirkt haben könnte.

In der Literatur ist gefordert, dass durch die Nutzung geeigneter Bohrer die Bearbeitung des Pulpakammerbodens verhindert wird (Hellwig et al., 2018d). In diesem Versuch haben die Probanden zwei rotierende Diamantschleifer gestellt bekommen. Zum einen lag ein Finierdiamant in Form eines Zylinders zum Aufsuchen der Pulpakammer bereit, mit dem ein Volumenabtrag von der Okklusalfläche beginnend durchgeführt werden konnte. Des Weiteren hatten die Teilnehmer einen konischen Finierdiamanten mit unbelegter Spitze zur Verfügung, der für einen seitlichen Volumenabtrag genutzt werden konnte. Die Bohrer konnten eigenverantwortlich getauscht und eingesetzt werden. Der Finierdiamant mit

unbelegter Spitze bietet den Vorteil, dass dieser den Pulpakammerboden nicht bearbeitet. Es ist jedoch nicht nachvollziehbar, ob und wie häufig der diamantierte Schleifkörper mit unbelegter Spitze von den einzelnen Erfahrungsstufen eingesetzt wurde und damit zur Prävention von Behandlungsfehlern beitragen konnte.

4.1.3 Auswertung

Die Prüfkörper wurden im SLA Druckverfahren mit dem Form 2 3D Drucker mit einer Schichtstärke von 50 μ m gedruckt. Dreidimensional gedruckte Einzelzähne im SLA Verfahren werden bei einer 90% Abweichung von weniger als 0,25mm als hochpräzise angesehen (Shahbazian et al., 2010). In einer Studie konnte gezeigt werden, dass der 3D Drucker Form 2 bei einer Schichtstärke von 50 μ m eine Abweichung von 0,0354 – 0,0391mm hat (Zhang et al., 2019b). Er liegt damit deutlich unter dem geforderten Wert von 0,25mm und die erzeugten Prüfkörper können als hochpräzise angesehen werden. Dennoch kann es nicht ausgeschlossen werden, dass diese Abweichungen die Auswertung geringfügig beeinflusst haben könnten.

Zum Scannen für die erneute Digitalisierung der Prüfkörper kam der Primescan™ Intraoralscanner zum Einsatz. Dieser ist bezüglich der Genauigkeit der vorherigen Omnicam Intraoralkamera überlegen (Passos et al., 2019). Die Genauigkeit ist von zwei Faktoren abhängig: Richtigkeit und Präzision. Richtigkeit ist definiert als Abstand zwischen gemessenem Punkt zum tatsächlichen Punkt. Die Präzision wird durch den Vergleich der Abweichung von digitalisierten Oberflächen mit unterschiedlichen auf dem Markt befindlichen Intraoralscannern innerhalb dieser Gruppe ermittelt (International Organization for Standardization, 1994, Ender und Mehl, 2014). In einer In-vitro-Studie konnte gezeigt werden, dass die Abweichung beim Scan kleiner Anteile eines Kiefers mit dem Primescan™ Intraoralscanner bei der Richtigkeit bei 21,9 μ m und bei der Präzision bei 12,3 μ m liegt (Ender et al., 2019). In diesem Versuch handelt es sich um einen kleinen Scancbereich, da jeder Prüfkörper für sich mit dem Primescan™ Intraoralscanner gescannt wurde. Demnach kommen hier nur geringe Abweichungen zustande. Gegenüber Laborscannern besitzt der Primescan™ Intraoralscanner eine Tiefenschärfe von bis zu 20mm und die Möglichkeit mit einem Betrachtungswinkel zwischen 5° und

85° die Oberfläche abzubilden und damit auch schwer einsehbare Bereiche der Pulpakammer darzustellen (Dentsply Sirona, 2019). Dennoch besitzt die Primescan™ Software einen Algorithmus, mit dem nicht gescannte Bereiche softwareseitig geschlossen werden. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass Ungenauigkeiten durch nicht gescannte Bereiche im erstellten Volumen nicht mehr sichtbar waren und dadurch einen Einfluss auf die Auswertung der Größe der Trepanationsöffnung haben konnten.

Die Auswertung des Volumens und der verbliebenen Fläche der Prüfkörper begann mit der Überlagerung der gescannten Oberflächen mit der Analyse Software GOM Inspect. Die Software findet in der Zahnmedizin Anwendung zur Analyse der Genauigkeit von verschiedenen dreidimensional gescannten Oberflächen durch Intraoralscanner oder Laborscanner (Schlenz et al., 2019, Schmidt et al., 2019). In dieser Studie wurde zur Analyse der Ungenauigkeit bei der Überlagerung der Prüfkörper ein Vorversuch durchgeführt (siehe Anhang 7.6). Es konnte gezeigt werden, dass die Ungenauigkeit bei der Überlagerung aller Prüfkörper in den drei Zahnguppen zwischen 4µm und 33µm lag und eine signifikante Abweichung zwischen der Gruppe Frontzahn und Molar sowie Prämolar und Molar bestand. Die Ungenauigkeit war bei der Überlagerung von Molaren mit einer Abweichung von 11 bis 33µm am stärksten ausgeprägt.

Die Auswertung hinsichtlich des entfernten Volumens und der verbliebenen Fläche der Restzahnhartsubstanz fand daher nicht in Bezug zur Zahnguppe statt. Bei der Abweichung der Überlagerung der Prüfkörper in Bezug zur Erfahrungsstufe und zur diagnostischen Bildgebung wurde jeweils kein signifikanter Unterschied erfasst, daher führten die Überlagerung hier nicht zu einer möglichen Beeinflussung der Ergebnisse.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 Substanzzabtrag und verbliebene Fläche der Zahnhartsubstanz

Die Präparation einer traditionellen Zugangskavität ist immer mit einem irreversiblen koronalen Hartsubstanzverlust verbunden. Dieser führt zu einer Schwächung des Zahnes sowie zu einer reduzierten Frakturresistenz (Pierrisnard et al., 2002, Sabeti et al., 2018). Die Stabilität des Zahnes wird bereits durch die Präparation einer okklusalen

Kavität um 30% von 340 N auf 225 N herabgesetzt (Reeh et al., 1989, Howe und McKendry, 1990). Wurzelkanalbehandelte Zähne sind meist stark vorbehandelt, was alleine gesehen schon zu einem Verlust an Zahnhartsubstanz und zur Schwächung des Zahnes führt (Nadeau et al., 2019). Durch die Zugangskavität und die Wurzelkanalbehandlung gehen nochmals koronale und zervikale Zahnhartsubstanz verloren und schwächen den Zahn zusätzlich (Sedgley und Messer, 1992). Der Anteil an entfernter Zahnhartsubstanz durch die Trepanation variiert durch die individuellen Fähigkeiten und die Erfahrung des Behandlers (Kehoe, 1985, Tavares et al., 2019). Gleichzeitig hat der Substanzabtrag Einfluss auf die Frakturresistenz endodontisch behandelter Zähne (Zhang et al., 2019a). Für die Frakturresistenz bei der Übertragung von okklusalen Kaukräften entlang der Zahnwurzel nimmt das peri-zervikale Dentin eine Schlüsselrolle ein. Dieses Dentin befindet sich 4 mm koronal und 6 mm apikal des knöchernen Alveolarrandes und gehört neben den Dentinüberhängen über der Pulpakammer und dem axialen Dentin auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze zu den erhaltungswürdigen Strukturen (Clark und Khademi, 2010a, Clark et al., 2013). Beim Design der traditionellen Zugangskavität handelt es sich um eine für jeden Zahn vordefinierte Form und der gradlinige Zugang zum Wurzelkanalsystem steht im Vordergrund (Bóveda und Kishen, 2015, Hargreaves und Berman, 2015).

Durch die Einführung optischer Vergrößerungshilfen wie der Lupenbrille und des Operationsmikroskops werden diese Anforderungen an eine Zugangskavität hinterfragt (Carr, 1992, Nadeau et al., 2019). Der Trend zur minimalinvasiven Behandlung hat die sogenannten konservativen Zugangskavitäten hervorgebracht. Das Belassen von koronalen Hartsubstanzstrukturen, indem das Pulpakammerdach nicht vollständig entfernt wird, reduziert den Substanzabtrag deutlich (Clark und Khademi, 2010b, Bürklein und Schäfer, 2015). Ein zwischen 0,5 - 3mm breiter Überhang über der Pulpakammer kann verbleiben, erhöht dadurch die Biegefestigkeit und hat somit einen positiven Einfluss auf die Frakturanfälligkeit (Clark et al., 2013). Auf Basis der konservativen Zugangskavität haben sich weitere Erscheinungsformen entwickelt. Durch die Nutzung der dentalen digitalen Volumentomographie lässt sich die Größe der Zugangskavität zahnspezifisch vorausplanen. Das Ziel ist dabei nicht die Herstellung der kleinsten Zugangskavität, sondern einer Zugangskavität, mit der sich möglichst viel Zahnhartsubstanz schonen lässt (Nadeau et al., 2019). Bei der substanzschonenden Zugangskavität handelt es sich um eine kleine okklusale Kavität

zur direkten Darstellung der Kanaleingänge, die bei Molaren mit der sogenannten „dachstuhlhähnlich“ gestalteten Zugangskavität eine besondere Form annehmen kann. Durch einen doppelten Zugang werden mesiale und distale bzw. bukkale und palatinale Kanäle getrennt voneinander dargestellt. Dazwischen verbleibt eine Zahnhartsubstanzbrücke.

Die sogenannten „Ninja Kavitäten“ sind kleinstmögliche, punktuelle Eröffnungen des Pulpakammerdaches mit direktem Zugang zu den Kanaleingängen und stellen damit die minimalinvasivste Form der Zugangskavitäten dar (Mookhtiar et al., 2019, Zhang et al., 2019a), verbessern die Frakturanfälligkeit im Vergleich zur konservativen Zugangskavität jedoch nicht (Plotino et al., 2017). Auch die „dachstuhlhähnlich“ gestalteten Zugangskavitäten bei Molaren zeigen im Vergleich zu konservativ und traditionell gestalteten Zugangskavitäten keine Verbesserung der Frakturresistenz (Corsentino et al., 2018). Eine reduzierte Frakturresistenz zeigt sich jedoch bei der traditionellen Zugangskavität gegenüber der konservativen Zugangskavität (Plotino et al., 2017). Problematisch bleiben bei der substanzschonenden Zugangskavität jedoch nicht gefundene Kanaleingänge durch verbleibende Dentinüberhänge (Rover et al., 2017). Je kleiner die Zugangskavitäten, desto gewissenhafter müssen Gewebereste unter den belassenen Dentinstrukturen durch chemische Desinfektionsmaßnahmen entfernt werden (Hülsmann et al., 2019). Die hiermit verbundenen Probleme, wie nicht behandelte Dentinwände, zurückbleibende Mikroorganismen und das Nichtauffinden von Wurzelkanälen zeigen in einem systematischen Review keinen hinreichenden Vorteil der minimalinvasiven Zugangskavität gegenüber den klassischen Anforderungen an eine Zugangskavität (Silva et al., 2018). Entsprechend wurden den Probanden in diesem Versuch die klassischen Anforderungen an eine traditionelle Zugangskavität gestellt.

Für eine substanzschonende Zugangskavität sind optische Vergrößerungen wie eine Lupenbrille oder das Operationsmikroskop notwendig (Nadeau et al., 2019). In dieser Studie haben 30 von 34 Probanden eine Lupenbrille verwendet. Losgelöst davon stellt sich die Frage, welchen Einfluss die diagnostische Bildgebung auf den Substanzverlust bei der Gestaltung der Zugangskavität hat. Bereits durch die Zuhilfenahme der dentalen digitalen Volumentomographie konnte in In-vivo-Studien ein Vorteil im Vergleich zur konventionellen Röntgenbildgebung festgestellt werden. So wurden signifikant mehr apikale Läsionen diagnostiziert (Patel et al., 2012, Davies

et al., 2015, Davies et al., 2016, Uraba et al., 2016). Zudem wurden interne und externe Wurzelresorptionen präzise detektiert (Bhuva et al., 2011, Patel et al., 2016, Vaz de Souza et al., 2017). Für den Behandler bietet das DVT somit bereits im Vorfeld eine große Unterstützung bei der präendodontischen Behandlungsplanung, der Beurteilung der zu erwartenden Kosten sowie der Erhaltungswürdigkeit eines Zahnes und trägt damit maßgeblich zum Behandlungserfolg bei (Krug et al., 2019). Eine darauf basierende Weiterentwicklung ist die von Sirona Dentsply entwickelte Planungssoftware, welche durch die Verwendung der Daten aus der digitalen Volumentomographie vor der eigentlichen Behandlung eine erweiterte, visualisierbare Planungsmöglichkeit wie beispielsweise einen Vorschlag für die Größe der Trepanationsöffnung ermöglicht. Das ALARA (As low as reasonably achievable) Prinzip zur Minimierung der röntgenologischen Strahlendosis muss dabei weiterhin Anwendung finden (Farman, 2005), denn selbst die kleinvolumige Aufnahme der digitalen Volumentomographie mit einem kleinen „Field of View“ führt zu einer höheren Strahlenbelastung als die konventionelle Bildgebung. Ein signifikanter Vorteil bei der Durchführung der Wurzelkanalbehandlung muss daher durch den Einsatz der digitalen Volumentomographie oder der Planungssoftware erkennbar sein, um die höhere Strahlenbelastung zu rechtfertigen (Patel et al., 2014).

Durch den Schnitt der Prüfkörper auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze ließ sich das entfernte Volumen der Zugangskavität ab der Okklusalfläche bestimmen. Betrachtet man das entfernte Volumen in Bezug zur diagnostischen Bildgebung, so zeigten sich hier keine signifikanten Unterschiede ($p>0,05$) zwischen den drei Bildgebungen. Mit der dentalen Volumentomographie ($46,59\text{mm}^3$) und der Planungssoftware ($46,73\text{mm}^3$) wurde vergleichbar viel Zahnhartsubstanz abgetragen. Mit Hilfe der konventionellen Röntgenbildtechnik wurde nur geringfügig mehr Volumen abgetragen ($49,32\text{mm}^3$). Die ermittelte Fläche der belassenen Restzahnhartsubstanz des peri-zervikalen Dentins der Prüfkörper wurde ebenfalls ausgewertet. Der Abtrag des Dentins auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze wies bei den Prüfkörpern der drei diagnostischen Bildgebungen annähernd gleiche Werte auf ($p>0,05$). Auch in der Literatur konnte zwischen der Anwendung von konventioneller, zweidimensionaler Röntgenbildtechnik und dreidimensionaler digitaler Volumentomographie kein Unterschied bezüglich des Hartsubstanzverlustes beim Anlegen der Zugangskavität festgestellt werden (Connert et al., 2014a). In Bezug zur eingesetzten diagnostischen Bildgebung mit alleinigem

Blick auf das entfernte Volumen und der verbliebenen Fläche der Zahnhartsubstanz deckt sich diese Studie mit der Literatur und zeigte ebenfalls keinen entscheidenden Vorteil durch die Anwendung einer der beiden dreidimensionalen Bildgebungen.

Betrachtet man erneut das entfernte Volumen und die verbliebene Zahnhartsubstanz in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler, so hatten Studierende bei der Trepanation sowohl im Vergleich mit den Spezialisten ($51,61\text{mm}^3$ vs. $43,09\text{mm}^3$, $p=0,003$) als auch im Vergleich mit den Zahnärzten ($51,61\text{mm}^3$ vs. $47,19\text{mm}^3$, $p=0,0423$) signifikant mehr Volumen abgetragen. Mit Blick auf die verbliebene Fläche hatten die Spezialisten im Vergleich zu den Studierenden signifikant mehr perizervikales Dentin belassen ($40,19\text{mm}^2$ vs. $39,19\text{mm}^2$, $p=0,0032$). Der Erfahrungsstand des Behandlers trägt somit entscheidend zum Abtrag des Volumens bei der Trepanation bei. Aus anderen Bereichen der Zahnmedizin konnte in der Literatur gezeigt werden, dass es einen signifikanten Unterschied in den Behandlungsergebnissen unerfahrener und erfahrener Behandler gibt. Abhängig vom Erfahrungs niveauanstieg des Behandlers durch die Teilnahme an einem mehrmonatigen endodontischen Curriculum wurden zum Ende der Fortbildung im Gegensatz zum Beginn prozentual mehr zusätzliche Wurzelkanäle diagnostiziert (Corcoran et al., 2007). Die Schneidleistung unterschiedlicher Feilen in künstlich hergestellten Wurzelkanälen ist ebenfalls abhängig von der Behandlungserfahrung. Je erfahrener der Behandler, desto schneller und sicherer wurden die Kanäle aufbereitet (Al-Omari et al., 2010). Die Ergebnisse dieser Studie decken sich hier mit der Literatur und zeigen, dass der Substanzverlust bei der Zugangskavität von der Erfahrung des Behandlers abhängig ist.

Erwähnenswert ist, dass der Algorithmus der Planungssoftware eine optimale Zugangskavität vorgibt. Es kann vorkommen, dass diese Zugangskavität nicht den Anforderungen einer traditionellen Zugangskavität entspricht und ein Dentinüberhang von der Software bewusst belassen wird. Dieses Vorgehen steht im Zeichen der konservierenden Zugangskavität, die jedoch im Widerspruch mit der Versuchsanforderung zur vollständigen Entfernung von Dentinüberhängen steht. Probanden, die sich strikt an die Vorgaben der Planungssoftware gehalten haben, zeigten somit ein minimalinvasiveres Vorgehen. Der Effekt wurde jedoch in den Ergebnissen nicht deutlich, was durch die Versuchsanforderung erklärt werden kann. Dentinüberhänge wurden eventuell entfernt, obwohl dies für den Zugang zum

Wurzelkanalsystem nicht nötig gewesen wäre. Sowohl bei der dentalen digitalen Volumentomographie als auch bei der Planungssoftware könnte es somit in dieser Studie zu einem höheren Hartsubstanzverlust gekommen sein als nötig gewesen wäre.

4.2.2 Auftreten von Behandlungsfehlern

Je substanzschonender die Zugangskavität angelegt wird, ohne dabei negative Auswirkungen auf die Instrumentierung und Ausräumung des Wurzelkanalsystems zu haben (Krishan et al., 2014, Neelakantan et al., 2018), desto niedriger ist das Auftreten von Komplikationen dieser so behandelten Zähne (Plotino et al., 2017, Corsentino et al., 2018, Zhang et al., 2019a). Von den möglichen Komplikationen während der Wurzelkanalbehandlung wird das Auftreten einer Perforation in retrospektiven Studien zwischen 2 und 12 Prozent angegeben (Tsesis und Fuss, 2006, Tsesis et al., 2010). In dieser Studie waren bei 20 von 306 Prüfkörpern iatrogene Perforationen aufgetreten, dies entspricht 6,53% und deckt sich mit dem Literaturwert. Bei einer nicht im Anschluss direkt wieder verschlossenen Perforation kommt es durch das permanente Einwandern von Bakterien zur Ausbildung von immer wieder aufflammenden Entzündungen. Bedingt dadurch bleiben die perforierten Zähne trotz Wurzelkanalbehandlung symptomatisch, neigen zu Abszess- und Fistelbildung gefolgt von Knochenresorptionen (Tsesis und Fuss, 2006). Es konnte gezeigt werden, dass iatrogene Perforationen zum Mislingen der Wurzelkanalbehandlung führen können und in 4,2% der Fälle sogar in einer Extraktion des betroffenen Zahnes enden (Toure et al., 2011). Besteht eine direkte Verbindung durch die Perforation mit der Mundhöhle, so sind die Erfolgsaussichten am niedrigsten (Krupp et al., 2013). Perforationen können grundsätzlich an allen Zähnen beider Kiefer auftreten. In dieser Studie sind jedoch nur Oberkieferzähne zur Anwendung gekommen. Gemäß der Literaturlage werden Oberkieferzähne mit 74,5% deutlich häufiger perforiert als Unterkieferzähne mit 25,5%. (Kvinnslund et al., 1989). Betrachtet man nur den Oberkiefer, so kommen dort deutlich mehr Perforationen im Prämolaren-Bereich (15,52%) als im Frontzahn-Bereich (12,93%) oder Molaren-Bereich (10,34%) vor (Tsesis et al., 2010). Auch in diesem Versuch zeigten die Prämolaren im Vergleich zu den beiden anderen Zahnguppen eine signifikant höhere Anzahl an Perforationen.

In der Literatur wird das Auftreten einer Perforation während der Behandlung durch Studierende mit Werten zwischen 2,3 - 2,7 Prozent angeben. Durch eine Vorauswahl der Zähne für die studentischen Kurse werden eher einfachere Anatomien von Studierenden bearbeitet (Eleftheriadis und Lambrianidis, 2005, AlRahabi, 2017, Alamoudi et al., 2020). In diesem Versuch zeigte sich bei Studierenden (9,25%) und Zahnärzten (7,40%) eine höhere, aber nicht signifikante ($p=0,1392$), Anzahl an Perforationen als bei Spezialisten (2,22%). Im Fragebogen gaben 20 von 34 Probanden an, dass im Durchschnitt weniger als eine Wurzelkanalbehandlung pro Woche durchgeführt wird. Die geringe Erfahrung in der Vorgehensweise beim Anlegen einer Zugangskavität kann zu einer höheren Anzahl an Perforationen geführt haben. Zum anderen fand keine Selektion statt und Zähne mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden wurden von allen Probanden bearbeitet.

Bei der Auswertung der Perforationen in Bezug zur diagnostischen Bildgebung ließ sich kein signifikanter Unterschied ($p>0,05$) zwischen den drei Bildgebungen feststellen. Allerdings zeigte sich tendenziell, dass die Behandlung bei der Hilfestellung durch die Planungssoftware (9,80%) im Vergleich zur konventionellen Röntgenbildtechnik (6,86%) und zur dentalen digitalen Volumentomographie (2,94%) mit einer höheren Anzahl an Perforationen einherging. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass der Algorithmus der Planungssoftware eine optimale Zugangskavität vorschlägt. Wurde diese ohne individuelle Einstellungen im Programm bedenkenlos übernommen und nicht mit der intraoralen Situation und Zahnachse abgeglichen, so konnte dies leichter zu Perforationen führen.

In dieser Studie wurde die Bearbeitung des Pulpakammerbodens während des Anlegens der primären Zugangskavität als Trepanationsfehler gewertet. Zum einen geht durch die Bearbeitung des Pulpakammerbodens Zahnhartsubstanz irreversibel verloren. Zum anderen kann es, insbesondere bei mehrwurzeligen Zähnen, durch die unbeabsichtigte Bearbeitung zwischen den Wurzeln, das heißt auf Höhe der Furkation, zu einer Perforation kommen (Bryan et al., 1999). Diese furkale Perforation bei mehrwurzeligen Zähnen ist ein häufiger Behandlungsfehler und beeinträchtigt die Prognose des Zahns nachhaltig (Seltzer et al., 1970, Kvinnslund et al., 1989, Tesis und Fuss, 2006).

Die Auswertung der Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur Zahngruppe zeigte, dass in dieser Studie Molaren im Vergleich zu Prämolaren (36,27% vs. 0,98%; $p<0,0001$) und im Vergleich zu Frontzähnen (36,27% vs. 3,92%; $p<0,0001$) signifikant häufiger am Pulpakammerboden bearbeitet wurden. Dies kann auf die anatomisch größere Fläche der Molaren im Vergleich zu Frontzähnen und Prämolaren zurückzuführen sein.

Betrachtet man die Auswertung für die Bearbeitung des Pulpakammerbodens im Hinblick auf die Erfahrungsstufe der Behandler, so lagen keine signifikanten Unterschiede aufgrund des Erfahrungsniveaus vor ($p>0,05$). In der Gruppe der Zahnärzte konnte allerdings eine höhere Häufigkeit, den Pulpakammerboden zu bearbeiten, nachgewiesen werden (16,67%). Studierende (14,81%) und Spezialisten (8,89%) zeigten im Vergleich, dass sie durch ein zurückhaltendes Vorgehen dazu neigten, den Boden nicht zu bearbeiten. Zudem profitierten die Spezialisten von ihrer Erfahrung im Anlegen von Zugangskavitäten.

Die Auswertung der Bearbeitung des Pulpakammerbodens in Bezug zur diagnostischen Bildgebung konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Bildgebungen feststellen ($p>0,05$). Mit jeder Bildgebung war eine einfache Messung der Distanz zwischen dem okklusalen Referenzpunkt und dem Beginn der Pulpakammer möglich. Auf diese Messmöglichkeit wurde während der Versuchseinweisung und in der ausgelegten Anleitung explizit eingegangen. Für jeden Probanden lag zusätzlich eine Parodontal-Sonde zum Nachmessen der intraorale Tiefe der Trepanation bereit. Eine Bearbeitung des Pulpakammerbodens hätte somit vermieden werden können. Ob diese Möglichkeiten tatsächlich angewendet wurden, konnte nicht erfasst werden. Die Messung der Trepanationstiefe schien in der Komplexität der Einstellungsmöglichkeiten der drei Bildgebungen wenig Beachtung zu finden, denn mit der konventionellen Bildgebung (15,69%) war die Anzahl an unbeabsichtigten Bearbeitungen des Pulpakammerbodens genauso hoch wie mit der endodontischen Planungssoftware (13,72%). Das Vorkommen einer Verletzung des Pulpakammerbodens mit der dentalen digitalen Volumentomographie zeigte sich nur geringfügig niedriger (11,76%). Die Möglichkeit der visuellen Vorausplanung und der grafischen Darstellung der Trepanationstiefe durch die Planungssoftware ergab in der Prävention von Pulpakammerbodenbearbeitungen mit

rotierenden Instrumenten und somit für die Prävention von furkalen Perforationen in dieser Studie keinen entscheidenden Vorteil.

Die Anforderung an die Zugangskavität sieht die vollständige Entfernung des Pulpakammerdaches vor (Weller und Hartwell, 1989). Das Verbleiben von Pulparesten innerhalb der Pulpakammer kann zu ästhetischen Problemen führen. So kann es besonders bei Prämolenaren und Frontzähnen nach Abschluss der Wurzelkanalbehandlung zu einer Verfärbung der Zahnlkrone kommen. Ursächlich dafür kann eine zu kleine Trepanationsöffnung sein, infolgedessen es zu einem Belassen von Geweberesten in Pulpahörnern oder unter Resten des Pulpakammerdaches kommen kann (Brown, 1965, Faunce, 1983, Attin et al., 2003). Bevor das Pulpakammerdach nicht vollständig entfernt ist, sollte mit der Suche der Kanaleingänge nicht begonnen werden, da bei der verfrühten Suche durch die Bearbeitung der Wände und des Bodens die Gefahr einer Perforation besteht (Krasner et al., 2010). Nur so kann sichergestellt werden, dass sich unter belassenen Überhängen keine möglichen Kanaleingänge befinden. In anderen Studien konnte aber gezeigt werden, dass gerade ein Belassen von Dentinüberhängen über der Pulpakammer zu einer niedrigeren Frakturanfälligkeit führt (Clark und Khademi, 2010a, Clark et al., 2013). Der Versuchsaufbau sah für alle Behandler eine Hækchensonde sowie einen Micro-Opener vor. Mit diesen Hilfsmitteln sollte das Aufspüren von Dentinüberhängen erleichtert werden.

In dieser Studie wurden Anteile des Pulpakammerdachs signifikant häufiger in Molaren als in Frontzähnen und Prämolenaren belassen ($p<0,0001$). Zum einen weisen Molaren anatomisch eine größere Pulpakammer als Prämolenaren und Frontzähne auf, die Gefahr, dort Überhänge zu belassen, ist somit erhöht. Zum anderen ist es schwierig zu entscheiden, ob das Dach vollständig entfernt wurde. Hilfestellung bietet das „Gesetz zur Farbänderung“, welches besagt, dass sich der Pulpakammerboden dunkler darstellt als die umgebenden Pulpakammerwände (Krasner und Rankow, 2004). Sofern dieser Hell-Dunkel-Übergang nicht überall in der Kammer sichtbar ist, deutet dies auf eine überhängende Struktur hin (Krasner et al., 2010). Aufgrund der Einfarbigkeit der Prüfkörper konnte diese Farbänderung nicht dargestellt werden, was das Erkennen des Pulpakammerdaches erschwert.

In dieser Studie wiesen Studierende (39,81%) und Spezialisten (40,00%) eine fast gleich hohe Häufigkeit an belassenen Anteilen des Pulpakammerdaches auf, wohingegen bei den Zahnärzten der Anteil des belassenen Pulpakammerdaches am höchsten war (49,07%; $p>0,05$). Vor allem für Studierende ergibt sich die Schwierigkeit in der Ambivalenz zwischen der Anforderung, das Pulpakammerdach vollständig zu entfernen, um den Übergang zwischen Pulpakammerwand und Pulpakammerboden einzusehen und andererseits nicht übermäßig viel Zahnhartsubstanz zu opfern (Rankow und Krasner, 1995). In dieser Studie neigten die Studierenden durch die Einhaltung der Versuchsanforderungen zu einem eher invasiveren Vorgehen, um dadurch das Pulpakammerdach vollständig zu entfernen.

Betrachtet man die Auswertung hinsichtlich der diagnostischen Bildgebung, so zeigte sich auch hier kein signifikanter Unterschied zwischen den drei verschiedenen Bildgebungen ($p>0,9999$). Allerdings war das Vorkommen des Belassens des Pulpakammerdaches mit der Planungssoftware (46,08%) erhöht. Dies kann auf den Algorithmus innerhalb der Software zurückgeführt werden. Eine bestmögliche Zugangskavität kann am Bildschirm vorgeplant und virtuell auf die Okklusalebene projiziert werden. Eventuell vorhandene Überhänge des Pulpakammerdaches werden jedoch nicht angezeigt. Sofern der Proband die virtuelle Planung ohne Anpassung an die intraorale Situation übernahm, könnte dies das höhere Vorkommen im Belassen des Pulpakammerdaches erklären. Die konventionelle Röntgenbildtechnik (41,18%) sowie die digitale dentale Volumentomographie (42,16%) zeigten ähnliche Häufigkeiten im Belassen des Pulpakammerdaches. Die Probanden waren mit diesen beiden diagnostischen Bildgebungen aber eher geneigt auf die intraorale Situation einzugehen und die Ausdehnung der Zugangskavität daran anzupassen.

4.2.3 Fragebogen

Nach der Beantwortung von allgemeinen Parametern durch die Probanden war der Fragebogen in zwei weitere Abschnitte aufgeteilt. Der erste Abschnitt fand direkt im Anschluss an die Bearbeitung jedes einzelnen Prüfkörpers statt. Aufgrund der Randomisierung startete jeder Proband mit einer unterschiedlichen diagnostischen Bildgebung und einem anderen Prüfkörper. Erst im Laufe des gesamten Versuches, durch die Bearbeitung mehrerer Prüfkörper, wuchs die Erfahrung im Umgang mit den

verschiedenen Bildgebungen. Dieser erste Abschnitt des Fragebogens stellt damit eine subjektive Bewertung der Behandler ohne Vergleich der Bildgebungen untereinander dar. In Schulnoten erhielt die zweidimensionale Bildgebung die Note 3 (MW: $3,4 \pm 1,30$). Die digitale dentale Volumentomographie erreichte die Note 2 (MW: $1,91 \pm 0,85$). Die Planungssoftware erzielte ebenfalls die Note 2 (MW: $2,04 \pm 1,08$). Beide dreidimensionalen Bildgebungen wurden signifikant ($p < 0,0001$) besser bewertet als die konventionelle Bildgebung und damit von den Behandlern als deutliche Hilfestellung für das Anlegen der primären Zugangskavität wahrgenommen.

Der zweite Abschnitt des Fragebogens fand im Anschluss an den kompletten Versuch statt. Die drei verschiedenen diagnostischen Bildgebungen wurden hinsichtlich unterschiedlicher Fragestellungen auf einer Skala von 1 (Platz 1 = sehr gut), 2 (Platz 2 = befriedigend) bis 3 (Platz 3 = schlecht) klassifiziert. Dieser zweite Abschnitt fand am Ende des Versuches statt, nachdem die unterschiedlichen diagnostischen Bildgebungen mehrmals angewendet wurden und sich dadurch objektiv miteinander vergleichen ließen.

Der konventionellen Bildgebung liegen wegen ihrer Zweidimensionalität Limitationen zugrunde. Beeinträchtigungen entstehen zum einen durch Summationseffekte aufgrund der Überlagerung unterschiedlicher anatomischer Strukturen (Bender und Seltzer, 1961, Paurazas et al., 2000) und zum anderen durch eine geometrische Verzerrung der betrachteten Objekte (Forsberg und Halse, 1994). Diese Unsicherheitsfaktoren spiegelten sich in einer signifikant schlechteren Bewertung der Sicherheit beim Anlegen der Zugangskavität bei der Verwendung der konventionellen Röntgenbildtechnik im Gegensatz zu den beiden dreidimensionalen Bildgebungen wider (jeweils $p < 0,001$).

Durch eine einheitliche Einweisung in die Bildgebungen zu Beginn des Versuches und das Auslegen der Arbeitseinweisungen sollten für alle Probanden vergleichbare Verhältnisse geschaffen werden. Dennoch sind spezialisierte Zahnärzte sowohl im Umgang mit der digitalen Volumentomographie als auch in der Anwendung der zweidimensionalen Röntgentechnik vertrauter als die beiden anderen Probandengruppen (Krug et al., 2019). Hinsichtlich der Handhabung im Umgang mit den diagnostischen Bildgebungen zeigten sich zwischen den drei unterschiedlichen Bildgebungen signifikante Unterschiede ($p < 0,0004$). In dieser Studie bewerteten die

Behandler aller Erfahrungsstufen weiterhin die konventionelle Bildgebung im Umgang verständlicher als die beiden dreidimensionalen Bildgebungen. Der Umgang mit der dentalen digitalen Volumentomographie stellte sich verständlicher als die Handhabung der Planungssoftware dar.

Ein Nachteil der dreidimensionalen Aufnahmetechnik ist die verlängerte diagnostische Auswertungszeit der Aufnahme aus einer digitalen Volumentomographie im Vergleich zur konventionellen Röntgenaufnahme. Dies spiegelt sich ebenfalls in den erhöhten Kosten für die Anwendung der dreidimensionalen Bildgebung wider (Christell et al., 2012, Karjodkar, 2019). Für die Planungssoftware kommt zusätzliche Zeit für die Einstellungen innerhalb des Programms hinzu, bevor der Algorithmus eine virtuelle Planung anzeigt. Dies wurde auch in der Auswertung der Schnelligkeit im Umgang mit den diagnostischen Bildgebungen ersichtlich. Die benötigte Zeit für den Umgang mit der Software wird als signifikant länger eingeschätzt im Vergleich zur zweidimensionalen Röntgenbildtechnik und zur dentalen digitalen Volumentomographie.

Die dentale digitale Volumentomographie hat im Vergleich zur zweidimensionalen Röntgenbildtechnik keinen Einfluss auf einen minimalinvasiven Substanzabtrag während des Anlegens der Zugangskavität (Connert et al., 2014a). Auch in dieser Studie konnte belegt werden, dass die dentale digitale Volumentomographie und die Planungssoftware gegenüber der herkömmlichen Röntgentechnik keinen Einfluss auf den Substanzabtrag haben. Die Anwendung der dentalen digitalen Volumentomographie bedarf einer vorherigen Schulung und diese sollte bereits in der studentischen Ausbildung stattfinden (Brown et al., 2014, Aditya et al., 2015). Der Umgang während der studentischen Ausbildung mit der dentalen digitalen Volumentomographie sollte daher ausgebaut werden, da die Anwendung aufgrund der Dreidimensionalität schwierig und vor allem beim unerfahrenen Behandler mit einer hohen Fehlerquote bei der Interpretation der Bilder verbunden ist (Kamburoglu et al., 2011, Aditya et al., 2015). Hervorzuheben ist, dass in dieser Studie die dentale digitale Volumentomographie in der subjektiven Bewertung aller Probanden gegenüber den anderen beiden Bildgebungen überlegen war. Mit Blick auf die niedrige Anzahl an Aufbereitungsfehlern kann man die positive Bewertung und Klassifizierung dieser Betrachtungsmöglichkeit nachvollziehen. Hier stellt sich ein deutlicher Vorteil gegenüber den anderen diagnostischen Bildgebungen dar.

Die Planungssoftware und die dentale digitale Volumentomographie wurden hinsichtlich der im Fragebogen ermittelten subjektiven Sicherheit beim Anlegen der Zugangskavität von den Behandlern vergleichbar gut bewertet. Bei der Verwendung der Planungssoftware spiegelte sich im Unterschied zur dentalen digitalen Volumentomographie die gute Bewertung jedoch nicht durch eine niedrige Anzahl an Aufbereitungsfehlern wider. Im direkten Vergleich der beiden dreidimensionalen Bildgebungen wurde die Planungssoftware zudem als schwieriger im Umgang und deutlich langsamer in ihrer Anwendung bewertet.

4.2.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Durch den 3D Druck im SLA Verfahren lassen sich realitätsnahe Kopien von extrahierten Zähnen herstellen. Aufgrund der guten Vergleichbarkeit und unerschöpflichen Verfügbarkeit können reproduzierbare und identische Prüfkörper für eine gezielte Fragestellung hergestellt werden, die in standardisierten Versuchsverfahren Anwendung finden. Der 3D Druck der Prüfkörper mit dem Form 2 Drucker kann als hochpräzise angesehen werden. Das Abtragverhalten der eingesetzten Bohrer wurde durch Vorversuche an die Kunstharzfestigkeit der Prüfkörper angepasst, um den Härteunterschied zum Dentin und zum Schmelz echter Zähne bei der Versuchsdurchführung auszugleichen. Der Substanzverlust und die Fehler beim Anlegen der primären Zugangskavität für drei unterschiedliche diagnostische Bildgebungen konnten dadurch vergleichbar untersucht werden.

Die Planungssoftware wies mit Blick auf den Substanzabtrag durch das Anlegen der Zugangskavität und die verbliebene Fläche der Zahnhartsubstanz auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze keinen signifikanten Unterschied gegenüber der dentalen digitalen Volumentomographie oder der konventionellen zweidimensionalen Röntgenbildtechnik auf. Mit der Planungssoftware zeigte sich aber in dieser Studie im Vergleich zu den anderen beiden Bildgebungen eine höhere Anzahl an Perforationen. Zudem brachte die Planungssoftware keinen entscheidenden Vorteil bei der Erhaltung von Zahnhartsubstanz, indem z.B. der Pulpakammerboden nicht bearbeitet wurde. Außerdem erwies sich die Planungssoftware als die am wenigsten geeignete diagnostische Bildgebung um das Pulpakammerdach vollständig abzutragen. Jedoch wären aufgrund des komplexeren Programmaufbaus durch eine längere

Einarbeitungszeit und eine längere Erfahrungszeit mit dieser Bildgebung wahrscheinlich bessere Ergebnisse zu erwarten.

Auf die Anfertigung von konventionellen, zweidimensionalen Röntgenbildern kann derzeit bei der Wurzelkanalbehandlung nicht verzichtet werden. Diese Röntgenbildtechnik sollte auch weiterhin durch eine dreidimensionale Bildgebung ergänzt werden, da sich die dentale digitale Volumentomographie in dieser Studie durch eine hohe Arbeitssicherheit auszeichnete und daher grundsätzlich für Anwender mit geringer klinischer Erfahrung geeignet ist.

Durch die Nutzung der dreidimensionalen Daten aus der dentalen digitalen Volumentomographie lässt sich ein weiterer Trend zu geführten Wurzelkanalbehandlungen (Engl.: guided endodontics) absehen. Bei der statisch geführten Wurzelkanalbehandlung lassen sich zusammen mit den Daten aus dem Intraoralscanner am Computer die Zugangskavitäten planen und Bohrschablonen entwerfen. Im 3D Druckverfahren erfolgt die Herstellung der passgenauen Bohrschablonen (Anderson et al., 2018). Diese Art der geführten Wurzelkanalbehandlung zeigt vor allem in oblitterierten Kanälen einen entscheidenden Vorteil (Connert et al., 2019). Eine dynamisch geführte Wurzelkanalbehandlung ist durch die Verwendung der Daten aus der dentalen digitalen Volumentomographie in Verbindung mit dem Navident System (ClaroNav, Toronto, Ontario, Canada) möglich. Die gewünschte Zugangskavität wird präendodontisch geplant und auf einem Bildschirm angezeigt. Eine Kamera registriert in Echtzeit die dreidimensionale Position des Patientenkiefers sowie die des Bohrers. Durch Betrachtung des Computerbildschirms erhält der Behandler umgehend die Information über die Position des Bohrers im Verhältnis zur vorgeplanten Position der Zugangskavität (Chong et al., 2019). Dieses dynamische System ermöglicht anatomische Strukturen präzise aufzuspüren und einen minimalinvasiven Zugang herzustellen (Gambarini et al., 2019, Jain et al., 2020).

Diese Studie behandelte die Auswirkung der Nutzung von drei diagnostischen Bildgebungen auf die Größe der primären Zugangskavität. In zukünftigen Studien sollte zusätzlich der Einfluss der statisch oder dynamisch geführten Wurzelkanalbehandlung auf die Größe der Zugangskavität im Vergleich dargestellt und untersucht werden.

Vor dem Hintergrund der immer knapper werdenden Verfügbarkeit von extrahierten menschlichen Zähnen für die zahnärztliche Ausbildung stellen die für diese Studie entworfene Halterung sowie dreidimensional gedruckte Zähne samt Wurzelkanalanatomie eine sinnvolle und kostengünstige Alternative dar. In Zukunft lassen sich diese dreidimensional gedruckten Zähne aufgrund der einheitlichen Reproduzierbarkeit auch für standardisierte Ausgangssituationen in der Forschung sowie für gleiche Prüfungsvoraussetzungen in der Lehre verwenden.

5 Zusammenfassung

Für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung ist das Auffinden der Wurzelkanaleingänge und damit die Bearbeitung und gründliche Reinigung der Kanäle durch eine angemessene Zugangskavität von größter Bedeutung. In den letzten Jahren hat sich durch ein minimalinvasives Vorgehen der Trend zu konservativen und damit hartsubstanzschonenden Zugangskavitäten entwickelt. Durch den Einsatz der dentalen digitalen Volumentomographie und der damit einhergehenden dreidimensionalen Bildgebung sind diese minimalinvasiven Zugangskavitäten überhaupt möglich geworden. Aufgrund der ständigen Weiter- und Neuentwicklung auf dem Gebiet der diagnostischen Bildgebung sollte der Einfluss einer endodontischen Planungssoftware im Vergleich zur dentalen digitalen Volumentomographie und zur konventionellen, zweidimensionalen Bildgebung hinsichtlich der Größe der Zugangskavität sowie dem Auftreten von Behandlungsfehlern verglichen werden.

Für die Untersuchung wurden von 34 Behandlern, aufgeteilt auf 12 Studierende, 12 Zahnärzte sowie auf 10 Zahnärzte mit einer Spezialisierung auf dem Gebiet der Wurzelkanalbehandlung, insgesamt 306 Prüfkörper aus drei verschiedenen Zahnggruppen des Oberkiefers behandelt. Die Zahnggruppen bestanden aus einem mittleren Frontzahn, einem ersten Prämolaren und einem ersten Molaren in jeweils drei Varianten, welche im 3D Druckverfahren mit unterschiedlicher Wurzelkanalanatomie hergestellt wurden. Die Zugangskavitäten wurden unter klinischen Bedingungen an einem Phantomkopf angelegt. Das subjektive Empfinden im Umgang mit den diagnostischen Bildgebungen wurde durch einen Fragebogen registriert. Die Auswertung von Trepanationsfehlern wurde durch eine visuelle Kontrolle und Verifizierung mittels dentaler digitaler Volumentomographie erfasst. Durch die Verwendung von Oberflächenscans, die unter Zuhilfenahme einer Intraoralkamera hergestellt wurden, konnte der Substanzabtrag zwischen der Okklusalfläche und der Schmelz-Zement-Grenze sowie die verbliebene Fläche der Zahnhartsubstanz auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze ermittelt werden. Die statistische Analyse erfolgte mit der Statistik Software GraphPad Prism 9.0.2. Als Testverfahren dienten eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) sowie ein multipler Vergleichstest (Kruskal-Wallis Test).

Sowohl die endodontische Planungssoftware als auch die dentale digitale Volumentomographie wurden von den Probanden als sichere Möglichkeit zur Anlegung einer minimalinvasiven Zugangskavität wahrgenommen. Die Verwendung von zwei- oder dreidimensionaler bildgebender Diagnostik hatte jedoch keinen Einfluss auf den Hartsubstanzverlust während des Anlegens einer Zugangskavität. Die Planungssoftware zeigte im Vergleich zur dentalen digitalen Volumentomographie und zur konventionellen zweidimensionalen Bildgebung keinen entscheidenden Vorteil im Anlegen einer minimalinvasiven Zugangskavität. Die dentale digitale Volumentomographie zeichnete sich im Vergleich zur konventionellen Bildgebung und zur endodontischen Planungssoftware durch eine niedrige Häufigkeit an Trepanationsfehlern aus und bot damit eine hohe Arbeitssicherheit. In dieser Studie konnte zudem gezeigt werden, dass für das Anlegen einer minimalinvasiven Zugangskavität und der Vermeidung von Trepanationsfehlern die Erfahrung des Behandlers maßgebend war.

Die in dieser Studie verwendeten 3D gedruckten Prüfkörper haben eine optimale Vergleichssituation geschaffen, um den mit einer Trepanation verbundenen Substanzverlust durch unterschiedliche diagnostische Bildgebungen auszuwerten. Die 3D gedruckten Prüfkörper kamen durch die Anpassung des Abtragverhaltens der eingesetzten Bohrer den natürlichen Hartsubstanzenschaften menschlicher Zähne zwar sehr nahe, waren jedoch nicht identisch. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf die klinische Situation sollte daher mit Vorsicht betrachtet werden.

6 Literaturverzeichnis

- AAE and AAOMR.** (2015): Joint position statement: use of cone beam computed tomography in endodontics 2015 update. *J Endod*, 41(9), 1393-1396
- Adams, N., Tomson, P. L.** (2014): Access cavity preparation. *Br Dent J*, 216(6), 333-339
- Aditya, A., Lele, S., Aditya, P.** (2015): Current status of knowledge, attitude, and perspective of dental practitioners toward cone beam computed tomography: A survey. *J Oral Maxillofac Radiol*, 3(2), 54
- Al-Omari, M. A., Aurich, T., Wirtti, S.** (2010): Shaping canals with ProFiles and K3 instruments: does operator experience matter? *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 110(3), 50-55
- Alamoudi, R. A., Alharbi, A. H., Farie, G. A., Fahim, O.** (2020): The value of assessing case difficulty and its effect on endodontic iatrogenic errors: a retrospective cross-sectional study. *Libyan J Med*, 15(1), 1688916
- AlRahabi, M. K.** (2017): Evaluation of complications of root canal treatment performed by undergraduate dental students. *Libyan J Med*, 12(1), 1345582
- Alzamzami, Z. T., Abulhamael, A. M., Talim, D. J., Khawaji, H., Barzanji, S., Roges, R. A.** (2019): Cone-beam computed tomographic usage: survey of american endodontists. *J Contemp Dent Pract*, 20(10), 1132-1137
- Amorim, P., Moraes, T., Silva, J., Pedrini, H.** (2015): InVesalius: an interactive rendering framework for health care support. In: Bebis, G., et al. (eds.) *Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, Cham, S. 45-54
- Anderson, J., Wealleans, J., Ray, J.** (2018): Endodontic applications of 3D printing. *Int Endod J*, 51(9), 1005-1018
- Attin, T., Paque, F., Ajam, F., Lennon, A. M.** (2003): Review of the current status of tooth whitening with the walking bleach technique. *Int Endod J*, 36(5), 313-329
- Bender, I. B., Seltzer, S.** (1961): Roentgenographic and direct observation of experimental lesions in bone: I. *J Am Dent Assoc*, 62(2), 152-160
- Bhuva, B., Barnes, J. J., Patel, S.** (2011): The use of limited cone beam computed tomography in the diagnosis and management of a case of perforating internal root resorption. *Int Endod J*, 44(8), 777-786
- Bitter, K., Gruner, D., Wolf, O., Schwendicke, F.** (2016): Artificial versus natural teeth for preclinical endodontic training: a randomized controlled trial. *J Endod*, 42(8), 1212-1217
- Bourvis, N., Boelle, P. Y., Cesbron, J. Y., Valleron, A. J.** (2007): Risk assessment of transmission of sporadic Creutzfeldt-Jakob Disease in endodontic practice in absence of adequate prion inactivation. *PLoS One*, 2(12), e1330-e1330

- Bóveda, C., Kishen, A.** (2015): Contracted endodontic cavities: the foundation for less invasive alternatives in the management of apical periodontitis. *Endod Topics*, 33(1), 169-186
- Brown, G.** (1965): Factors influencing successful bleaching of the discolored root-filled tooth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 20, 238-244
- Brown, J., Jacobs, R., Levring Jaghagen, E., Lindh, C., Baksi, G., Schulze, D., Schulze, R.** (2014): Basic training requirements for the use of dental CBCT by dentists: a position paper prepared by the European Academy of DentoMaxilloFacial Radiology. *Dentomaxillofac Radiol*, 43(1), 20130291
- Bryan, E. B., Woollard, G., Mitchell, W. C.** (1999): Nonsurgical repair of furcal perforations: a literature review. *Gen Dent*, 47(3), 274-278
- Bürklein, S., Schäfer, E.** (2015): Minimally invasive endodontics. *Quintessence Int*, 46(2), 119-124
- Camilo do Carmo Monteiro, J., Rodrigues Tonetto, M., Coelho Bandeca, M., Henrique Borges, A., Claudio Martins Segalla, J., Cristina Fagundes Jordao-Basso, K., Fernando Sanchez-Puetate, C., Carlos Kuga, M.** (2017): Repair of iatrogenic furcal perforation with mineral trioxide aggregate: a seven-year follow-up. *Iran Endod J*, 12(4), 516-520
- Carr, G. B.** (1992): Microscopes in endodontics. *J Calif Dent Assoc*, 20(11), 55-61
- Chogle, S., Zuaitar, M., Sarkis, R., Saadoun, M., Mecham, A., Zhao, Y.** (2020): The recommendation of cone-beam computed tomography and its effect on endodontic diagnosis and treatment planning. *J Endod*, 46(2), 162-168
- Chong, B. S., Dhesi, M., Makdissi, J.** (2019): Computer-aided dynamic navigation: a novel method for guided endodontics. *Quintessence Int*, 50(3), 196-202
- Christell, H., Birch, S., Hedesiu, M., Horner, K., Ivanauskaitė, D., Nackaerts, O., Rohlin, M., Lindh, C., consortium, S.** (2012): Variation in costs of cone beam CT examinations among healthcare systems. *Dentomaxillofac Radiol*, 41(7), 571-577
- Clark, D., Khademi, J.** (2010a): Modern molar endodontic access and directed dentin conservation. *Dent Clin North Am*, 54(2), 249-273
- Clark, D., Khademi, J.** (2010b): Case studies in modern molar endodontic access and directed dentin conservation. *Dent Clin North Am*, 54(2), 275-289
- Clark, D., Khademi, J., Herbranson, E.** (2013): The new science of strong endo teeth. *Dent Today*, 32(4), 112, 114, 116-117
- Cohen, J.** (1977): Statistical power analysis for the behavioral sciences. Academic press, New York; USA

- Connert, T., Rein, D., ElAyouti, A., Godt, A.** (2014a): Does CBCT help to reduce the amount of dentine removal during access cavity preparation? *Int Endod J*, 47, 50–113
- Connert, T., Hülber, J. M., Godt, A., Löst, C., ElAyouti, A.** (2014b): Accuracy of endodontic working length determination using cone beam computed tomography. *Int Endod J*, 47(7), 698-703
- Connert, T., Krug, R., Eggmann, F., Emsermann, I., ElAyouti, A., Weiger, R., Kuhl, S., Krastl, G.** (2019): Guided endodontics versus conventional access cavity preparation: a comparative study on substance loss using 3-dimensional-printed teeth. *J Endod*, 45(3), 327-331
- Corcoran, J., Apicella, M. J., Mines, P.** (2007): The effect of operator experience in locating additional canals in maxillary molars. *J Endod*, 33(1), 15-17
- Corsentino, G., Pedulla, E., Castelli, L., Liguori, M., Spicciarelli, V., Martignoni, M., Ferrari, M., Grandini, S.** (2018): Influence of access cavity preparation and remaining tooth substance on fracture strength of endodontically treated teeth. *J Endod*, 44(9), 1416-1421
- Cotton, T. P., Geisler, T. M., Holden, D. T., Schwartz, S. A., Schindler, W. G.** (2007): Endodontic applications of cone-beam volumetric tomography. *J Endod*, 33(9), 1121-1132
- Dahlstrom, L., Lindwall, O., Rystedt, H., Reit, C.** (2017): 'Working in the dark': swedish general dental practitioners on the complexity of root canal treatment. *Int Endod J*, 50(7), 636-645
- Davies, A., Mannocci, F., Mitchell, P., Andiappan, M., Patel, S.** (2015): The detection of periapical pathoses in root filled teeth using single and parallax periapical radiographs versus cone beam computed tomography - a clinical study. *Int Endod J*, 48(6), 582-592
- Davies, A., Patel, S., Foschi, F., Andiappan, M., Mitchell, P. J., Mannocci, F.** (2016): The detection of periapical pathoses using digital periapical radiography and cone beam computed tomography in endodontically retreated teeth - part 2: a 1 year post-treatment follow-up. *Int Endod J*, 49(7), 623-635
- De Moor, R., Hülsmann, M., Kirkevang, L. L., Tanalp, J., Whitworth, J.** (2013): Undergraduate curriculum guidelines for endodontontology. *Int Endod J*, 46(12), 1105-1114
- Dentsply Sirona** (2019) Factsheet Primescan - a technological milestone [Internet]. 4. Februar 2019. URL: <https://assets.dentsplysirona.com/newsroom/cad-cam/en/CER-factsheet-primescan-EN.DOCX> [zitiert am 07. Mai 2021]
- DeWald, J. P.** (1997): The use of extracted teeth for in vitro bonding studies: a review of infection control considerations. *Dent Mater*, 13(2), 74-81

- Dominici, J. T., Eleazer, P. D., Clark, S. J., Staat, R. H., Scheetz, J. P.** (2001): Disinfection/sterilization of extracted teeth for dental student use. *J Dent Educ*, 65(11), 1278-1280
- Eleftheriadis, G. I., Lambrianidis, T. P.** (2005): Technical quality of root canal treatment and detection of iatrogenic errors in an undergraduate dental clinic. *Int Endod J*, 38(10), 725-734
- Ender, A., Mehl, A.** (2014): Accuracy in dental medicine, a new way to measure trueness and precision. *J Vis Exp*, 86(86), e51374
- Ender, A., Zimmermann, M., Mehl, A.** (2019): Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. *Int J Comput Dent*, 22(1), 11-19
- Europäische Gesellschaft für Endodontologie** (2004) Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung [Internet]. URL: https://www.dget.de/content/2-fuer-zahnaerzte/3-wissenschaftliche-mitteilungen/ese_guidelines_deutsch.pdf [zitiert am 07. Mai 2021]
- Farman, A. G.** (2005): ALARA still applies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 100(4), 395-397
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., Buchner, A.** (2007): G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods*, 39(2), 175-191
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., Lang, A.-G.** (2009): Statistical power analyses using G* Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behav Res Methods*, 41(4), 1149-1160
- Faunce, F.** (1983): Management of discolored teeth. *Dent Clin North Am*, 27(4), 657-670
- Formlabs** (2017) Material Data Sheet [Internet]. April 2017. URL: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801089-TDS-ENUS-0P.pdf> [zitiert am 07. Mai 2021]
- Formlabs** (2020) Post-curing with the Form Cure [Internet]. Januar 2021. URL: <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Post-Curing/115001414464-Form%20Cure%20Time%20and%20Temperature%20Settings/FormCurePost-CureSettings.pdf> [zitiert am 07. Mai 2021]
- Forsberg, J., Halse, A.** (1994): Radiographic simulation of a periapical lesion comparing the paralleling and the bisecting-angle techniques. *Int Endod J*, 27(3), 133-138
- Friedrichs, C.** (2010): Die endodontische Landkarte. *Endodontie*, 19(4), 355-363
- Fuss, Z., Trope, M.** (1996): Root perforations: classification and treatment choices based on prognostic factors. *Endod Dent Traumatol*, 12(6), 255-264

- Gambarini, G., Galli, M., Stefanelli, L. V., Di Nardo, D., Morese, A., Seracchiani, M., De Angelis, F., Di Carlo, S., Testarelli, L.** (2019): Endodontic microsurgery using dynamic navigation system: A case report. *J Endod*, 45(11), 1397-1402
- Groth, C., Kravitz, N. D., Jones, P. E., Graham, J. W., Redmond, W. R.** (2014): Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod*, 48(8), 475-485
- Hargreaves, K. M., Berman, L. H.** (2015): Cohen's pathways of the pulp expert consult. Elsevier Health Sciences, St. Louis, Missouri, S. 130-208
- Hassan, B., Metska, M. E., Ozok, A. R., van der Stelt, P., Wesselink, P. R.** (2009): Detection of vertical root fractures in endodontically treated teeth by a cone beam computed tomography scan. *J Endod*, 35(5), 719-722
- Hellwig, E., Schäfer, E., Klimek, J., Attin, T.** (2018a): Einführung in die Zahnerhaltung Prüfungswissen Kariologie und Parodontologie. Deutscher Ärzte-Verlag GmbH, Berlin, S. 339-341
- Hellwig, E., Schäfer, E., Klimek, J., Attin, T.** (2018b): Einführung in die Zahnerhaltung Prüfungswissen Kariologie und Parodontologie. Deutscher Ärzte-Verlag GmbH, Berlin, S. 343-350
- Hellwig, E., Schäfer, E., Klimek, J., Attin, T.** (2018c): Einführung in die Zahnerhaltung Prüfungswissen Kariologie und Parodontologie. Deutscher Ärzte-Verlag GmbH, Berlin, S. 371-388
- Hellwig, E., Schäfer, E., Klimek, J., Attin, T.** (2018d): Einführung in die Zahnerhaltung Prüfungswissen Kariologie und Parodontologie. Deutscher Ärzte-Verlag GmbH, Berlin, S. 403-462
- Howe, C. A., McKendry, D. J.** (1990): Effect of endodontic access preparation on resistance to crown-root fracture. *J Am Dent Assoc*, 121(6), 712-715
- Hülsmann, M.** (2008): Endodontie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 75-79
- Hülsmann, M., Schäfer, E., Michael, A., Attin, T., Claudia, B.-Z., Jan, B., Kerstin, B., Sebastian, B.** (2019): Probleme in der Endodontie : Prävention, Identifikation und Management. 2. ed. Quintessence Publishing, Berlin, S. 149-176
- International Organization for Standardization** (1994) Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions (ISO 5725-1:1994) [Internet]. 12/1994. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:en> [zitiert am 30. April 2021]
- Jain, S. D., Carrico, C. K., Bermanis, I.** (2020): 3-Dimensional accuracy of dynamic navigation technology in locating calcified canals. *J Endod*, 46(6), 839-845
- Johnson, B. R.** (2009): Endodontic access. *Gen Dent*, 57(6), 570-577

- Kamburoglu, K., Kursun, S., Akarslan, Z. Z.** (2011): Dental students' knowledge and attitudes towards cone beam computed tomography in Turkey. *Dentomaxillofac Radiol*, 40(7), 439-443
- Karjodkar, F. R.** (2019): Essentials of oral and maxillofacial radiology. Jaypee Brothers Medical Publishers, New Delhi, S. 127-250
- Kehoe, J. C.** (1985): Student endodontic access cavity preparation: performance versus perception. *J Endod*, 11(4), 188-190
- Kinney, J. H., Marshall, S. J., Marshall, G. W.** (2003): The mechanical properties of human dentin: a critical review and re-evaluation of the dental literature. *Crit Rev Oral Biol Med*, 14(1), 13-29
- Koçkapan, C.** (2003a): Curriculum Endodontie. Quintessence Publishing, Berlin, S. 45-110
- Koçkapan, C.** (2003b): Curriculum Endodontie. Quintessence Publishing, Berlin, S. 213-250
- Kohn, W. G., Harte, J. A., Malvitz, D. M., Collins, A. S., Cleveland, J. L., Eklund, K. J., Centers for Disease, C., Prevention** (2004): Guidelines for infection control in dental health care settings--2003. *J Am Dent Assoc*, 135(1), 33-47
- Kottoor, J., Hemamalathi, S., Sudha, R., Velmurugan, N.** (2010): Maxillary second molar with 5 roots and 5 canals evaluated using cone beam computerized tomography: a case report. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 109(2), 162-165
- Krasner, P., Rankow, H. J.** (2004): Anatomy of the pulp-chamber floor. *J Endod*, 30(1), 5-16
- Krasner, P., Rankow, H., Abrams, E.** (2010): Access opening and canal location. American Association of Endodontists, Chicago, USA
- Krishan, R., Paque, F., Ossareh, A., Kishen, A., Dao, T., Friedman, S.** (2014): Impacts of conservative endodontic cavity on root canal instrumentation efficacy and resistance to fracture assessed in incisors, premolars, and molars. *J Endod*, 40(8), 1160-1166
- Kroger, E., Dekiff, M., Dirksen, D.** (2017): 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice. *Eur J Dent Educ*, 21(4), 119-125
- Krug, R., Connert, T., Beinicke, A., Soliman, S., Schubert, A., Kiefner, P., Sonntag, D., Weiger, R., Krastl, G.** (2019): When and how do endodontic specialists use cone-beam computed tomography? *Aust Endod J*, 45(3), 365-372
- Krupp, C., Bargholz, C., Brusehaber, M., Hülsmann, M.** (2013): Treatment outcome after repair of root perforations with mineral trioxide aggregate: a retrospective evaluation of 90 teeth. *J Endod*, 39(11), 1364-1368

- Kvinnslund, I., Oswald, R. J., Halse, A., Gronningsaeter, A. G.** (1989): A clinical and roentgenological study of 55 cases of root perforation. *Int Endod J*, 22(2), 75-84
- Lofthag-Hansen, S., Huumonen, S., Grondahl, K., Grondahl, H. G.** (2007): Limited cone-beam CT and intraoral radiography for the diagnosis of periapical pathology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 103(1), 114-119
- Matherne, R. P., Angelopoulos, C., Kulild, J. C., Tira, D.** (2008): Use of cone-beam computed tomography to identify root canal systems in vitro. *J Endod*, 34(1), 87-89
- Michetti, J., Maret, D., Mallet, J. P., Diemer, F.** (2010): Validation of cone beam computed tomography as a tool to explore root canal anatomy. *J Endod*, 36(7), 1187-1190
- Mookhtiar, H., Hegde, V., Srilatha, S., Chopra, M.** (2019): Conservative endodontics: a truss access case series. *Int J Appl Dent Sci*, 5(4), 213-218
- Mota de Almeida, F. J., Knutsson, K., Flygare, L.** (2014): The effect of cone beam CT (CBCT) on therapeutic decision-making in endodontics. *Dentomaxillofac Radiol*, 43(4), 20130137
- Nadeau, B., Jung, D., Vora, V.** (2019): Trends towards conservative endodontic treatment. *Oral Health*, 109, 30-45
- Nakata, K., Naitoh, M., Izumi, M., Ariji, E., Nakamura, H.** (2009): Evaluation of correspondence of dental computed tomography imaging to anatomic observation of external root resorption. *J Endod*, 35(11), 1594-1597
- Nassri, M. R., Carlik, J., da Silva, C. R., Okagawa, R. E., Lin, S.** (2008): Critical analysis of artificial teeth for endodontic teaching. *J Appl Oral Sci*, 16(1), 43-49
- Neelakantan, P., Khan, K., Hei Ng, G. P., Yip, C. Y., Zhang, C., Pan Cheung, G. S.** (2018): Does the orifice-directed dentin conservation access design debride pulp chamber and mesial root canal systems of mandibular molars similar to a traditional access design? *J Endod*, 44(2), 274-279
- Nicholls, E.** (1962): Treatment of traumatic perforations of the pulp cavity. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 15(5), 603-612
- Pasler, F. A.** (2008): *Zahnärztliche Radiologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 98-110
- Passos, L., Meiga, S., Brigagao, V., Street, A.** (2019): Impact of different scanning strategies on the accuracy of two current intraoral scanning systems in complete-arch impressions: an in vitro study. *Int J Comput Dent*, 22(4), 307-319
- Patel, K., Mannocci, F., Patel, S.** (2016): The assessment and management of external cervical resorption with periapical radiographs and cone-beam computed tomography: a clinical study. *J Endod*, 42(10), 1435-1440

- Patel, S., Rhodes, J.** (2007): A practical guide to endodontic access cavity preparation in molar teeth. *Br Dent J*, 203(3), 133-140
- Patel, S., Wilson, R., Dawood, A., Foschi, F., Mannocci, F.** (2012): The detection of periapical pathosis using digital periapical radiography and cone beam computed tomography - part 2: a 1-year post-treatment follow-up. *Int Endod J*, 45(8), 711-723
- Patel, S., Durack, C., Abella, F., Roig, M., Shemesh, H., Lambrechts, P., Lemberg, K.** (2014): European society of endodontontology position statement: the use of CBCT in endodontics. *Int Endod J*, 47(6), 502-504
- Paurazas, S. B., Geist, J. R., Pink, F. E., Hoen, M. M., Steiman, H. R.** (2000): Comparison of diagnostic accuracy of digital imaging by using CCD and CMOS-APS sensors with E-speed film in the detection of periapical bony lesions. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 89(3), 356-362
- Pierrisnard, L., Bohin, F., Renault, P., Barquins, M.** (2002): Corono-radicular reconstruction of pulpless teeth: a mechanical study using finite element analysis. *J Prosthet Dent*, 88(4), 442-448
- Plotino, G., Grande, N. M., Isufi, A., Ioppolo, P., Pedulla, E., Bedini, R., Gambarini, G., Testarelli, L.** (2017): Fracture strength of endodontically treated teeth with different access cavity designs. *J Endod*, 43(6), 995-1000
- Pschyrembel, W.** (2019): *Klinisches Wörterbuch mit klinischen Syndromen und Nomina Anatomica*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin
- Rankow, H. J., Krasner, P. R.** (1995): The access box: an ah-ha phenomenon. *J Endod*, 21(4), 212-214
- Reeh, E. S., Messer, H. H., Douglas, W. H.** (1989): Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod*, 15(11), 512-516
- Reymus, M., Fotiadou, C., Kessler, A., Heck, K., Hickel, R., Diegritz, C.** (2019): 3D printed replicas for endodontic education. *Int Endod J*, 52(1), 123-130
- Reymus, M., Stawarczyk, B., Winkler, A., Ludwig, J., Kess, S., Krastl, G., Krug, R.** (2020): A critical evaluation of the material properties and clinical suitability of in-house printed and commercial tooth replicas for endodontic training. *Int Endod J*, 53(10), 1446-1454
- Rodriguez, G., Patel, S., Duran-Sindreu, F., Roig, M., Abella, F.** (2017): Influence of cone-beam computed tomography on endodontic retreatment strategies among general dental practitioners and endodontists. *J Endod*, 43(9), 1433-1437
- Rover, G., Belladonna, F. G., Bortoluzzi, E. A., De-Deus, G., Silva, E., Teixeira, C. S.** (2017): Influence of access cavity design on root canal detection, instrumentation efficacy, and fracture resistance assessed in maxillary molars. *J Endod*, 43(10), 1657-1662

- Sabeti, M., Kazem, M., Dianat, O., Bahrololumi, N., Beglou, A., Rahimipour, K., Dehnavi, F.** (2018): Impact of access cavity design and root canal taper on fracture resistance of endodontically treated teeth: An ex vivo investigation. *J Endod*, 44(9), 1402-1406
- Sano, H., Ciucchi, B., Matthews, W. G., Pashley, D. H.** (1994): Tensile properties of mineralized and demineralized human and bovine dentin. *J Dent Res*, 73(6), 1205-1211
- Schlénz, M. A., Vogler, J. A. H., Schmidt, A., Rehmann, P., Wostmann, B.** (2019): Chairside measurement of the marginal and internal fit of crowns: a new intraoral scan-based approach. *Clin Oral Investig*, 24(7), 2459-2468
- Schmidt, A., Benedict, C. R., Schlénz, M. A., Rehmann, P., Wostmann, B.** (2019): Torsion and linear accuracy in intraoral scans obtained with different scanning principles. *J Prosthodont Res*, 64(2), 167-174
- Sedgley, C. M., Messer, H. H.** (1992): Are endodontically treated teeth more brittle? *J Endod*, 18(7), 332-335
- Seltzer, S., Sinai, I., August, D.** (1970): Periodontal effects of root perforations before and during endodontic procedures. *J Dent Res*, 49(2), 332-339
- Setzer, F. C., Hinckley, N., Kohli, M. R., Karabucak, B.** (2017): A survey of cone-beam computed tomographic use among endodontic practitioners in the United States. *J Endod*, 43(5), 699-704
- Shahbazian, M., Jacobs, R., Wyatt, J., Willems, G., Pattijn, V., Dhoore, E., C, V. A. N. L., Vinckier, F.** (2010): Accuracy and surgical feasibility of a CBCT-based stereolithographic surgical guide aiding autotransplantation of teeth: in vitro validation. *J Oral Rehabil*, 37(11), 854-859
- Sherwood, I. A.** (2012): Pre-operative diagnostic radiograph interpretation by general dental practitioners for root canal treatment. *Dentomaxillofac Radiol*, 41(1), 43-54
- Silva, E., Rover, G., Belladonna, F. G., De-Deus, G., da Silveira Teixeira, C., da Silva Fidalgo, T. K.** (2018): Impact of contracted endodontic cavities on fracture resistance of endodontically treated teeth: a systematic review of in vitro studies. *Clin Oral Investig*, 22(1), 109-118
- Silveira, C. M., Sanchez-Ayala, A., Lagravere, M. O., Pilatti, G. L., Gomes, O. M.** (2008): Repair of furcal perforation with mineral trioxide aggregate: long-term follow-up of 2 cases. *J Can Dent Assoc*, 74(8), 729-733
- Sousa, T. O., Haiter-Neto, F., Nascimento, E. H. L., Peroni, L. V., Freitas, D. Q., Hassan, B.** (2017): Diagnostic accuracy of periapical radiography and cone-beam computed tomography in identifying root canal configuration of human premolars. *J Endod*, 43(7), 1176-1179
- Spenst, A., Kahn, H.** (1979): The use of a plastic block for teaching root canal instrumentation and obturation. *J Endod*, 5(9), 282-284

- Tamse, A., Kaffe, I., Fishel, D.** (1980): Zygomatic arch interference with correct radiographic diagnosis in maxillary molar endodontics. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 50(6), 563-566
- Tavares, L. G., Lima, S. M. F., Lima, M. G., Arruda, M. P., Menegazzi, T. C., Rezende, T. M. B.** (2019): Undergraduate dentistry students' perception of difficulties regarding endodontic treatment. *Aust Endod J*, 45(1), 98-105
- Tchorz, J. P.** (2017): 3D Endo: three-dimensional endodontic treatment planning. *Int J Comput Dent*, 20(1), 87-92
- Tchorz, J. P., Wolgin, M., Karygianni, L., Vach, K., Altenburger, M. J.** (2018): Accuracy of CBCT-based root canal length predetermination using new endodontic planning software compared to measurements performed with an electronic apex locator ex vivo. *Int J Comput Dent*, 21(4), 323-328
- Tchorz, J. P., Brandl, M., Ganter, P. A., Karygianni, L., Polydorou, O., Vach, K., Hellwig, E., Altenburger, M. J.** (2015): Pre-clinical endodontic training with artificial instead of extracted human teeth: does the type of exercise have an influence on clinical endodontic outcomes? *Int Endod J*, 48(9), 888-893
- Tolentino, E. S., Yamashita, F. C., de Albuquerque, S., Walewski, L. A., Iwaki, L. C. V., Takeshita, W. M., Silva, M. C.** (2018): Reliability and accuracy of linear measurements in cone-beam computed tomography using different software programs and voxel sizes. *J Conserv Dent*, 21(6), 607-612
- Toure, B., Faye, B., Kane, A. W., Lo, C. M., Niang, B., Boucher, Y.** (2011): Analysis of reasons for extraction of endodontically treated teeth: a prospective study. *J Endod*, 37(11), 1512-1515
- Tsesis, I., Fuss, Z.** (2006): Diagnosis and treatment of accidental root perforations. *Endod Topics*, 13(1), 95-107
- Tsesis, I., Rosenberg, E., Faivishevsky, V., Kfir, A., Katz, M., Rosen, E.** (2010): Prevalence and associated periodontal status of teeth with root perforation: a retrospective study of 2,002 patients' medical records. *J Endod*, 36(5), 797-800
- Uraba, S., Ebihara, A., Komatsu, K., Ohbayashi, N., Okiji, T.** (2016): Ability of cone-beam computed tomography to detect periapical lesions that were not detected by periapical radiography: a retrospective assessment according to tooth group. *J Endod*, 42(8), 1186-1190
- Vaz de Souza, D., Schirru, E., Mannocci, F., Foschi, F., Patel, S.** (2017): External cervical resorption: A comparison of the diagnostic efficacy using 2 different cone-beam computed tomographic units and periapical radiographs. *J Endod*, 43(1), 121-125
- Viana Wanzeler, A. M., Montagner, F., Vieira, H. T., Dias da Silveira, H. L., Arus, N. A., Vizzotto, M. B.** (2019): Can Cone-beam Computed Tomography change endodontists' level of confidence in diagnosis and treatment planning? A before and after study. *J Endod*, 46(2), 283-288

- Weber, T.** (2016): Memorix Zahnmedizin. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 397-446
- Weine, F. S., Kelly, R. F., Lio, P. J.** (1975): The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape. *J Endod*, 1(8), 255-262
- Weller, R. N., Hartwell, G. R.** (1989): The impact of improved access and searching techniques on detection of the mesiolingual canal in maxillary molars. *J Endod*, 15(2), 82-83
- Wongkhanee, S., Patanapiradej, V., Maneenut, C., Tantbirojn, D.** (2006): Effect of acidic food and drinks on surface hardness of enamel, dentine, and tooth-coloured filling materials. *J Dent*, 34(3), 214-220
- Zhang, Y., Liu, Y., She, Y., Liang, Y., Xu, F., Fang, C.** (2019a): The effect of endodontic access cavities on fracture resistance of first maxillary molar using the extended finite element method. *J Endod*, 45(3), 316-321
- Zhang, Z. C., Li, P. L., Chu, F. T., Shen, G.** (2019b): Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *J Orofac Orthop*, 80(4), 194-204

7 Anhang

7.1 Auswahl der Prüfkörper

Tabelle 8: Eigenschaften der verwendeten Prüfkörper.

	Zahnguppe	Variante	Intern	Anatomische Besonderheit	
1.	Frontzahn; FDI 11	Variante 1	Dose001	1 Wurzel, 1 Kanal	 
2.	Frontzahn; FDI 11	Variante 2	Dose002	1 Wurzel, 1 Kanal (koronal stark oblitteriert)	 
3.	Frontzahn; FDI 11	Variante 3	Dose052	1 Wurzel, 1 Kanal	 
4.	Prämolar; FDI 24	Variante 1	Dose034	1 Wurzel, 1 Kanal (schlitzförmig)	 
5.	Prämolar; FDI 24	Variante 2	Dose037	3 Wurzel, 3 Kanäle (2 koronale, 3 apikale Kanäle; mesial starke konkave Einziehung der Wurzel)	 
6.	Prämolar; FDI 24	Variante 3	Dose052	2 Wurzel, 2 Kanäle	 
7.	Molar; FDI 26	Variante 1	R.Intakt	3 Wurzeln, 3 Kanäle (Kanäle MB1 +MB2 in einem Kanal)	 
8.	Molar; FDI 26	Variante 2	Leppsoo	2 Wurzeln, 3 Kanäle	 
9.	Molar; FDI 26	Variante 3	R. Abrasion	3 Wurzeln, 3 Kanäle (oblitterierte Pulpakammer)	 

7.2 Probandenschemata

Tabelle 9: Exemplarisches Behandlungsschema der Erfahrungsstufe „Studierende“ vor der Randomisierung.

Proband 1			Proband 2			Proband 3		
Frontzahn	Variante 1	2D	Frontzahn	Variante 2	2D	Frontzahn	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Prämolar	Variante 1	2D	Prämolar	Variante 2	2D	Prämolar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Molar	Variante 1	2D	Molar	Variante 2	2D	Molar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Proband 4			Proband 5			Proband 6		
Frontzahn	Variante 1	2D	Frontzahn	Variante 2	2D	Frontzahn	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Prämolar	Variante 1	2D	Prämolar	Variante 2	2D	Prämolar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Molar	Variante 1	2D	Molar	Variante 2	2D	Molar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Proband 7			Proband 8			Proband 9		
Frontzahn	Variante 1	2D	Frontzahn	Variante 2	2D	Frontzahn	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Prämolar	Variante 1	2D	Prämolar	Variante 2	2D	Prämolar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Molar	Variante 1	2D	Molar	Variante 2	2D	Molar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Proband 10			Proband 11			Proband 12		
Frontzahn	Variante 1	2D	Frontzahn	Variante 2	2D	Frontzahn	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Prämolar	Variante 1	2D	Prämolar	Variante 2	2D	Prämolar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS
Molar	Variante 1	2D	Molar	Variante 2	2D	Molar	Variante 3	2D
	Variante 2	3D		Variante 3	3D		Variante 1	3D
	Variante 3	PS		Variante 1	PS		Variante 2	PS

7.3 Fragebogen

Umfrage

https://ww2.unipark.de/uc/jconrad_UKSH_Campus_Kiel/1709/ospe.p...



Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie, Direktor: Prof. Dr. C. Dörfer
UKSH, Campus Kiel, Arnold-Heller-Straße 3, Haus 26, D-24105 Kiel

Herzlich Willkommen und vielen Dank für Ihre Teilnahme:



Ihre Aufgabenstellung:

Bitte legen Sie an den folgenden 3D-gedruckten Zähnen eine **primäre** Zugangskavität mit den folgenden Vorgaben an:

- das Anlegen der Kavität erfolgt nach bestem Wissen und Gewissen,
- mit einem rot beringten und diamantierten Zylinder bei maximal **20.000 Umdrehung/Minute**,
- das Pulpakammerdach vollständig entfernen,
- Auffinden der Kanäle,
- Beantwortung der Fragen nach der jeweiligen Trepanation.

Bitte beachten Sie:

- aus Gründen der Druckbarkeit enthalten die Zähne sogenannten Spüllöcher, diese befinden sich an anatomisch unrelevanten Wandbereichen,
- kleine Reste von nicht abgebundenen Kunsstoff können sich in der Pulpakammer befinden
- die Kanäle sind mit Feilen sondierbar,
- die entsprechenden anatomischen Strukturen entnehmen Sie der Ihnen zur Verfügung gestellten bildgebenden Diagnostik,
- es gibt keine Zeitvorgabe,
- es können gleiche Zahngruppen vorkommen aber nicht die gleichen Zähne,
- nach den ersten 4 trepanierten Zähnen erfolgt eine Pause,
- evtl. vorhandene Lupenbrillen können genutzt werden.

Mit dem Klick auf "Weiter" beginnt der Versuch!



Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie, Direktor: Prof. Dr. C. Dörfer
UKSH, Campus Kiel, Arnold-Heller-Straße 3, Haus 26, D-24105 Kiel

Bitte geben Sie die Ihnen zugeteilte Studien-Identifikationsnummer an.
Bitte die entsprechende Nummer mit Tastatur eingeben.

Bitte geben Sie an, mit welcher Nummer der Halter gekennzeichnet ist, der in der Phantomeinheit eingespannt ist.

Bitte die entsprechende Zahl mit Tastatur eingeben.

Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an.

Bitte klicken Sie die zutreffende Angabe an.

- Weiblich
- Männlich
- Divers

Benutzen Sie während der Teilnahme an dieser Studie eine Luppenbrille?

Bitte klicken Sie zutreffende Angabe an.

- Ja
- Nein

Mit welcher Hand führen Sie das Winkelstück?

Bitte klicken Sie zutreffende Angabe an.

- Rechtshänder
- Linkshänder
- Beidhänder

Bitte geben Sie Ihre Zugehörigkeit zu nachfolgenden Gruppen an.

Bitte klicken Sie zutreffende Gruppe an.

- Studierende/r
- Zahnarzt/Zahnärztin
- Zahnarzt/Zahnärztin mit endodontischem Tätigkeitsschwerpunkt

Seit wieviele Jahre besitzen Sie eine zahnärztliche berufliche Erfahrung?
Bitte klicken Sie zutreffende Gruppe an.

- Keine Berufserfahrung
- Weniger als 1 Jahr
- 1 Jahr
- 2 Jahre
- 2 - 5 Jahre
- mehr als 5 Jahre

Wieviele endodontische Behandlungen nehmen Sie pro Woche vor?
Bitte klicken Sie zutreffende Gruppe an.

- Keine
- Weniger als eine Behandlung
- eine Behandlung
- bis zu 5 Behandlungen
- mehr als 5 Behandlungen



Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie, Direktor: Prof. Dr. C. Dörfer
UKSH, Campus Kiel, Arnold-Heller-Straße 3, Haus 26, D-24105 Kiel

Trepanation 1:

Bitte entnehmen Sie der bildgebenden Diagnostik die für Sie wichtigen Informationen und führen Sie jetzt die Trepanation am vorgegeben Zahn durch.

Sobald Sie die primäre Zugangskavität abgeschlossen haben und Ihr Ergebnis dabei belassen möchten, beantworten Sie die folgenden Fragen:

Bitte geben Sie für diese Trepanation an, wie hilfreich die bildgebende Diagnostik beim Anlegen der Zugangskavität war.

Bitte den Schieberegler entsprechend positionieren.



Sind Sie der Meinung, alle Kanaleingänge gefunden zu haben?

Bitte klicken Sie zutreffende Angabe an.

- Ja
- Nein



Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie, Direktor: Prof. Dr. C. Dörfer
UKSH, Campus Kiel, Arnold-Heller-Straße 3, Haus 26, D-24105 Kiel

Bitte ranken Sie die drei verschiedenen Bildgebungsmethoden hinsichtlich der gefühlten Sicherheit beim Anlegen einer Zugangskavität.

Bitte die entsprechenden Methoden entsprechend anklicken.

Zahnfilm

DVT

Planungssoftware

Bitte ranken Sie die drei verschiedenen Bildgebungsmethoden hinsichtlich der Schnelligkeit in der Anwendung.

Bitte die entsprechenden Methoden entsprechend anklicken.

Zahnfilm

DVT

Planungssoftware

Bitte ranken Sie die drei verschiedenen Bildgebungsmethoden hinsichtlich der Verständlichkeit/Handhabung in der Anwendung.

Bitte die entsprechenden Methoden entsprechend anklicken.

Zahnfilm

DVT

Planungssoftware

7.4 Shore Härte von Formlabs Standard Kunststoffen

Resin Standart White RS-F2-GPWH-04 [ref:_00Di0dMD6._5001Y1Ei...]

Betreff: Resin Standart White RS-F2-GPWH-04 [ref:_00Di0dMD6._5001Y1Eip45:ref]

Von: "support@formlabs.com" <support@formlabs.com>

Datum: 27.05.2019, 13:02

An: "p...@googlemail.com" <p...@googlemail.com>

Hallo Herr Glandorf,

vielen Dank für die Rückmeldung. Die Shore Härte/ Durometer Wert beträgt bei unseren Standardharzen 87D nach dem aushärten. Zu diesen Werten haben wir interne Tests durchgeführt.

Ein erweitertes wissenschaftliches Datenblatt gibt es leider nicht. Tut mir leid.

Ich hoffe ich konnte Ihnen weiterhelfen.

Mit freundlichen Grüßen

Sima Ahmed

Formlabs Services | Customer Care

[Advanced Form 2 Seminar](#)

[Dental Form 2 Seminar](#)

Please note: Formlabs Services in Berlin will be closed on Thursday, May 30th for Ascension Day. We'll get back to you as soon as possible after the holiday. Thanks for your patience!

Manage your prints and get print status notifications on [Formlabs Dashboard](#). Register today!

Formlabs GmbH - Funkhaus Berlin - Nalepastr 18 12459 Berlin - HRB 166201 B - DE299521578 -
Managing Directors: Luke Winston, Stefan Holländer

7.5 Kalibrierung des diamantierten Bohrers auf den Kunststoffzahn

Als Versuchskörper wurden extrahierte humane Molaren sowie im SLA-Verfahren gedruckte Prüfkörper in Molaren-Form am Gipstrimmer mit einer volldiamantierten Scheibe (Gipstrimmer HSS-88, Wassermann Dental-Maschinen GmbH, Hamburg, D) von koronal bis auf das Fissurenniveau plan geschliffen. Das untere apikale Ende wurde in Gammasil eingebettet (gammasil® PERFECT TEC A85 Base & Katalysator, Müller-Omicron GmbH & Co.KG, Lindlar, D). Die Bearbeitung erfolgte mit einem roten Winkelstück (KAVO 24LN Lux2 INTRAmatic, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D) unter Wasserkühlung an der Phantomeinheit der studentischen Ausbildung (KaVo DSEclinical 5198, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, D) mit den folgenden Schleifkörpern unterschiedlicher Körnung (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Herstellerangaben der eingesetzten Schleifkörper samt Spezifikation.

	Herstellerangaben	Spezifikation
1.	Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Referenznummer: 801 314 018 ISO Normierung: 806 314 001524 018	Form: Kugel Durchmesser (1/10mm): 014 Farbe: blau Körnung (µm): 107
2.	Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Referenznummer: 8801 314 018 ISO Normierung: 806 314 001514 018	Form: Kugel Durchmesser (1/10mm): 014 Farbe: rot Körnung (µm): 46
3.	Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Referenznummer: 801 EF 314 018 ISO Normierung: 806 314 001504 018	Form: Kugel Durchmesser (1/10mm): 014 Farbe: gelb Körnung (µm): 25

Zur Überwachung des Anpressdrucks von maximal 200g oder 2N wurde eine Präzisionswaage genutzt (Sartorius Präzisionswaage Modell CP4201, Sartorius AG, Göttingen, D). Es erfolgten mindestens vier Durchgänge mit jeder Schleifkörper-Gruppe an den zwei unterschiedlichen Versuchskörpern. Für jeden Versuchskörper wurden fabrikneue Diamantschleifer sowohl bei 20.000 Umdrehungen pro Minute (U/min) als auch bei 40.000 U/min benutzt. Die Zeit wurde gestoppt, bis die Kugel

des Diamanten vollständig im Versuchskörper versenkt war. An den humanen Echtzähnen wurde die Kugel jeweils am Übergang zwischen Schmelz und Dentin angesetzt, wodurch sich ein Mischantrag von Schmelz und Dentin gleichzeitig ergab. Vor jedem Durchgang wurde die Waage auf einen neuen Nullwert kalibriert.

Tabelle 11: Ergebnis der Messungen der unterschiedlichen Schleifkörpern.

	Referenz:		Vergleich:							
	Humaner Zahn		Kunstharz-Zahn							
	40.000 U/min	40.000 U/min	20.000U/min		40.000U/min		Kugel Diamant		Kugel Diamant	
	Kugel Diamant		Kugel Diamant		Kugel Diamant		Kugel Diamant		Kugel Diamant	
	Blau: 801 314 018		Rot: 8801 314 018		Rot: 8801 314 018		Gelb: 801EF 314 018			
	1.Durchgang	2.Durchgang	1.Durchgang	2.Durchgang	1.Durchgang	2.Durchgang	1.Durchgang	2.Durchgang	1.Durchgang	2.Durchgang
Messung 1 (Zeit/s)	3,36	4,47	3,57	2,73	5,00	4,30	35,00			
Messung 2 (Zeit/s)	4,53	3,36	3,53	3,22	3,53	5,73	33,58			
Messung 3 (Zeit/s)	3,70	4,83	3,42	3,60	6,33	6,09	37,58			
Messung 4 (Zeit/s)	4,13	4,53	4,19	3,03	4,99	5,23	48,35			
Messung 5 (Zeit/s)	4,02	5,10	/	3,10	5,39	4,53	55,99			
Messung 6 (Zeit/s)	/	4,52	/	2,30	4,23	4,32	48,60			
Messung 7 (Zeit/s)	/	/	/	/	3,13	4,49	/			
Messung 8 (Zeit/s)	/	/	/	/	4,20	/	/			
Mittelwert (Zeit/s)	3,95	4,47	3,68	2,99	4,60	4,31	43,18			
Kumuliert (Zeit/s)	4,21		3,34		4,46		43,18			

Dieser Durchgang wurde abgebrochen, da die Werte deutlich vom geforderten Referenzwert abweichen.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Messungen.

	Umdrehung	Zeit	Prozent
Referenz: humaner Zahn Schleifkörper: 801314018	40.000 U/min	4,21 Sekunden	100 %
Vergleich: Kunststoff - Zahn Schleifkörper: 8801314018	40.000 U/min	3,34 Sekunden	79,33 %
Vergleich: Kunststoff - Zahn Schleifkörper: 8801314018	20.000 U/min	4,46 Sekunden	105,94 %
Vergleich: Kunststoff - Zahn Schleifkörper: 801EF314018	40.000 U/min	43,18 Sekunden	1025,65%

Die Messungen ergaben, dass zwischen dem humanen Zahn mit dem Schleifkörper 801 314 018 mit einer Korngröße von 107µm bei 40.000 U/min am roten Winkelstück und einer durchschnittlichen Versenkungszeit von 4,21 Sekunden, sowie dem Kunstharz-Prüfkörper mit dem Schleifkörper 880 1314 018 mit einer Korngröße von 46µm bei 20.000 U/min im roten Winkelstück mit einer durchschnittlichen Versenkungszeit von 4,46 Sekunden, die Abweichung mit 5,94 Prozent am geringsten ausfiel (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12). Für den Hauptversuch kam daher ein Finierdiamant der Firma Komet mit einer Korngröße von 46µm bei 20.000 Umdrehungen pro Minute im roten Winkelstück zur Anwendung.

7.6 Ergebnisse der Abweichung bei der Ausrichtung der Prüfkörper

7.6.1 Abweichung der einzelnen Prüfkörper

Es wurde die Ausrichtungsabweichung von $n = 306$ Oberflächenscans (9 Prüfkörper x 34 Probanden) erhoben. Zur Ermittlung der Abweichung des Analyse-Programms GOM Inspect (GOM Software 2019, GOM GmbH, Braunschweig, D) nach der einheitlichen Ausrichtung der Oberflächenscans der Prüfkörper, diente die im Programm auslesbare Abweichung in Millimeter (mm; siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Abweichung bei der Ausrichtung der Prüfkörper.

Nr.	Erfahrungsstufe	Studien ID	Zahntyp	Methode	Abweichung (mm)	Nr.	Erfahrungsstufe	Studien ID	Zahntyp	Methode	Abweichung (mm)
1	2	001 Frontzahn	2D	0.0154		52	1	006 Molar	3D	0.0292	
2	2	001 Frontzahn	3D	0.0239		53	1	006 Molar	PS	0.0159	
3	2	001 Frontzahn	PS	0.0236		54	1	006 Molar	2D	0.0170	
4	2	001 Prämolar	2D	0.0258		55	1	007 Frontzahn	2D	0.0183	
5	2	001 Prämolar	3D	0.0205		56	1	007 Frontzahn	3D	0.0202	
6	2	001 Prämolar	PS	0.0153		57	1	007 Frontzahn	PS	0.0214	
7	2	001 Molar	2D	0.0244		58	1	007 Prämolar	2D	0.0168	
8	2	001 Molar	3D	0.0147		59	1	007 Prämolar	3D	0.0182	
9	2	001 Molar	PS	0.0202		60	1	007 Prämolar	PS	0.0199	
10	1	002 Frontzahn	PS	0.0266		61	1	007 Molar	2D	0.0259	
11	1	002 Frontzahn	2D	0.0232		62	1	007 Molar	3D	0.0161	
12	1	002 Frontzahn	3D	0.0266		63	1	007 Molar	PS	0.0191	
13	1	002 Prämolar	PS	0.0199		64	1	008 Frontzahn	3D	0.0111	
14	1	002 Prämolar	2D	0.0243		65	1	008 Frontzahn	PS	0.0150	
15	1	002 Prämolar	3D	0.0274		66	1	008 Frontzahn	2D	0.0185	
16	1	002 Molar	PS	0.0332		67	1	008 Prämolar	3D	0.0161	
17	1	002 Molar	2D	0.0209		68	1	008 Prämolar	PS	0.0189	
18	1	002 Molar	3D	0.0201		69	1	008 Prämolar	2D	0.0191	
19	1	003 Frontzahn	3D	0.0176		70	1	008 Molar	3D	0.0266	
20	1	003 Frontzahn	PS	0.0249		71	1	008 Molar	PS	0.0150	
21	1	003 Frontzahn	2D	0.0290		72	1	008 Molar	2D	0.0228	
22	1	003 Prämolar	3D	0.0234		73	1	009 Frontzahn	2D	0.0201	
23	1	003 Prämolar	PS	0.0214		74	1	009 Frontzahn	3D	0.0136	
24	1	003 Prämolar	2D	0.0238		75	1	009 Frontzahn	PS	0.0198	
25	1	003 Molar	3D	0.0245		76	1	009 Prämolar	2D	0.0154	
26	1	003 Molar	PS	0.0181		77	1	009 Prämolar	3D	0.0192	
27	1	003 Molar	2D	0.0200		78	1	009 Prämolar	PS	0.0196	
28	3	004 Frontzahn	2D	0.0142		79	1	009 Molar	2D	0.0259	
29	3	004 Frontzahn	3D	0.0248		80	1	009 Molar	3D	0.0163	
30	3	004 Frontzahn	PS	0.0159		81	1	009 Molar	PS	0.0160	
31	3	004 Prämolar	2D	0.0132		82	1	010 Frontzahn	2D	0.0043	
32	3	004 Prämolar	3D	0.0279		83	1	010 Frontzahn	3D	0.0182	
33	3	004 Prämolar	PS	0.0282		84	1	010 Frontzahn	PS	0.0179	
34	3	004 Molar	2D	0.0219		85	1	010 Prämolar	2D	0.0151	
35	3	004 Molar	3D	0.0190		86	1	010 Prämolar	3D	0.0200	
36	3	004 Molar	PS	0.0192		87	1	010 Prämolar	PS	0.0212	
37	1	005 Frontzahn	PS	0.0196		88	1	010 Molar	2D	0.0259	
38	1	005 Frontzahn	2D	0.0146		89	1	010 Molar	3D	0.0125	
39	1	005 Frontzahn	3D	0.0208		90	1	010 Molar	PS	0.0231	
40	1	005 Prämolar	PS	0.0175		91	1	011 Frontzahn	PS	0.0193	
41	1	005 Prämolar	2D	0.0184		92	1	011 Frontzahn	2D	0.0177	
42	1	005 Prämolar	3D	0.0179		93	1	011 Frontzahn	3D	0.0202	
43	1	005 Molar	PS	0.0263		94	1	011 Prämolar	PS	0.0143	
44	1	005 Molar	2D	0.0166		95	1	011 Prämolar	2D	0.0110	
45	1	005 Molar	3D	0.0225		96	1	011 Prämolar	3D	0.0188	
46	1	006 Frontzahn	3D	0.0108		97	1	011 Molar	PS	0.0253	
47	1	006 Frontzahn	PS	0.0188		98	1	011 Molar	2D	0.0184	
48	1	006 Frontzahn	2D	0.0199		99	1	011 Molar	3D	0.0248	
49	1	006 Prämolar	3D	0.0163		100	1	012 Frontzahn	3D	0.0132	
50	1	006 Prämolar	PS	0.0154		101	1	012 Frontzahn	PS	0.0179	
51	1	006 Prämolar	2D	0.0210		102	1	012 Frontzahn	2D	0.0195	

Nr.	Erfahrungsstufe	Studien ID	Zahntyp	Methode	Abweichung (mm)	Nr.	Erfahrungsstufe	Studien ID	Zahntyp	Methode	Abweichung (mm)
103	1	012 Prämolar	3D	0.0146		154	3	020 Frontzahn	2D	0.0188	
104	1	012 Prämolar	PS	0.0182		155	3	020 Frontzahn	3D	0.0165	
105	1	012 Prämolar	2D	0.0203		156	3	020 Frontzahn	PS	0.0216	
106	1	012 Molar	3D	0.0243		157	3	020 Prämolar	2D	0.0129	
107	1	012 Molar	PS	0.0125		158	3	020 Prämolar	3D	0.0144	
108	1	012 Molar	2D	0.0127		159	3	020 Prämolar	PS	0.0204	
109	1	014 Frontzahn	PS	0.0098		160	3	020 Molar	2D	0.0283	
110	1	014 Frontzahn	2D	0.0176		161	3	020 Molar	3D	0.0130	
111	1	014 Frontzahn	3D	0.0194		162	3	020 Molar	PS	0.0178	
112	1	014 Prämolar	PS	0.0139		163	2	021 Frontzahn	PS	0.0199	
113	1	014 Prämolar	2D	0.0174		164	2	021 Frontzahn	2D	0.0150	
114	1	014 Prämolar	3D	0.0170		165	2	021 Frontzahn	3D	0.0194	
115	1	014 Molar	PS	0.0261		166	2	021 Prämolar	PS	0.0144	
116	1	014 Molar	2D	0.0153		167	2	021 Prämolar	2D	0.0133	
117	1	014 Molar	3D	0.0233		168	2	021 Prämolar	3D	0.0149	
118	2	015 Frontzahn	PS	0.0131		169	2	021 Molar	PS	0.0255	
119	2	015 Frontzahn	2D	0.0192		170	2	021 Molar	2D	0.0130	
120	2	015 Frontzahn	3D	0.0204		171	2	021 Molar	3D	0.0244	
121	2	015 Prämolar	PS	0.0154		172	2	022 Frontzahn	PS	0.0165	
122	2	015 Prämolar	2D	0.0169		173	2	022 Frontzahn	2D	0.0191	
123	2	015 Prämolar	3D	0.0206		174	2	022 Frontzahn	3D	0.0187	
124	2	015 Molar	PS	0.0285		175	2	022 Prämolar	PS	0.0155	
125	2	015 Molar	2D	0.0148		176	2	022 Prämolar	2D	0.0202	
126	2	015 Molar	3D	0.0159		177	2	022 Prämolar	3D	0.0186	
127	2	016 Frontzahn	3D	0.0192		178	2	022 Molar	PS	0.0245	
128	2	016 Frontzahn	PS	0.0153		179	2	022 Molar	2D	0.0127	
129	2	016 Frontzahn	2D	0.0203		180	2	022 Molar	3D	0.0153	
130	2	016 Prämolar	3D	0.0155		181	2	023 Frontzahn	3D	0.0120	
131	2	016 Prämolar	PS	0.0182		182	2	023 Frontzahn	PS	0.0166	
132	2	016 Prämolar	2D	0.0188		183	2	023 Frontzahn	2D	0.0201	
133	2	016 Molar	3D	0.0266		184	2	023 Prämolar	3D	0.0158	
134	2	016 Molar	PS	0.0168		185	2	023 Prämolar	PS	0.0195	
135	2	016 Molar	2D	0.0218		186	2	023 Prämolar	2D	0.0200	
136	2	017 Frontzahn	3D	0.0178		187	2	023 Molar	3D	0.0283	
137	2	017 Frontzahn	PS	0.0186		188	2	023 Molar	PS	0.0160	
138	2	017 Frontzahn	2D	0.0175		189	2	023 Molar	2D	0.0166	
139	2	017 Prämolar	3D	0.0116		190	2	024 Frontzahn	2D	0.0159	
140	2	017 Prämolar	PS	0.0177		191	2	024 Frontzahn	3D	0.0172	
141	2	017 Prämolar	2D	0.0166		192	2	024 Frontzahn	PS	0.0186	
142	2	017 Molar	3D	0.0264		193	2	024 Prämolar	2D	0.0133	
143	2	017 Molar	PS	0.0173		194	2	024 Prämolar	3D	0.0188	
144	2	017 Molar	2D	0.0267		195	2	024 Prämolar	PS	0.0167	
145	2	018 Frontzahn	2D	0.0120		196	2	024 Molar	2D	0.0283	
146	2	018 Frontzahn	3D	0.0180		197	2	024 Molar	3D	0.0146	
147	2	018 Frontzahn	PS	0.0175		198	2	024 Molar	PS	0.0228	
148	2	018 Prämolar	2D	0.0124		199	2	025 Frontzahn	PS	0.0231	
149	2	018 Prämolar	3D	0.0144		200	2	025 Frontzahn	2D	0.0268	
150	2	018 Prämolar	PS	0.0175		201	2	025 Frontzahn	3D	0.0232	
151	2	018 Molar	2D	0.0267		202	2	025 Prämolar	PS	0.0219	
152	2	018 Molar	3D	0.0115		203	2	025 Prämolar	2D	0.0191	
153	2	018 Molar	PS	0.0157		204	2	025 Prämolar	3D	0.0237	

Nr.	Erfahrungsstufe	Studien ID	Zahntyp	Methode	Abweichung (mm)	Nr.	Erfahrungsstufe	Studien ID	Zahntyp	Methode	Abweichung (mm)
205	2	025 Molar	PS	0.0259		256	3	029 Prämolar	PS	0.0183	
206	2	025 Molar	2D	0.0178		257	3	029 Prämolar	2D	0.0203	
207	2	025 Molar	3D	0.0184		258	3	029 Prämolar	3D	0.0214	
208	1	013 Frontzahn	2D	0.0171		259	3	029 Molar	PS	0.0296	
209	1	013 Frontzahn	3D	0.0185		260	3	029 Molar	2D	0.0181	
210	1	013 Frontzahn	PS	0.0184		261	3	029 Molar	3D	0.0207	
211	1	013 Prämolar	2D	0.0135		262	3	031 Frontzahn	PS	0.0160	
212	1	013 Prämolar	3D	0.0174		263	3	031 Frontzahn	2D	0.0157	
213	1	013 Prämolar	PS	0.0152		264	3	031 Frontzahn	3D	0.0163	
214	1	013 Molar	2D	0.0251		265	3	031 Prämolar	PS	0.0107	
215	1	013 Molar	3D	0.0112		266	3	031 Prämolar	2D	0.0152	
216	1	013 Molar	PS	0.0147		267	3	031 Prämolar	3D	0.0163	
217	3	019 Frontzahn	3D	0.0120		268	3	031 Molar	PS	0.0264	
218	3	019 Frontzahn	PS	0.0176		269	3	031 Molar	2D	0.0112	
219	3	019 Frontzahn	2D	0.0201		270	3	031 Molar	3D	0.0141	
220	3	019 Prämolar	3D	0.0150		271	3	032 Frontzahn	2D	0.0108	
221	3	019 Prämolar	PS	0.0195		272	3	032 Frontzahn	3D	0.0170	
222	3	019 Prämolar	2D	0.0198		273	3	032 Frontzahn	PS	0.0224	
223	3	019 Molar	3D	0.0283		274	3	032 Prämolar	2D	0.0113	
224	3	019 Molar	PS	0.0144		275	3	032 Prämolar	3D	0.0171	
225	3	019 Molar	2D	0.0177		276	3	032 Prämolar	PS	0.0235	
226	2	026 Frontzahn	3D	0.0220		277	3	032 Molar	2D	0.0220	
227	2	026 Frontzahn	PS	0.0238		278	3	032 Molar	3D	0.0131	
228	2	026 Frontzahn	2D	0.0248		279	3	032 Molar	PS	0.0212	
229	2	026 Prämolar	3D	0.0212		280	3	030 Frontzahn	PS	0.0151	
230	2	026 Prämolar	PS	0.0196		281	3	030 Frontzahn	2D	0.0223	
231	2	026 Prämolar	2D	0.0227		282	3	030 Frontzahn	3D	0.0239	
232	2	026 Molar	3D	0.0240		283	3	030 Prämolar	PS	0.0174	
233	2	026 Molar	PS	0.0166		284	3	030 Prämolar	2D	0.0179	
234	2	026 Molar	2D	0.0177		285	3	030 Prämolar	3D	0.0217	
235	2	027 Frontzahn	2D	0.0165		286	3	030 Molar	PS	0.0287	
236	2	027 Frontzahn	3D	0.0201		287	3	030 Molar	2D	0.0166	
237	2	027 Frontzahn	PS	0.0280		288	3	030 Molar	3D	0.0220	
238	2	027 Prämolar	2D	0.0218		289	3	033 Frontzahn	3D	0.0151	
239	2	027 Prämolar	3D	0.0197		290	3	033 Frontzahn	PS	0.0164	
240	2	027 Prämolar	PS	0.0270		291	3	033 Frontzahn	2D	0.0118	
241	2	027 Molar	2D	0.0307		292	3	033 Prämolar	3D	0.0088	
242	2	027 Molar	3D	0.0207		293	3	033 Prämolar	PS	0.0173	
243	2	027 Molar	PS	0.0206		294	3	033 Prämolar	2D	0.0106	
244	3	028 Frontzahn	3D	0.0263		295	3	033 Molar	3D	0.0290	
245	3	028 Frontzahn	PS	0.0242		296	3	033 Molar	PS	0.0192	
246	3	028 Frontzahn	2D	0.0250		297	3	033 Molar	2D	0.0278	
247	3	028 Prämolar	3D	0.0243		298	3	034 Frontzahn	3D	0.0177	
248	3	028 Prämolar	PS	0.0242		299	3	034 Frontzahn	PS	0.0163	
249	3	028 Prämolar	2D	0.0216		300	3	034 Frontzahn	2D	0.0213	
250	3	028 Molar	3D	0.0237		301	3	034 Prämolar	3D	0.0136	
251	3	028 Molar	PS	0.0211		302	3	034 Prämolar	PS	0.0142	
252	3	028 Molar	2D	0.0194		303	3	034 Prämolar	2D	0.0213	
253	3	029 Frontzahn	PS	0.0130		304	3	034 Molar	3D	0.0277	
254	3	029 Frontzahn	2D	0.0207		305	3	034 Molar	PS	0.0205	
255	3	029 Frontzahn	3D	0.0204		306	3	034 Molar	2D	0.0128	

7.6.2 Statistische Auswertung der Abweichung der Prüfkörper

Die statistische Auswertung der Abweichung erfolgte durch GraphPad Prism (GraphPad Prism Version 9.0.2 für Windows, GraphPad Software, San Diego, USA). Eine statistische Signifikanz liegt bei $p<0,05$ vor. In Bezug auf die Zahnguppe, die Erfahrungsstufe und die diagnostische Bildgebung erfolgte eine Varianzanalyse (ANOVA One-Way). Durch einen multiplen Vergleichstest (Kruskal-Wallis Test) wurden signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen bzw. Stufen und Bildgebungen angezeigt. Die Abweichung in Millimeter (mm) wurden grafisch als Balken-Diagramm dargestellt.

7.6.2.1 Abweichung der Ausrichtung der Prüfkörper in Bezug zur Zahngruppe

Die Auswertung der einheitlichen Ausrichtung der Prüfkörper im Bezug zur Zahngruppe mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests zeigte keine signifikante Abweichung zwischen Frontzähnen und Prämolaren (MW: $0,0186 \pm 0,0043$ mm vs. MW: $0,0182 \pm 0,0040$ mm; $p > 0,9999$), wohingegen ein signifikanter Unterschied zwischen Prämolaren und Molaren (MW $0,0182 \pm 0,0040$ mm vs. MW $0,0207 \pm 0,0054$ mm $p=0,0026$) und auch zwischen Frontzähnen und Molaren vorlag (MW: $0,186 \pm 0,0043$ mm vs. MW $0,02067 \pm 0,0054$ mm; $p=0,0410$; siehe Tabelle 14 und Diagramm 8).

Tabelle 14: Deskriptive Statistik der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur Zahngruppe.

Statistik	Frontzahn	Prämolar	Molar
Anzahl der Prüfkörper (n)	102	102	102
Minimum (mm)	0,0043	0,0088	0,0112
Median (mm)	0,01855	0,0182	0,02055
Maximum (mm)	0,029	0,0282	0,0332
Mittelwert (mm)	0,0186	0,01815	0,02069
Std. Abweichung (mm)	0,004285	0,003958	0,005384

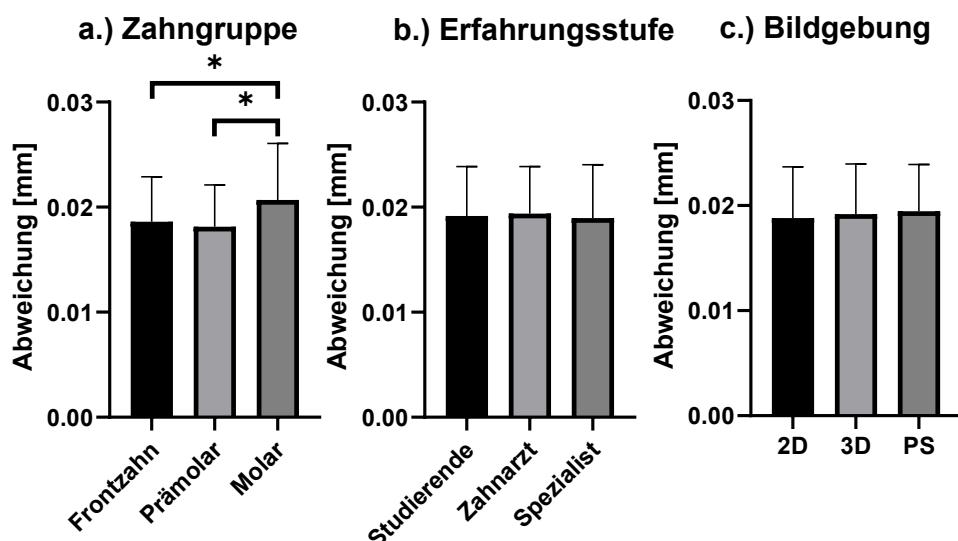


Diagramm 8: Auswertung der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur Zahngruppe (a.), zur Erfahrungsstufe (b.) und zur Bildgebung (c.); (*) = signifikant unterschiedlich.

7.6.2.2 Abweichung der Prüfkörper in Bezug zur Erfahrungsstufe

Die Auswertung der einheitlichen Ausrichtung der Prüfkörper im Bezug zur Erfahrungsstufe zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen den Studierenden und Zahnärzten (MW: $0,01916 \pm 0,0047$ mm vs. MW: $0,01939 \pm 0,0045$ mm; $p > 0,9999$) noch zwischen Zahnärzten und Spezialisten (MW: $0,01939 \pm 0,0045$ mm vs. MW: $0,0190 \pm 0,0051$ mm; $p > 0,9999$) als auch nicht zwischen Studierenden und Spezialisten (MW: $0,01916 \pm 0,0047$ mm vs. MW: $0,0190 \pm 0,0051$ mm; $p > 0,9999$; siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Deskriptive Statistik der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur Erfahrungsstufe der Behandler.

Statistik	Studierende	Zahnarzt	Spezialist
Anzahl der Prüfkörper (n)	108	108	90
Minimum (mm)	0,0043	0,0100	0,008800
Median (mm)	0,01915	0,01930	0,01910
Maximum (mm)	0,03320	0,03070	0,03000
Mittelwert (mm)	0,01916	0,01939	0,01897
Std. Abweichung (mm)	0,004704	0,004486	0,005057

7.6.2.3 Abweichung der Prüfkörper in Bezug zur diagnostischen Bildgebung

Die Auswertung der einheitlichen Ausrichtung der Prüfkörper in Bezug zur diagnostischen Bildgebung zeigte weder einen signifikanten Unterschied zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der dentalen digitalen Volumentomographie (2D MW: $0,0188 \pm 0,0049$ mm vs. 3D MW: $0,0192 \pm 0,0048$ mm; $p > 0,9999$) noch zwischen der konventionellen Röntgenbildtechnik und der endodontischen Planungssoftware (2D MW: $0,0188 \pm 0,0049$ mm vs. PS MW: $0,0195 \pm 0,0045$ mm; $p > 0,9999$) als auch nicht zwischen der dentalen digitalen Volumentomographie und der endodontischen Planungssoftware (3D MW: $0,0192 \pm 0,0048$ mm vs. PS MW: $0,0195 \pm 0,0045$ mm; $p > 0,9999$; siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Deskriptive Statistik der Verlässlichkeit der Überlagerung in Bezug zur diagnostischen Bildgebung.

Statistik	2D	3D	PS
Anzahl der Prüfkörper (n)	102	102	102
Minimum (mm)	0,0043	0,0088	0,0098
Median (mm)	0,1865	0,01880	0,01870
Maximum (mm)	0,03070	0,02920	0,03320
Mittelwert (mm)	0,01880	0,01919	0,01945
Std. Abweichung (mm)	0,004876	0,004787	0,004451

7.6.3 Zusammenfassung der Abweichung der Prüfkörper

Die Auswertung der Abweichung der einzelnen Prüfkörper zeigte, dass die gesamte Spannweite aller Abweichungen zwischen 4µm und 33µm lag. Ein Vergleich der Zahnguppen machte die Schwierigkeit bei Molaren deutlich, diese deckungsgleich auszurichten. Die Spannweite der Abweichung reichte von 11µm bis 33µm. Betrachtete man die Ausrichtung bezogen auf die Erfahrungsstufe der Behandler und auf die unterschiedlichen diagnostischen Bildgebungen, so lag hier die Abweichung bei circa 19µm und war jeweils ohne signifikanten Unterschied. Die Abweichungen durch die Überlagerung der Prüfkörper hatten somit keinen Einfluss auf die Aussagekraft der ausgewerteten Daten bezogen auf die Erfahrungsstufe und bezogen auf die diagnostische Bildgebung.

7.7 Protokoll zur Erstellung der Prüfkörper

Es wurden für jede künstliche Alveole des Ober- und Unterkiefermodells Prüfkörper erstellt. Jeder Prüfkörper setzte sich aus drei unterschiedlichen Dateien zusammen. Zum einen aus der an den humanen Zahn ausgerichteten Oberflächenkopie samt Pulpa und Wurzelkanälen im STL-Format (ausgerichtete STL-Zahn-Kopie), außerdem aus einer Art künstlichen Gingiva, die eine Begrenzung zwischen koronalem und apikalem Anteil der Zahn-Kopie darstellte und zum anderen aus einem Gleit- und Führungsmechanismus für das Einführen und eindeutige Positionieren in der künstlichen Alveole des Modellhalters. Diese Dateien wurden einzeln entworfen und später zu einem druckbaren Prüfkörper zusammengefügt (siehe Abbildung 10).

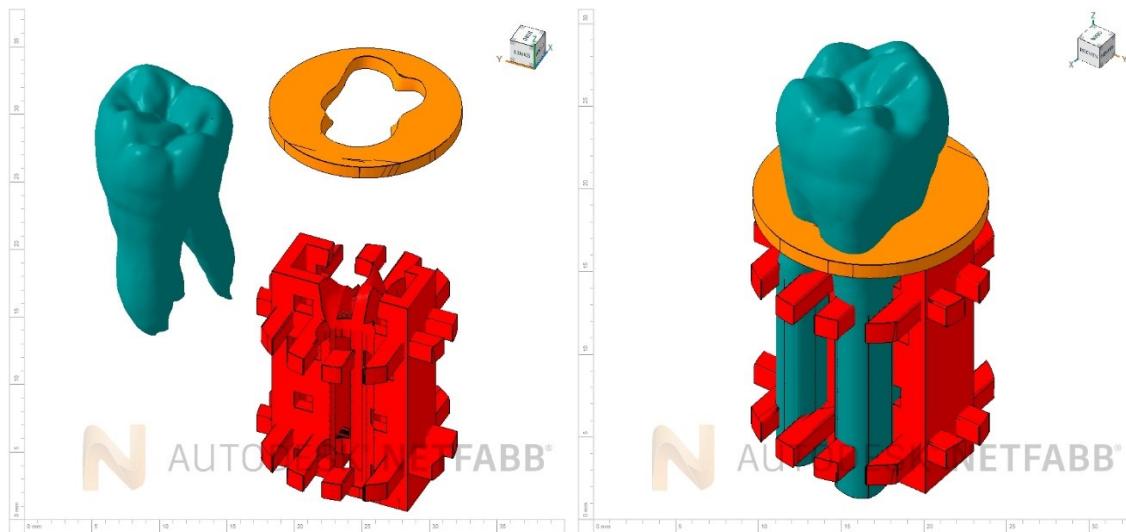


Abbildung 10: Der Prüfkörper setzte sich aus der ausgerichteten STL – Zahn-Kopie (türkis), aus der künstlichen Gingiva (orange) und dem Gleit und Führungsmechanismus (rot) für das Einführen in die künstliche Alveole des Modellhalters zusammen.

Der Modellhalter (aus 2.4.1), die STL-Zahn-Kopie (aus 2.4.2.1) sowie der Oberflächenscan (aus 2.4.2.3) wurden zueinander in Beziehung gebracht. Die Lageinformation des Modellhalters diente als Ausgangswert und alle weiteren Ausrichtungen orientierten sich an dieser Grundlage. Zuerst wurde der Oberflächenscan an den Modellhalter angepasst und in einem weiteren Schritt die STL-Zahn-Kopie an den bereits angepassten Oberflächenscan.

Für jeden Zahn wurde dafür der Modellhalter im STL-Format zusammen mit dem Oberflächenscan des humanen Zahnes in das Programm Meshlab (Meshlab, Version 2016.12, Institute of Information Science and Technology (ISTI), Consiglio Nazionale

delle Ricerche, Rom, IT) geladen. Über die Align-Funktion wurde die Ausrichtung des Modellhalters auf die des Oberflächenscans übertragen und gespeichert (siehe Abbildung 11). Anschließend wurden die Ebenen des Oberflächenscans auf die Ebenen der STL-Zahn-Kopie übertragen (siehe Abbildung 12). Als Endergebnis stand die ausgerichtete STL-Zahn-Kopie in derselben Stellung und Neigung wie der ihr zugrunde liegende humane Zahn (siehe Abbildung 13).

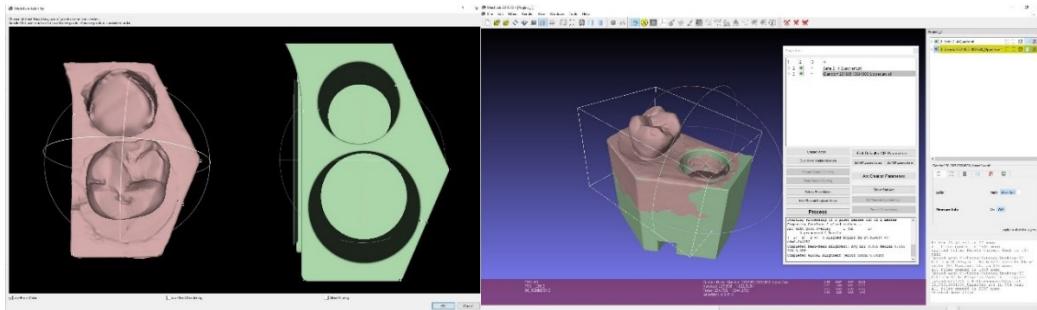


Abbildung 11: Vorher und Nachher: Die Ausrichtung des Modellhalters (grün) wurde auf den Oberflächenscan (rot) mit Hilfe der Align Funktion des Programmes Meshlab deckungsgleich übertragen.

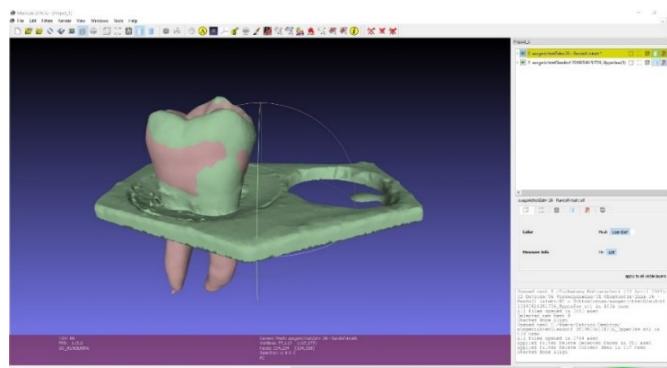


Abbildung 12: Übertragung der Lageinformation aus dem Oberflächenscan (grün) auf die Ebenen der STL-Zahn-Kopie (rot).

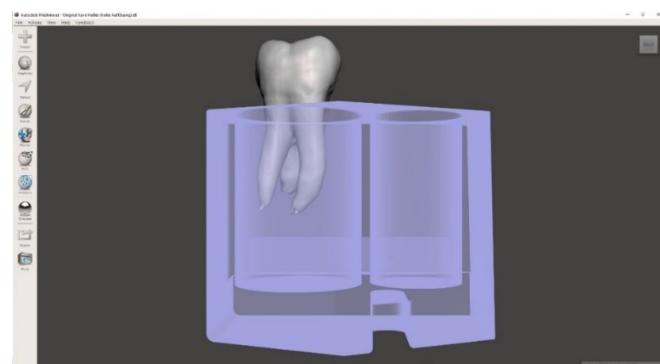


Abbildung 13: Die ausgerichtete STL-Zahn-Kopie (weiß) im Modellhalter (lila) in derselben Stellung und Neigung wie der ihr zugrunde liegende humane Zahn.

7.7.1 Erstellung der Begrenzung zwischen koronalem und apikalem Anteil

Als Arbeitsgrundlage diente eine rechteckige 25mm x 25mm x 1mm große, plane Fläche im STL Format (Autodesk Fusion 360 für Schüler und Studenten, Autodesk Direct Limited, Farnborough, UK; siehe Abbildung 14). Der Modellhalter wurde in das Programm Autodesk® Meshmixer™ (Autodesk® Meshmixer™, Version 3.6.747, Autodesk Direct Limited, Farnborough, UK) geladen und durch die Funktion „Edit – Planecut“ für jede Alveole in entsprechend acht verschiedene Teile zerschnitten, sodass nur noch der zerschnittene Halter mit einer Alveole für den jeweiligen zu bearbeitenden Zahn übrig blieb und als eigenständige Datei gespeichert werden konnte. Zu dieser zerschnittenen Datei wurde in Autodesk® Meshmixer™ die eckige Begrenzung hinzugefügt. Durch die Funktion „Edit - Transform“ wurde die Datei mittig in der Alveole und ein Millimeter unterhalb des koronalen Beginns platziert und ebenfalls als nun angepasste und eigenständige Datei gespeichert.

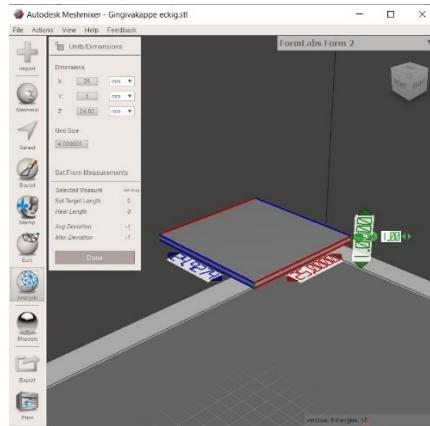


Abbildung 14: Rechteckige Ausgangsdatei.

Anschließend wurden die beiden zusammengehörigen Datei in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 (Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2, 64-bit Edition, Build: 1932, Release: 2019.2, Autodesk Direct Limited, Farnborough, UK) geladen. Nach einer Skalierung auf 95 Prozent des nur noch auf die relevante Alveole reduzierten Halters, erfolgte durch die Boolean Funktion der Abzug des zerschnittenen Halters von der Begrenzungsdatei (siehe Abbildung 15 links). Überflüssige Bereiche wurden mit dem Programm Autodesk® Meshmixer™ entfernt und die Datei als runde Begrenzung gespeichert (siehe Abbildung 15 rechts).

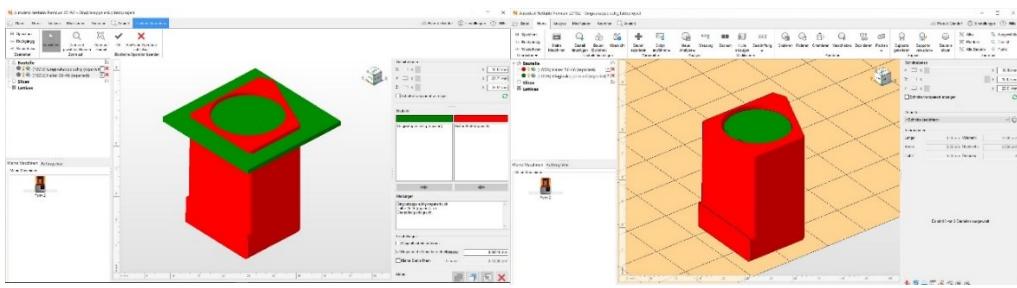


Abbildung 15: Zerschnittener Modellhalter mit rechteckiger Ausgangsdatei (links) und zerschnittenem Modellhalter mit runder Begrenzung (rechts).

Als letzter Schritt wurde die so erzeugte runde Begrenzung zusammen mit der für die jeweilige Alveole passenden und ausgerichteten STL-Zahn-Kopie in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 geladen (siehe Abbildung 16 links). Es erfolgte keine Skalierung. Über die Boolean Funktion wurde die STL-Zahn Datei von der runden Begrenzung subtrahiert. Die so erzeugte Datei wurde als runde Begrenzung mit passendem Ausschnitt für den jeweiligen Zahn gespeichert (siehe Abbildung 16 rechts).

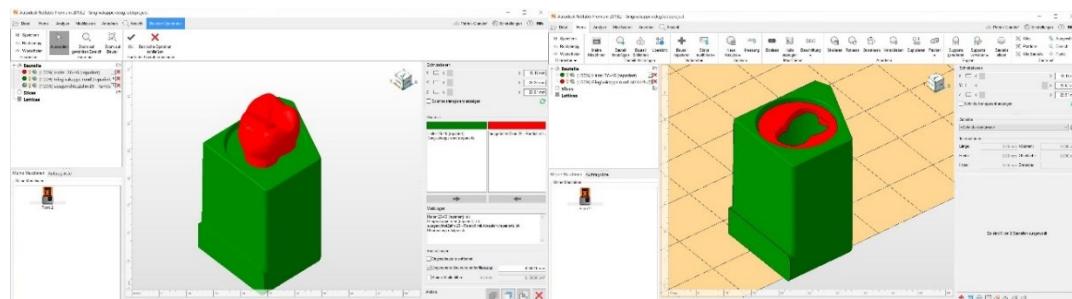


Abbildung 16: Zerschnittener Halter mit runder Begrenzung und STL-Zahn-Kopie (links) und zerschnittener Halter mit runder Begrenzung und Ausschnitt für jeweilige STL-Zahn-Kopie (rechts).

7.7.2 Erstellen des Gleit- und Führungsmechanismus

Als Grundlagen dienten ein 1,5mm x 1,5mm x 20mm großer Stift (siehe Abbildung 17 links) sowie eine 5mm x 5mm x 20mm große Rechteckhülse mit einem mittigen Ausschnitt von 3mm x 3mm x 20mm im STL Format (Autodesk Fusion 360 für Schüler und Studenten, Autodesk Direct Limited, Farnborough, UK; siehe Abbildung 17 rechts).

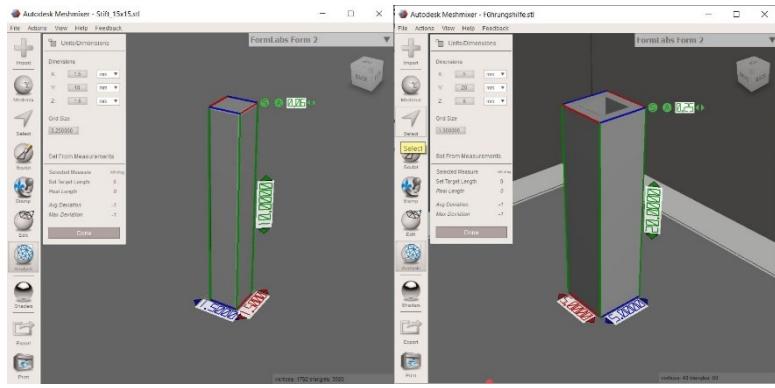


Abbildung 17: Stift (links) und Rechteckhülse mit mittigem Ausschnitt (rechts).

Die Rechteckhülse mit dem mittigen Ausschnitt wurde in das Programm Autodesk® Meshmixer™ geladen und über die „Edit – Transform“ Funktion in der entsprechenden Alveole des zu bearbeitenden Zahnes platziert. Zusätzlich wurde die Stift-Datei in daselbe Programm geladen und 16x dupliziert. Über die Funktion „Edit-Transform“ erfolgte die Aufteilung der Stifte, sodass jeweils zwei im Abstand von einem Millimeter nebeneinander an jeder Wand im oberen und unteren Anteil standen. Somit befanden sich je acht Stifte im oberen und acht Stifte im unteren Anteil (siehe Abbildung 18 links). Bei den Molaren wurde aufgrund der Größe der Alveole die Anzahl der Elemente erhöht. Somit gab es bei Molaren jeweils 14 Stifte im oberen und unteren Bereich und jeweils eine Hülse im mesialen und distalen Anteil (siehe Abbildung 18 rechts). Über die Funktion „Edit – Combine“ wurden die unterschiedlichen STL-Dateien zu einer neuen Gleit- und Führungsdatei zusammengefasst und gespeichert.

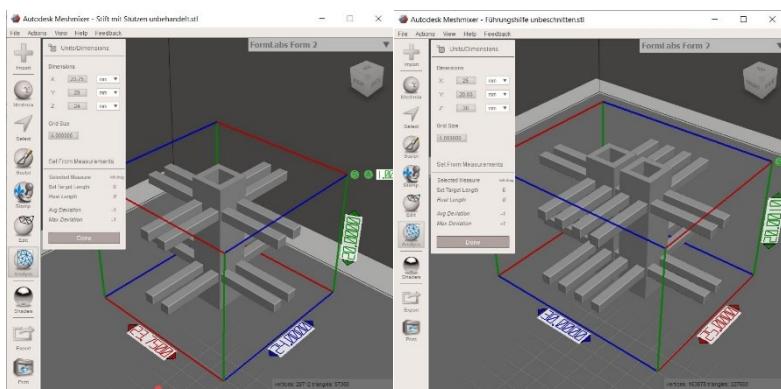


Abbildung 18: Hülse mit 16 Stiften für den Frontzahn und Prämolaren Bereich (links) und Hülsen mit 28 Stiften für den Molaren-Bereich (rechts).

Der Modellhalter wurde für jede künstliche Alveole zerschnitten. Es folgte die Anpassung der STL-Datei, sodass diese später an den Wänden der Alveole als Gleit-

und Führungsmechanismus dienen kann, keine Klemmung aufweist aber genügend Friktion hat, sodass der Prüfkörper gegen leichte Abzugskräfte geschützt ist. Die Datei wurde zusammen mit dem für das jeweilige Loch beschnittenen Halter in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 geladen (siehe Abbildung 19 links). Um zu gewährleisten, dass der Gleit- und Führungsmechanismus beim Einführen nicht verklemmt, wurde die zuvor beschnittene Halterung neu skaliert. Eine 99,0 Prozent Skalierung des Halters für die Alveolen der Frontzähne (Durchmesser 10,00mm), zudem eine 99,0 Prozent Skalierung des Halters für die Alveolen der Prämolaren (Durchmesser 11mm) sowie eine 99,5 Prozent Skalierung des Halters für die Alveolen der Molaren (Durchmesser 15mm).

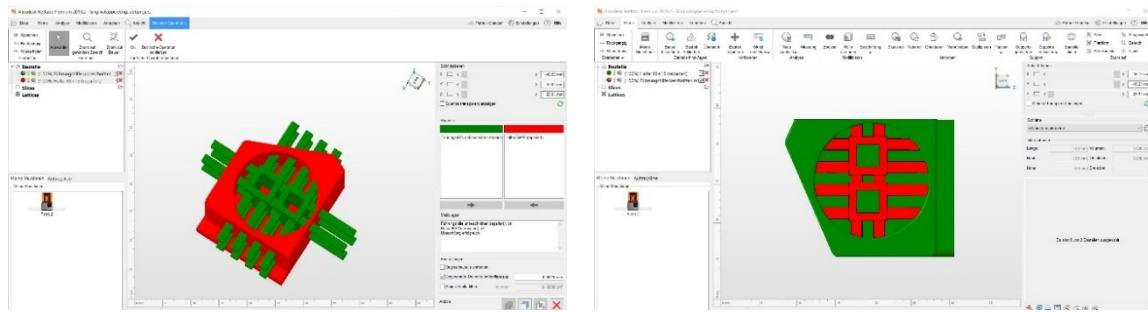


Abbildung 19: Die beschnittene Halterung mit unbeschnittenen Gleit- und Führungsmechanismus (links) und die beschnittene Halterung mit beschnittenem Gleit- und Führungsmechanismus (rechts).

Anschließend erfolgte über die Boolean Funktion der Abzug der beschnittenen und neu skalierten Halterung von der Gleit- und Führungsdatei (siehe Abbildung 19 rechts). Überflüssige Bereiche wurden mit dem Programm Autodesk® Meshmixer™ entfernt und die Datei unter dem Namen „Führungs hilfe mit abgeschnittenen Stützen“ gespeichert.

Die Datei benötigte auch eine definierte Ausrichtung in der vertikalen Ebene. Im Programm Autodesk® Meshmixer™ wurden dafür auswählbare Bereiche über die Funktion „Edit- Generate Face Groups“ erzeugt. Es wurden nur die Bereiche ausgewählt, die später dem Boden der Alveole direkt anliegen. Im Fall der Alveolen für Frontzähne und Prämolaren wurde die Fläche der Rechteckhülse am Boden ausgewählt. Im Falle der Alveolen für die Molaren wurde die Flächen des distalen Hülsenbodens ausgewählt. Über die Funktion „Select – Extrude“ wurde die ausgewählte Fläche um ein Millimeter verlängert und gesichert (siehe Abbildung 20).

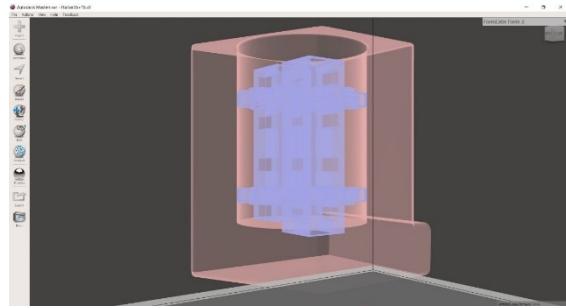


Abbildung 20: Gleit- und Führungsmechanismus mit 1mm apikaler Verlängerung (distal).

Um das entsprechende Gegenstück der Verlängerung im Modellhalter zu entfernen, sodass die Führungshilfe definiert um einen Millimeter versinkt, wurde der dafür überflüssige koronale Anteil um drei Millimeter oberhalb der gerade erzeugten Verlängerung durch die Funktion „Edit - Planecut“ im Programm Autodesk® Meshmixer™ entfernt und als eigenständige Datei gespeichert. Dieses so erzeugte apikale Ende wurde zusammen mit dem Modellhalter in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 geladen. Dieses apikale Ende wurde auf 102% skaliert. Die neu skalierte Datei wurde vom unbearbeitenden Original Modellhalter über die Boolean Funktion subtrahiert (siehe Abbildung 21 links). Dadurch wurde eine Einsenkung erzeugt, in welche die Verlängerung der Führungshilfe bei definiertem Sitz einrasten kann (siehe Abbildung 21 rechts). Um auch die mittigen Anteile der Einsenkung zu entfernen, wurde die Modellhalterung mit den Einsenkungen in das Programm Autodesk® Meshmixer™ geladen. Nachdem durch die Funktion „Edit – Generate Facegroups“ die zu entfernenden Flächen in der Mitte der Einsenkung ausgewählt und entfernt wurden, konnten die dadurch entstandenen Löcher durch die Funktion „Analysis – Inspector“ mit dem Befehl „Auto Repair All“ wieder gefüllt werden.

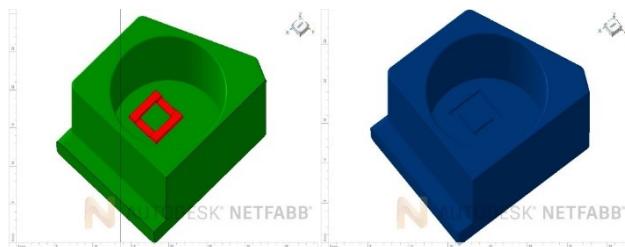


Abbildung 21: Die beschnittene Halterung mit apikalem Anteil des Gleit- und Führungsmechanismus (links) und die Einsenkung für Gleit und Führungsmechanismus (rechts).

Zu dem Original-Modellhalter wurde in einem weiteren Schritt der oben beschriebene 1,5mm x 1,5mm x 25mm breite Stift im Programm Autodesk® Meshmixer™ geladen

und verachtfacht, um die Duplikate durch die Funktion „Edit – Transform“ auf die verschiedenen Positionen der Alveolen zu verteilen. Zum einen wurden dadurch beim Drucken keine Saugglocken erzeugt, zum anderen kann so Flüssigkeit besser abfließen, die sich durch die Bohrer-Kühlung ansammeln würde. Über die Funktion „Edit – Combine“ wurden die acht Stifte zu einer Datei zusammengefasst. Als letzter Schritt wurden die nun zusammengefassten Stifte mit dem Modellhalter mit Einsenkungen am Boden jedes Zahnes in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 geladen. Die Stifte wurden durch die Boolean Funktion vom Halter abgezogen. Zum Schluss erfolgte die Beschriftung mit Ober- oder Unterkiefer sowie der Zuordnung zur laufenden Studie (siehe Abbildung 22).

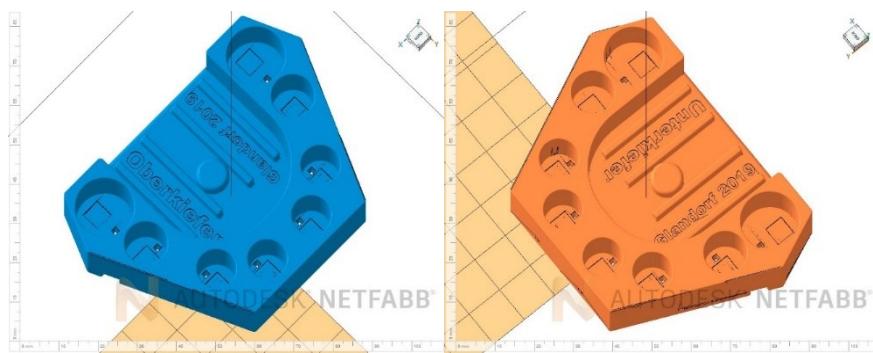


Abbildung 22: Jeweilige Halterung mit Einsenkung am Boden jeder Alveole sowie dem Wasserabfluss für den Oberkiefer (links) und für den Unterkiefer (rechts).

7.7.3 Anpassung des apikalen Bereiches der STL-Zahn-Kopie

Die erzeugte dreidimensionale STL-Zahn-Kopie mit achsgerechter Neigung wurde in das Programm Autodesk® Meshmixer™ geladen. Durch das Einfügen der Begrenzung aus 7.7.1 wurde ersichtlich, welcher Anteil für den Probanden von dem Prüfkörper sichtbar sein würde (siehe Abbildung 23 links). Unterhalb dieser Begrenzung wurde durch die Funktion „Edit – Planecut“ der apikale Bereich der STL-Zahn-Kopie aus Gründen der besseren dreidimensionalen Druckbarkeit entfernt. Anschließend erfolgte über die Funktion „Select – Extrude“ die Verlängerung der Schnittfläche um 25 Millimeter. Die so bearbeitete STL-Zahn-Kopie mit der apikalen Verlängerung wurde abschließend gespeichert (siehe Abbildung 23 rechts).

Zusammen mit der für die jeweilige Alveole beschnittenen Halterung wurde die gerade erzeugte STL-Zahn-Kopie mit apikaler Verlängerung in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 geladen. Ohne Skalierung wurde der beschnittene Halter

von der STL-Zahn-Kopie mit apikaler Verlängerung subtrahiert und gespeichert. Überflüssige Bereiche wurden mit dem Programm Autodesk® Meshmixer™ entfernt. Der koronale Anteil oberhalb der Begrenzung war nicht verändert worden, der apikale Anteil diente dank seiner nun exakten Anpassung an das jeweilige Ende der Alveole als Tiefenmarker und bewirkt, dass der jeweilige Zahn sich nur soweit einführen lässt, wie es zuvor im Oberflächenscan verschlüsselt wurde.



Abbildung 23: STL-Zahn-Kopie samt Begrenzung (links) und STL-Zahn-Kopie mit apikaler Modifikation samt Begrenzung (rechts).

7.7.4 Zusammenführen von Begrenzungsdatei, Gleit- und Führungshilfe sowie STL-Zahn-Kopie mit apikaler Verlängerung

Die in 7.7.3 erzeugte STL-Zahn-Kopie wurde zusammen mit dem in 7.7.2 erzeugten Gleit- und Führungsmechanismus in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 geladen und voneinander abgezogen (siehe Abbildung 24 links). Durch diesen Schritt wurde die Durchgängigkeit der Wurzelkanäle sichergestellt. Nicht entfernte Bereiche, die später die Durchgängigkeit gefährden, wurden mit dem Programm Autodesk® Meshmixer™ entfernt. Zudem wurden jeweils drei 1,5mm x 1,5mm x 25mm langen Stifte aus 7.7.2 über die Funktion „Edit – Transform“ so ausgerichtet, dass sie die Wurzelkanäle mittig im Bereich der apikalen Verlängerung durchdringen. Diese drei Stifte wurden zu einer Datei zusammengefasst und dienten später als Spüllöcher für das Durchspülen mit Alkohol nach dem Druckvorgang (siehe Abbildung 24 rechts).

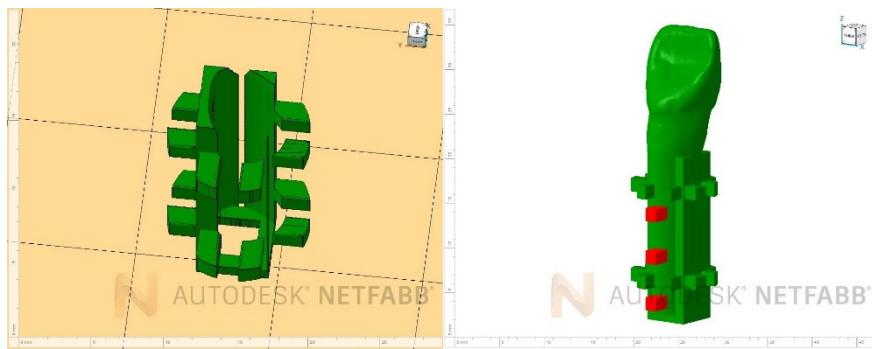


Abbildung 24: Gleit und Führungsmechanismus ohne STL-Zahn-Kopie mit Verlängerung (links) und rot markierte Position der Spülöcher (rechts).

Alle STL Dateien, dass bedeutet, die STL-Zahn-Kopie mit apikaler Verlängerung, der Gleit- und Stützmechanismus sowie die Begrenzung mit dem Ausschnitt für den jeweiligen Zahn wurden in das Programm Autodesk® Netfabb® Premium 2019.2 geladen und über die Boolean Funktion kombiniert. Anschließend erfolgte über die Boolean-Funktion der Abzug der zuvor erstellten Spüllocher-Datei, die drei definierte Punkte durch die Mitte des jeweiligen Wurzelkanals generierten.

Es erfolgte die eindeutige Beschriftung anhand des FDI Schemas des jeweiligen Zahnes plus einen Zusatz für die jeweilige Variante (Name der Dose, in der der menschliche Zahn ehemals gelagert wurde). Die so erstellte Datei wurde mit dem FDI-Namen des Zahnes plus Zusatz für die Variante und Anzahl der Spülöcher gespeichert.

Abschließend wurde die Datei nochmals mit Autodesk® Meshmixer™ geöffnet. Mittig durch die Pulpakammer als einzige Veränderung oberhalb der Begrenzung wurde mit der Funktion „Edit – Add Tube“ abhängig von der Pulpakammerausdehnung ein Spülloch mit einer Ausdehnung von 0,3-0,5mm Breite erzeugt. Dank dieses Spülloches konnte während des Druckvorgangs ungebundener Kunststoff besser abfließen.

7.7.5 Zusammenfassung der Prüfkörper Herstellung

Jeder druckbare Prüfkörper bestand aus einem koronalen Anteil oberhalb der künstlichen Gingiva. Dieser koronale Anteil samt Zahnkrone, Pulpakammer und den ersten Abschnitten des Wurzelkanalsystems blieb bis auf eine kleine Öffnung, für die Durchspülung mit Alkohol während des Druckprozesses, im Originalzustand und

entsprach damit den Informationen aus den erstellten diagnostischen Bildbetrachtungsmethoden. Der apikale Anteil unterhalb der künstlichen Gingiva wurde modifiziert, war aber während des Versuches für die Probanden nicht sichtbar. Im apikalen Anteil befand sich der Gleit- und Führungsmechanismus sowie die apikale Verlängerung des Wurzelkanalsystems. Dieser Anteil des Prüfkörpers wichen vom originalen, humanen Zahn ab. Für die Versuchsdurchführung ließ sich der Prüfkörper mit einem diamantierten Bohrer trepanieren und dadurch die Pulpakammer und die Wurzelkanäle auffinden. Das Einführen von Wurzelkanalinstrumenten in die Kanäle war außerdem möglich. Die Veränderung des apikalen Anteils der Prüfkörper hatte somit keinen Einfluss auf die Versuchsdurchführung. Eine Beschriftung ermöglichte die eindeutige Zuordnung (siehe Abbildung 25).

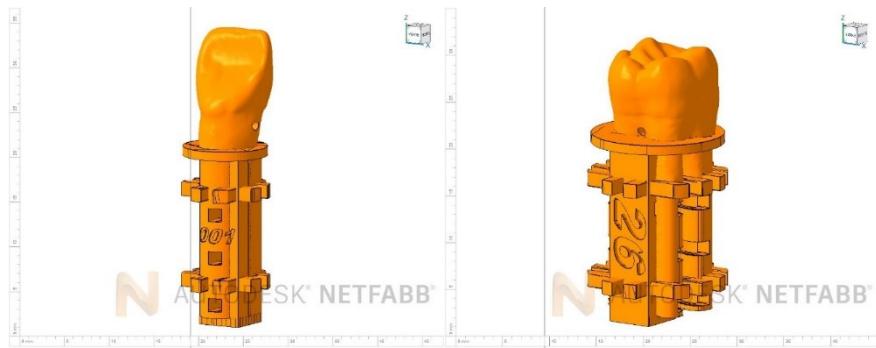


Abbildung 25: Druckbarer Frontzahn-Prüfkörper mit Beschriftung für die Variante 001 (links) und druckbare Molaren-Prüfkörper mit Beschriftung für den Zahn 26 (rechts).

Die Modellhalter für Ober- und Unterkiefer wurden für die eindeutige Positionierung der Prüfkörper modifiziert. Am Boden jeder künstlichen Alveole waren Einsenkungen, in welche sich der Prüfkörper durch vollständiges Hineingleiten in Endposition befand. Zudem besaß jede Alveole einen Ablauf für das Kühlwasser des Bohrers. Durch eine Beschriftung ließen sich die Halter dieser Studie zuordnen und es war gleichzeitig eine Zuordnung zu Ober- oder Unterkiefer möglich.

8 Ethikantrag

MEDIZINISCHE FAKULTÄT
DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL

ETHIK-KOMMISSION



A.D. 1665

Universitäts-Kinderklinik · Schwanenweg 20 · 24105 Kiel

Schwanenweg 20
D-24105 Kiel

Telefon 0431 / 597-18 09
Telefax 0431 / 597-18 31

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

Datum: 25.08.2010

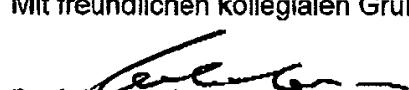
AZ.: D 444/10 (bitte stets angeben)
Studienplan: **Extrahierte Zähne – Verschiedene In-vitro-Versuche mit dentalen Materialien**
 Antrag, Informationsblatt und Einverständniserklärung

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

Mein großer Dank gilt Herrn Professor Dr. med. dent. Christof Dörfer, der als Direktor der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie das Umfeld für diese wissenschaftliche Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Frau Professorin Dr. med. dent. Birte Größner-Schreiber danke ich herzlich für die Vergabe des interessanten Themas, sowie für die engagierte Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung dieser Studie.

Besonderen Dank schulde ich Herrn Dr. med. dent. David William Christofzik. David, vielen Dank für deine fachliche und freundschaftliche Betreuung bei dieser Arbeit.

Ich bedanke mich bei Herrn Dr. med. dent. Jonas Conrad für die Erstellung und Auswertung des internetbasierten Fragebogens.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Privatdozent Dr. med. dent. Karim Mohamed Fawzy El-Sayed für seine hilfsbereite Art bei der Erstellung der Publikationen.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. med. dent. Friedrich Hey sowie dem gesamten Praxisteam für die Verwendung der neusten Intraoralscanner-Technik in seiner Praxis in Laboe.

Mein Dank gilt Frau Zahnärztin Susanne Schorr für die Bearbeitung und Erstellung der Abbildungen und schematischen Darstellungen der Publikation.

Frau Privatdozentin Dr. Amke Caliebe gilt mein Dank für die statistische Beratung und Rücksprache nach Versuchsdurchführung.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem Weg durch das Studium und die Promotion begleitet haben.

Abschließend möchte ich meinen Freunden und Kollegen für die zahlreichen kleinen, aber dennoch wichtigen Hinweise danken. Vielen Dank: Celine, Oliver, Florentina, Kerstin, Carolin und Tobias.

10 Publikationen

Wissenschaftliche Präsentation und Poster - Publikationen:

11/2020 4. Gemeinschaftstagung der DGZ und der DGET mit der DGPZM und der DGR²Z | 26. – 28.11.2020 | Dresden
DGZ-TAG DER WISSENSCHAFT/UNIVERSITÄTEN
am 26.11.2020

P.Glandorf, D. W. Christofzik, K. M. Fawzy El-Sayed, C. Dörfer, B. Größner-Schreiber

Einfluss von 2D-Bildgebung, dentaler Volumentomographie sowie einer 3D-Planungssoftware auf die Größe der Trepanationsöffnung

https://www.online-dzz.de/fileadmin/user_upload/media/Abstract_05_2020_Komplett.pdf

Publikation in wissenschaftlicher Zeitschrift:

09/2021 *Aust Endod J.*

Online-Version: verfügbar seit 24. September 2021

Druckversion: August 2022, Band 48, 2. Ausgabe, Seite: 283- 296

David W Christofzik, Patrick Glandorf, Jonas Conrad, Karim M Fawzy El-Sayed, Birte Größner-Schreiber, Christof E Dörfer

2D radiographs, cone-beam computed tomography and 3D CBCT-based planning software in access cavity preparation: A single blinded randomised controlled in vitro study

PMID: 34558154 DOI: [10.1111/aej.12566](https://doi.org/10.1111/aej.12566)