

Aus der
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Tübingen
Abteilung Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und
Gesichtschirurgie

**Evaluation Behandler- und Instrumenten-bedingter
Messfehler im Rahmen eines endodontologischen *in vitro*
Modells im Vergleich zu einem innovativen Messsystem**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Wichelhaus, Lucy Clara

2022

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. ElAyouti

2. Berichterstatter: Privatdozentin Dr. E. M. Engel

Tag der Disputation: 08.12.2022

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1.	Einleitung	9
1.1.	Allgemeines und Historisches	9
1.2.	Endodontie heute	10
1.3.	Ablauf einer Wurzelkanalbehandlung	11
1.3.1.	Erfolgsfaktoren	15
1.3.2.	Problematik und Herausforderungen	17
1.3.3.	Fehlerquellen	18
1.4.	Arbeitslängenbegrenzer	19
1.4.1.	Silikonstopper	19
1.4.2.	Stoppercap	20
1.4.3.	Apexlokatoren	22
1.4.4.	Endomotor mit integriertem Apexlokatoren	23
1.5.	Fragestellung und Ziel der Untersuchung	24
2.	Material und Methoden	26
2.1.	Erstellung eines 3D-Zahnmodells	26
2.2.	Aufbereitungsmaterial	30

2.3.	Gerätebeschreibung	32
2.4.	Festlegung der Arbeitslänge je Zahntyp	34
2.5.	Untersuchungsmethode.....	36
2.5.1.	Aufbereitung mit dem Silikonstopper und der Stoppercap	38
2.5.2.	Aufbereitung unter Verwendung der automatischen Stopp-Funktion	40
2.6.	Messmethode	41
2.7.	Auswertung	42
2.7.1.	Betrachtung der Aufbereitungen	45
3.	Ergebnisse	46
3.1.	Ergebnisse der Einzelmessungen	46
3.1.1.	Deskriptive Statistik der Einzelmessungen	46
3.1.2.	Häufigkeitsverteilung der Einzelmessungen	47
3.2.	Differenzierung nach Untergruppen.....	48
3.2.1.	Untergruppe Arbeitslängenbegrenzer.....	48
3.2.2.	Untergruppe Vergrößerungshilfen	52
3.2.3.	Untergruppe Instrumentengröße	54
3.3.	Statistische Analyse der Einzelmessungen	55
3.3.1.	Kontingenzanalyse	55
3.3.2.	Analyse des Einflusses der Arbeitslängenbegrenzer	56
3.3.3.	Analyse des Einflusses der Vergrößerungshilfe	58
3.3.4.	Analyse des Einflusses der Instrumentengröße	60

3.3.5.	Analyse des Einflusses der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes	62
3.4.	Tukey-Kramer-HSD-Test	64
3.4.1.	Analyse der Arbeitslängenbegrenzer mittels Tukey-Kramer-HSD-Test	65
3.5.	Zusammenfassung der Einzelmessungen.....	67
3.6.	Analyse der Aufbereitungen	68
4.	Diskussion.....	74
4.1.	Diskussion von Material und Methode	74
4.1.1.	Rolle des Behandlers.....	78
4.2.	Diskussion der Ergebnisse	79
4.2.1.	Rolle der Arbeitslängenbegrenzer	79
4.2.2.	Rolle der Vergrößerungshilfen	85
4.2.3.	Rolle der Instrumentengrößen	85
4.2.4.	Wurzelanatomie und koronaler Referenzpunkt	86
4.2.5.	Schlussfolgerung aus den Einzelmessungen	87
4.3.	Diskussion der Aufbereitungen.....	88
5.	Zusammenfassung	90
6.	Literaturverzeichnis.....	92
7.	Erklärung zum Eigenanteil	97
8.	Danksagung.....	99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Apikale Anatomie.....	16
Abbildung 2: Stoppercap, verschiedene Stärken und dazugehörige Messlehre	20
Abbildung 3: Stoppercap a) schematischer Sitz auf der Endofeile, b) eindeutig reproduzierbarer Sitz bündig auf der Zahnkrone.....	21
Abbildung 4: Grafische Darstellung der 3D-Rekonstruktion eines verwendeten Zahnmodells (angeschnitten) mit einem Foramen (a) im Vergleich zu einem mit mehreren Foramina (b), das ausgeschlossen wurde	26
Abbildung 5: Vergleich zwischen einem gut reproduzierbaren koronalen Referenzpunkt (a) und einem schwierigeren (b), da es hier beim Verwenden des Silikonstoppers (blau) aufgrund des schrägen Höckers zu einem schiefen Aufliegen kommt, die Zähne sind angeschnitten dargestellt	27
Abbildung 6: fertiges 3D-Zahnmodell mit Kalibrierungsreferenz gelb, Pulpa rot dargestellt.....	29
Abbildung 7: schematischer Versuchsaufbau.....	31
Abbildung 8: Stoppercap (a) und Silikonstopper (b) im Vergleich an einem schwierigen koronalen Referenzpunkt, Zähne angeschnitten dargestellt.....	36
Abbildung 9: Zahnmodell in Haltevorrichtung eingespannt, Endofeile mit Silikonstopper in Wurzelkanal eingeführt, die Auflage des Silikonstoppers auf dem Referenzpunkt ist nur durch den Mundspiegel erkennbar.....	39
Abbildung 10: Erläuterung der Messmethode, A: Abstand der Endfeilenspitze zum Foramen, B: Breite der Kalibrierungsreferenz, F: Foramen	42

Abbildung 11: Darstellung der 190 Messwerte, die horizontalen Linien markieren den Zielbereich (Foramen $\pm 0,25$ mm), die Farbzuordnung entspricht dem Versuchsablauf darüber, Stoppercap, Morita und VDW Gold wurden ohne Vergrößerungshilfe genutzt	46
Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Einzelmessungen in absoluten Werten und Prozentwerten in ()	47
Abbildung 13: Boxplot Vergleich der Arbeitslängenbegrenzer	49
Abbildung 14: Boxplot Vergleich der Vergrößerungshilfen	52
Abbildung 15: Boxplot Vergleich der Instrumentengröße	54
Abbildung 16: Verteilungsdiagramm Arbeitslängenbegrenzer, die Breite der Balken basiert auf der Anzahl der Messwerte	56
Abbildung 17: Verteilungsdiagramm Vergrößerungshilfen	58
Abbildung 18: Verteilungsdiagramm Einfluss der Instrumentengröße.....	60
Abbildung 19: Verteilungsdiagramm Wurzelanatomie und koronaler Referenzpunkt, die Breite der Balken basiert auf der Anzahl der Messwerte, bei Z3 handelte es sich um einen zweiwurzeligen Zahn	62
Abbildung 20: Verteilung Abstand Endfeilenspitze – Foramen pro Aufbereitung, der Bereich zwischen den schwarzen Linien markiert den Zielbereich, zusammenhängende Linien stellen eine Aufbereitung dar, die Zuordnung der Farben entspricht dem Versuchsablauf darüber, Stoppercap, Morita und VDW Gold wurden ohne Vergrößerungshilfe genutzt	68
Abbildung 21: Verteilungsdiagramm Aufbereitungen nach Arbeitslängenbegrenzern, die Breite der Balken entspricht der Anzahl der Aufbereitungen	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flowchart Versuchsablauf.....	37
Tabelle 2: Quantile Arbeitslängenbegrenzer	49
Tabelle 3: Zusammenstellung der Mittelwerte, Standardabweichungen und Konfidenzintervalle differenziert nach Arbeitslängenbegrenzer.....	50
Tabelle 4: Quantile Vergrößerungshilfen	53
Tabelle 5: Quantile Instrumentengröße	55
Tabelle 6: Kontingenztabelle Arbeitslängenbegrenzer	57
Tabelle 7: Kontingenztabelle Vergrößerungshilfe.....	59
Tabelle 8: Kontingenztabelle Instrumentengrößen	61
Tabelle 9: Kontingenztabelle Einfluss der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes.....	63
Tabelle 10: Liste der homogenen Gruppen nach Tukey-Kramer-HSD-Test.....	65
Tabelle 11: Liste der sortieren Differenzen nach Tukey-Kramer-HSD-Test	66
Tabelle 12: Kontingenztabelle Aufbereitungen nach Arbeitslängenbegrenzern	70
Tabelle 13: Kontingenztabelle Silikonstopper vs. Stoppercap.....	71
Tabelle 14: Kontingenztabelle Stoppercap vs. MORITA Tri Auto ZX2	71
Tabelle 15: Kontingenztabelle MORITA Tri Auto ZX2 vs. VDW. Gold.....	72
Tabelle 16: Kontingenztabelle Stoppercap vs. VDW. Gold RECIPROC	72
Tabelle 17: Kontingenztabelle Silikonstopper vs. MORITA Tri Auto ZX2	73
Tabelle 18: Kontingenztabelle Silikonstopper vs. VDW. Gold RECIPROC	73

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
AL	Arbeitslänge
BEMA	Einheitliche Bewertungsmaßstab für zahnärztliche Leistungen
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
d.h.	das heißt
ESE	European Society of Endodontology
et al.	et alii
H ₂ O	Wasser
HD	High Definition
IQR	interquartile range
ISO	International Organization for Standardization
KZBV	Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung
KZV	Kassenzahnärztliche Vereinigung
kΩ	Kiloohm
mm	Millimeter
n	Stichprobengröße
NaCl	Natriumchlorid
NiTi	Nickel-Titan
r/min, rpm	revolutions per minute
z.B.	zum Beispiel

1. Einleitung

1.1. Allgemeines und Historisches

Die Endodontie ist ein Teilbereich der konservierenden Zahnmedizin und beschäftigt sich mit Erkrankungen der Pulpa-Dentin-Einheit und dem periapikalen Gewebe, d.h. mit Bereichen unterhalb des sichtbaren Zahnschmelzes. Die Pulpa ist der weiche innere, aus Bindegewebe, Nerven und verschiedenen Zellen wie Fibroblasten, Odontoblasten und undifferenzierte Mesenchymzellen bestehende Teil eines Zahnes. Sie bildet, mit dem sie umgebenden Dentin, eine funktionelle Einheit, das so genannte Endodont. Im koronalen Bereich des Zahnes wird die Einheit von umgebendem Zahnschmelz und im Wurzelbereich von Zement geschützt.

Die Entwicklung der Endodontie lässt sich bis in das 17. Jahrhundert zurückverfolgen. Aus dieser Zeit existieren die ersten schriftlichen Aufzeichnungen über Zahnerhaltungen mit rudimentären Techniken (Castellucci, 2004). Die Erkenntnisse über zahnerhaltende Maßnahmen nahmen kontinuierlich zu. Sie führten in der Mitte des 19. Jahrhunderts zur Entwicklung der ersten Wurzelkanalinstrumente und der Einführung von Guttapercha als Wurzelkanalfüllungsmaterial in die Zahnheilkunde, welches heute noch in der Endodontie verwendet wird (Coolidge, 1960). Kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 fanden diese auch Anwendung in der Zahnmedizin und wurden in den folgenden Jahren auch für die ersten Wurzelkanallängenbestimmungen genutzt (Cruse & Bellizzi, 1980). Zuvor wurde die Länge des Wurzelkanales mit Hilfe eines Guttaperchastiftes, der über das Foramen hinaus in die vitale periapikale Region vorgeschoben wurde, bestimmt. Die darauffolgende Schmerzreaktion des Patienten gab Anhalt über die Position des Guttaperchastiftes und somit über die Länge des Wurzelkanales. Erst später wurde auch der periapikalen Region zunehmende Bedeutung beigemessen (Coolidge, 1960).

Obwohl in all den Jahren Versuche zur Kanaldesinfektion mit verschiedenen Antiseptika (Coolidge, 1960) unternommen wurden, wurden Anfang des

20. Jahrhunderts Zahninfektionen, wie sie auch in nicht ausreichend endodontisch therapierten Zähnen vorkommen, als Herd für systemische Erkrankungen (z.B. Rheuma, Nierenerkrankungen, kardiovaskuläre-Erkrankungen) verantwortlich gemacht (Castellucci, 2004). Eine Übertragung dieser Ansicht, auch auf devitale, erfolgreich endodontisch sanierte Zähne, führte in den folgenden Jahrzehnten dazu, dass die Extraktion von Zähnen mit avitaler Pulpa und teilweise auch von vitalen Zähnen mit großen Restaurationen, das Mittel der Wahl war. Erst zu Beginn der 1950iger Jahre wurde die Summe der vorliegenden Forschungs-ergebnisse so interpretiert, dass devitale, korrekt sanierte Zähne keine Rolle in der Verursachung von systemischen Erkrankungen spielen. Diese Erkenntnis führte zu einem Wiederaufschwung in der Durchführung von endodontischen Maßnahmen in der zahnerhaltenden Therapie (Castellucci, 2004).

1.2. Endodontie heute

Im Gegensatz zur Extraktionstherapie ist die Wurzelkanalbehandlung ein aufwendiges und zeitintensives Verfahren. Im deutschen Vertragszahnarzt-system ist die Wurzelkanalbehandlung von Molaren nur unter bestimmten Voraussetzungen vorgesehen, d.h. der Zahn muss als erhaltungswürdig eingestuft werden. Diese Situation liegt nach den Richtlinien des Gemeinsamen Bundesausschusses von 2019 (KZV-Handbuch, Band 1, Register 7) vor, wenn eine geschlossene Zahnreihe erhalten werden kann, eine einseitige Verkürzung einer Zahnreihe verhindert wird oder durch die Behandlung ein vorhandener Zahnersatz erhalten bleibt. Andernfalls ist die Extraktion, aus Sicht des Gemeinsamen Bundesausschusses, der Wurzelkanalbehandlung vorzuziehen.

Dessen ungeachtet hat die Endodontie heutzutage, bedingt durch ein zunehmendes Interesse an zahnerhaltenden Maßnahmen, auch von Seiten des Patienten, einen steigenden Stellenwert in der Zahnheilkunde.

Während 1970 das Verhältnis von extrahierten Zähnen zu wurzelkanal-behandelten, d.h. endodontisch behandelten Zähnen, noch bei 5,4:1 lag, verbesserte sich diese Situation bis 2018 auf 1,8:1 (KZBV-Jahrbuch 2019). Im Gegensatz zu einer Extraktionstherapie, nach der der Zahn dauerhaft für den Patienten verloren ist, hat ein wurzelkanalbehandelter Zahn, je nach Studie, eine Erhaltungsprognose von 86-93 % in einem Beobachtungszeitraum von zwei bis zehn Jahren bzw. 82,5 % in fünf Jahren (Ng et al., 2010; Bartols et al., 2020).

1.3. Ablauf einer Wurzelkanalbehandlung

Durch verschiedene Ursachen, wie Trauma oder kariöse Destruktion der Zahnhartsubstanz, kann es zu einer schmerzhaften bakteriellen Besiedlung der Pulpa kommen. Der weitere inflammatorische Prozess im Zahninneren führt zur Nekrose der Pulpa und einem vorübergehenden Nachlassen der Schmerzen. Unbehandelt könnte es dann zu einer Ausbreitung der Bakterien in den periapikalen Bereich (Ricucci & Langeland, 1998; Nair et al., 2006) und im weiteren Verlauf zu einer Verschleppung der Bakterien in das umliegende Gewebe (Ostitis, Periostitis, Osteomyelitis, Abszess, Phlegmon) bis hin zur Bakteriämie und Manifestation in entfernt liegenden Organsystemen (z.B. Endokarditis) kommen (Okell et al., 1935). Diese Vorstellung konnte bis heute wissenschaftlich nicht eindeutig bestätigt werden, jedoch scheint es einen Zusammenhang zwischen der Inflammation des Parodontiums und systemischen Erkrankungen zu geben (Pizzo et al., 2010).

In den Leitlinien der Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde sowie der Europäischen Gesellschaft für Kardiologie wird eine Antibiotische Endokarditis-Prophylaxe bei Zahnärztlichen Eingriffen mit Blutungsrisiko einschließlich Wurzelkanalbehandlungen für Hochrisikopatienten empfohlen. (Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 1999 und 2007; Habib et al., 2015).

1. Einleitung

In einer kleineren Studie (n=60) wurde bei einigen Patienten mit Wurzelkanalbehandlungen bakterielle DNA im Blut nachgewiesen. Einen signifikanten Unterschied durch eine antibiotische Prophylaxe wurde nicht beobachtet (Reis et al., 2016).

Das Ziel einer Wurzelkanalbehandlung ist die Entfernung der geschädigten Pulpa, sowie die Desinfektion des Endodonts, um somit den Erhalt des Zahnes zu ermöglichen. Hierzu wird zunächst der zu behandelnde Zahn isoliert und absolut trocken-gelegt (Kofferdam). Von koronal wird über eine Trepanationsöffnung ein Zugang zum endodontischen System geschaffen. Das infizierte Gewebe wird mit speziellem Wurzelkanalinstrumentarium entfernt. Hierfür steht ein umfangreiches Sortiment verschiedenster Endofeilen zur Verfügung, die für die unterschiedlichsten anatomischen Anforderungen angepasst wurden. Um eine Verletzung des periapikalen Gewebes und eine unnötige Extrusion von infiziertem Gewebe in den Periapex zu vermeiden, muss vor dem Einführen der ersten Endofeile eine vorläufige Arbeitslänge bekannt sein (Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 2004).

Für die Bestimmung der vorläufigen Arbeitslänge wird das diagnostische Röntgenbild genutzt, das die Gesamtlänge des Zahns zeigt, die im Bereich von 18 mm (unterer Molar) bis zu 28 mm (oberer Eckzahn) liegt. Ebenso ist auf dem Röntgenbild der Verlauf des Wurzelkanals erkennbar. Da es sich um eine zweidimensionale Aufnahme einer dreidimensionalen Struktur handelt, ist zu beachten, dass die Lage des Foramens, der Übergang des Wurzelkanals in den periapikalen Raum, nicht eindeutig dargestellt wird. Zur Vermeidung einer Überinstrumentierung werden daher bei der Festlegung der vorläufigen Arbeitslänge von der Gesamtlänge des Zahnes 2 mm subtrahiert. Mit Hilfe eines Silikonstoppers auf der Endofeile wird die vorläufige Arbeitslänge markiert und die Endofeile von Hand in den Wurzelkanal eingebracht, bis der Silikonstopper den gewählten koronalen Referenzpunkt berührt. Dieser koronale Referenzpunkt kann willkürlich gewählt werden, sollte aber auch für einen anderen Behandler reproduzierbar sein. In der Regel bietet sich eine

Höckerspitze des betroffenen Zahnes an. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Bestimmung der Arbeitslänge entlang des Zugangsweges erfolgt und dieser nicht durch z.B. nachträgliche Begradigung verkürzt wird.

Vergrößerungshilfen sind in der Endodontie wichtige Hilfsmittel.

Der Einsatz einer Lupenbrille oder eines Operationsmikroskops kann das Erkennen der Wurzelkanalanatomie erleichtern (Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlungen: Konsenspapier der ESE). Vergrößerungshilfen ermöglichen ein minimalinvasives Arbeiten, das Auffinden von kleinsten Kanaleingängen (unter 0,06 mm) und die Erschließung von Obliterationen, was die Erfolgsrate der durchzuführenden Wurzelbehandlung erhöht (Saunders und Saunders, 1997).

Nach Einführen einer Endofeile bis zum Erreichen der vorläufigen Arbeitslänge wird ein weiteres Röntgenbild, die Messaufnahme, angefertigt, auf der jetzt der Abstand der Feilenspitze zum röntgenologischen Apex zu erkennen ist. Dieser Abstand sollte 0-1 mm betragen und definiert den unteren, apikalen Referenzpunkt.

Die angestrebte Arbeitslänge ergibt sich dann als die Strecke von dem koronal bestimmten Referenzpunkt bis zum apikalen Referenzpunkt.

Studien haben gezeigt, dass im Bereich von 0-1 mm vom anatomischen Apex entfernt in der Mehrheit der Fälle die apikale Konstriktion zu finden ist (Dummer et al., 1984; McDonald & Hovland, 1990; ElAyouti et al., 2014).

Die apikale Konstriktion ist die engste Stelle des Wurzelkanalsystems, hat eine Länge von 0,2-0,8 mm (ElAyouti et al., 2014) und sollte das Ende der Aufbereitung darstellen. Zu beachten ist hierbei, dass der Bereich für die Lage der apikalen Konstriktion sehr groß ist und deshalb kein exakter Abstand vom anatomischen Apex angegeben werden kann (Dummer et al., 1984; Ricucci & Langeland, 1998).

Sehr genau lässt sich die Lage der apikalen Konstriktion mit elektronischen Apex-Lokatoren bestimmen (Connert et al., 2018).

Eine Kombination aus elektrometrischer und röntgenologischer Messung wird für die Bestimmung der Arbeitslänge empfohlen (Kim et al., 2008;

Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und

1. Einleitung

Kieferheilkunde, 2007), ist aber aktuell nicht im Einheitlichen Bewertungsmaßstab für zahnärztliche Leistungen enthalten (BEMA, 2019).

Mit der festgelegten Arbeitslänge wird der Kanal in der Regel maschinell weiter aufbereitet. Hierbei werden mehrere Endfeilen mit zunehmendem Durchmesser eingesetzt, auf denen jeweils die festgelegte Arbeitslänge mit einem Silikonstopper markiert wird. Zur unterstützenden Gewebeauflösung und Desinfektion wird mit Natriumhypochlorit gespült. Regelmäßiges Spülen des Wurzelkanals verhindert ein Verblocken durch Debris und unterstützt das Erreichen der vordefinierten Arbeitslänge.

Nachdem der Wurzelkanal gereinigt, aufbereitet und gespült wurde, kann eine desinfizierende medikamentöse Einlage (Kalziumhydroxid), zur Desinfektion des endodontischen Systems für wenige Tage bis mehrere Wochen eingebracht werden (Buck et al., 2001). Die Trepanationsöffnung muss in dieser Zeit provisorisch bakteriendicht verschlossen werden.

Wenn der Kanal ausreichend chemomechanisch aufbereitet ist, wird er in einer Folgesitzung mit Papierspitzen vollständig getrocknet und mit einem geeigneten Material abgefüllt. Hierzu wird ein zum Feilensystem formkongruenter Stift, der Masterpoint, in den Kanal eingebracht und mit einem Fingerspreader gegen die Kanalwand gedrückt. In der Regel werden hierfür Guttaperchastifte verwendet. Der durch den Fingerspreader entstandene Hohlraum wird mit einem Zusatzstift gefüllt, der ebenfalls wieder mit dem Fingerspreader gegen die Kanalwand gedrückt wird. Der Kanal wird so lange lateral kondensiert, bis der Fingerspreader nur noch weniger als 4 mm in den Wurzelkanal einführbar ist. Um auch kleinere Unebenheiten auszugleichen, Nebenkanäle zu verschließen und einen dichten Verbund zwischen den einzelnen Guttaperchastiften zu gewährleisten, wird mit den Stiften zusammen, ein cremig-pastöser Sealer in den Wurzelkanal eingebracht.

Dabei ist für den Erfolg der Behandlung äußerste Sorgfalt bei der Durchführung der Wurzelkanalfüllung entscheidender als die verwendeten Materialien (Coolidge, 1960).

Die Trepanationsöffnung muss am Ende der Behandlung adhäsiv bakteriendicht verschlossen werden, zum Beispiel mit Komposit.

1.3.1. Erfolgsfaktoren

Die ausschlaggebenden Kriterien für den Erfolg einer endodontischen Behandlung sind die korrekte Bestimmung der Wurzelkanallänge und das Einhalten der daraus resultierenden Arbeitslänge über den gesamten Verlauf der Behandlung. Über- und Unterinstrumentierung gelten als Faktoren für eine eingeschränkte Prognose des wurzelkanalbehandelten Zahnes. Auch das Ausmaß der apikalen Wurzelkanalfüllung hat einen signifikanten Einfluss auf die Heilung in der periapikalen Region (Ricucci & Langeland; 1998; Schaeffer et al., 2005; Lee et al., 2012).

Über die möglichst präzise Bestimmung der Arbeitslänge wird versucht, den optimalen apikalen Endpunkt der Wurzelkanalfüllung zu wählen.

Als apikaler Referenzpunkt sollte idealerweise die apikale Konstriktion getroffen werden (Abb. 1). Da sie visuell auch mit radiologischen Möglichkeiten nicht bestimmbar ist, ist man für die Festlegung des apikalen Referenzpunktes auf Näherungen oder auf Hilfsmittel wie Apexlokatoren angewiesen. Bei der Näherung besteht Übereinkunft darin, dass die Wurzelkanalfüllung 0-2 mm vom röntgenologischen Apex entfernt enden sollte (Kojima et al., 2004; Ng et al., 2008; Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 2004). Diese Angabe resultiert aus der anatomischen Gegebenheit, dass die apikale Konstriktion (physiologische Foramen) im Mittel 1 mm vom anatomischen Apex bzw. röntgenologischen Apex entfernt liegt (Dummer et al., 1984; ElAyouti et al., 2014; Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 2004). Der Einsatz von Apexlokatoren, mit denen man sehr genau die Lage der apikalen Konstriktion bestimmen könnte, ist in den Qualitätsrichtlinien der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie nicht zwingend vorgeschrieben (Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung Konsenspapier der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie, 2004) und

1. Einleitung

im aktuellen Einheitlichen Bewertungsmaßstab für zahnärztliche Leistungen nicht abgebildet (BEMA, 2019).

Da es sich bei der apikalen Konstriktion um die engste Stelle des Wurzelkanals handelt, sollte sie bei der Wurzelkanalbehandlung intakt bleiben, damit die Kontaktfläche von Füllungsmaterial und vitalem Gewebe möglichst klein gehalten werden kann (Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 2004).

Auch ein Abfüllen bis zum Foramen wurde lange Zeit diskutiert, jedoch konnten Untersuchungen keinen signifikanten Vorteil einer Methode gegenüber der anderen zeigen. Foramen und apikale Konstriktion liegen im Mittel nur 0,2 mm voneinander entfernt (ElAyouti et al., 2014), so dass auch bei exakter Arbeitsweise, aufgrund der Messfehler in Längenbestimmungen, die Bereiche präparativ kaum voneinander getrennt werden können.

Als koronaler Referenzpunkt kann oftmals eine gut definierbare Höckerspitze oder Schneidekante ausgewählt werden. Ist der Zahn jedoch anatomisch verändert oder koronal deutlich beschädigt (Trauma, Abrasion), so kann die Bestimmung eines koronalen Referenzpunkts ebenso schwierig sein, wie die Definition des apikalen Referenzpunktes.

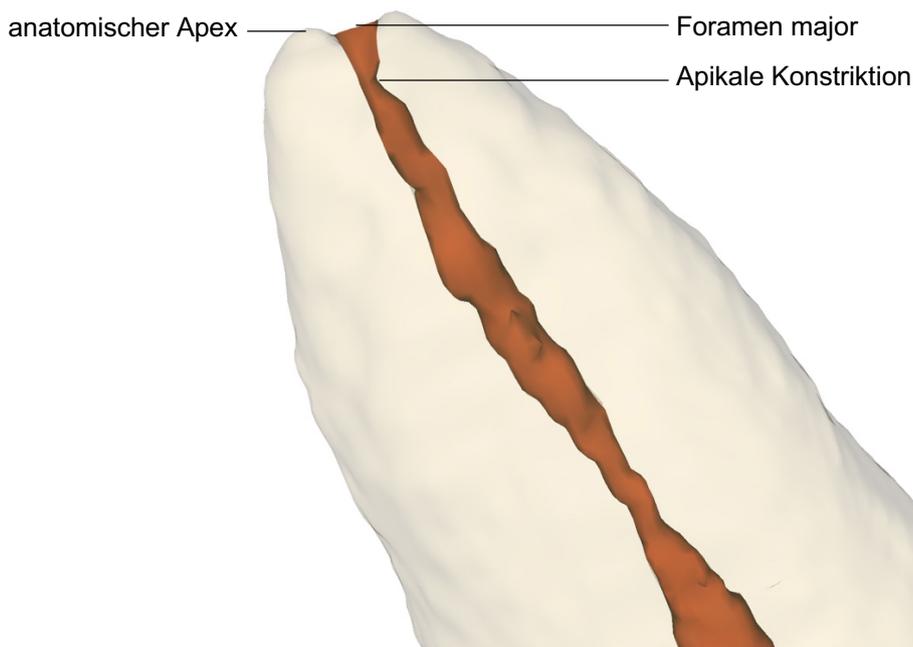


Abbildung 1: Apikale Anatomie

1.3.2. Problematik und Herausforderungen

Obwohl die endodontische Arbeitslänge sehr exakt mit der Kombination von einem Röntgenbild und elektronischen Apexlokatoren bestimmt werden kann, kommt es im Praxisalltag zu Über- und Unterinstrumentierungen (Nascimento et al., 2018).

Eine Unterinstrumentierung kann dazu führen, dass Mikroorganismen im Wurzelkanal verbleiben, da keine Reinigung durch die Wurzelkanalinstrumente und die Spüllösung im apikalen Bereich erfolgen kann. Anschließend wird der Wurzelkanal dadurch zu kurz abgefüllt (Nascimento et al., 2018), wodurch Mikroorganismen und Substrat verbleiben und eine erneute bakterielle Ausbreitung ermöglicht werden kann. Dies kann die Prognose des Zahnes verschlechtern (Ricucci & Langeland, 1998; Lee et al., 2012).

Überinstrumentierungen können auftreten, da das Foramen am Ende des Wurzelkanals in der zweidimensionalen Darstellung des Röntgenbildes nicht eindeutig abgebildet wird und das Foramen mehr als 2 mm vom Apex entfernt liegen kann. Eine Überinstrumentierung führt zur Zerstörung der apikalen Konstriktion, da Endofeilen von der Feilenspitze bis zum Schaft an Konizität zunehmen und somit bei der Aufbereitung die apikale Konstriktion abgetragen wird. Durchdringt die Endofeile das Foramen über eine längere Strecke, kann es neben der Verletzung des umgebenden Gewebes, auch zu einer stärkeren Erweiterung des Foramens kommen. Somit entsteht eine größere Verbindung zwischen dem infizierten Wurzelkanal und dem periapikalen Gewebe und zusätzlich können Mikroorganismen verschleppt werden. Hinzu kommt, dass so die apikale Konstriktion als apikaler Stopp zerstört würde und es bei der Wurzelkanalfüllung zu Überpressung des Materials, auch über das Foramen hinaus, kommen könnte (Nascimento et al., 2018). Dies würde dauerhaft eine apikale Reizung hervorrufen.

Generell wird eine Überinstrumentierung schädlicher für den Erfolg einer endodontischen Behandlung angesehen als eine Unterinstrumentierung (Ricucci & Langeland, 1998; Schaeffer et al., 2005).

1. Einleitung

Das Auftreten der Fehlinstrumentierung trotz exakter Bestimmung der Arbeitslänge gibt Anhalt zu der Annahme, dass während der Aufbereitung die festgelegte Arbeitslänge nicht eingehalten werden kann. Schon die visuelle Bestimmung der Arbeitslänge mit Hilfe einer Messlehre ist mit einem Fehler von 0,4 mm behaftet (ElAyouti & Löst, 2006). Da während eines Arbeitsablaufes in der Mehrzahl der Fälle mehrere Endfeilen verwendet werden, erhöhte sich das Risiko für das Auftreten dieses Ablesefehlers. Kann auch im weiteren Behandlungsverlauf die Arbeitslänge nicht exakt eingehalten werden, könnte durch Summation der Fehler die Zunahme der Arbeitslänge größer werden als die Länge der apikalen Konstriktion selbst. Damit wäre der optimale Endpunkt für eine Wurzelkanalfüllung nicht mehr vorhanden und die Prognose des Zahnes würde sich verschlechtern.

1.3.3. Fehlerquellen

Fehler können grundsätzlich in jedem Schritt der Behandlung durch ungünstige Arbeitsbedingungen, mangelnde Aufmerksamkeit, unzureichende Diagnose oder Ablaufplanung und durch Nichteinhaltung der festgelegten Prinzipien bei der mechanischen Aufbereitung auftreten (Nascimento et al., 2018). In einer computertomografischen Untersuchung von Nascimento et al. zeigte sich bei gut restaurierten Zähnen in über 60 % der behandelten Wurzelkanäle ein Fehler, in Form von Über-oder Unterfüllung, der sich mit dem Nichteinhalten der Arbeitslänge in Zusammenhang bringen lässt (Nascimento et al., 2018). Neben den Arbeitslängenbegrenzer, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird, kommen Hilfsmittel wie Lupenbrille und Operationsmikroskop zum Einsatz. Diese erhöhen die Genauigkeit beim Einstellen der Arbeitslänge, könnten aber auch zu überexaktem Arbeiten verleiten und dadurch ebenfalls zu Überinstrumentation führen.

1.4. Arbeitslängenbegrenzer

1.4.1. Silikonstopper

In der Regel wird die bestimmte Arbeitslänge mit einem Silikonstopper an der Endofeile markiert. Dieser Stopper ist grundsätzlich mit einem gewissen Widerstand auf der Endofeile frei beweglich. Der Durchmesser des Silikonstoppers ist mit 3,5 mm deutlich kleiner als der Durchmesser eines Zahnes. Besonders bei Molaren kann der Durchmesser der Trepanationsöffnung den Durchmesser des Silikonstoppers auch überschreiten. Es ist daher anzunehmen, dass es mit einem konventionellen Silikonstopper schwierig ist, die bestimmte Länge im gesamten Verlauf der Behandlung zu halten. Es besteht die Möglichkeit, dass der koronale Referenzpunkt bei der Auf- und Abwärtsbewegung der Endofeile während der Aufbereitung nicht jedes Mal exakt reproduziert werden kann. Der Silikonstopper könnte sich außerdem unbemerkt verschieben oder bei schräger Belastung auf der Endofeile kippen. Dadurch könnte es zu Abweichungen in der Arbeitslänge kommen. Ferner kommt es nach ElAyouti & Löst (2006) sowohl beim Einstellen der Arbeitslänge mit Silikonstopper als auch durch das Ablesen der Arbeitslänge an der Messlehre zu einem durchschnittlichen Fehler von 0,4 mm. Beim Verwenden mehrerer Endofeilen in einem Kanal kann es vermehrt zu Ungenauigkeiten kommen, da der Stopper jedes Mal neu eingestellt werden muss.

1.4.2. Stoppercap

Mit einer neu entwickelten Stoppercap (EIAyouti, noch nicht publiziert, internationale Patentnummer: WO2020/083911 A1) soll das Einhalten der Arbeitslänge vereinfacht werden (Abb. 2). Die Stoppercap wird anstelle des Silikonstoppers auf die Endfeile aufgeschoben, hat aber einen größeren Durchmesser und bedeckt dadurch den gesamten Zahn bündig. Daraus ergibt sich eine Referenzfläche, die größer und klarer definiert ist als ein einzelner Referenzpunkt. Die Stoppercaps gibt es in verschiedenen Stärken von 0,25 bis 5 mm Höhe. Mehrere Caps können zum Erreichen der gewünschten Länge kombiniert werden. Da die Stoppercap am Griff der Endfeile anschlägt, ist ein Verschieben der Stoppercap und damit eine unbeabsichtigte Veränderung der Arbeitslänge nicht möglich (Abb. 3).

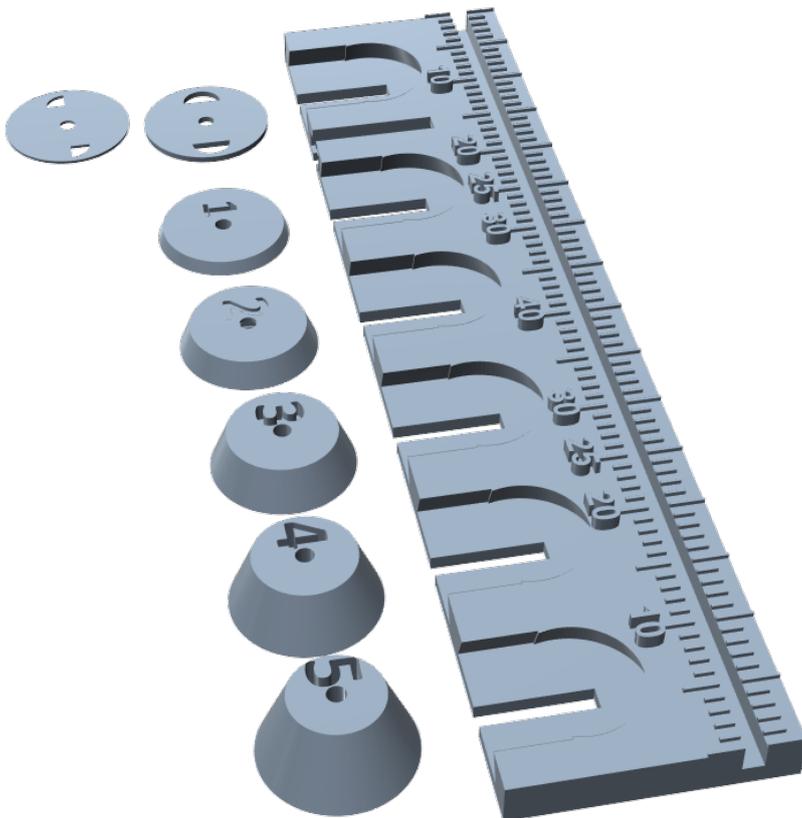


Abbildung 2: Stoppercap, verschiedene Stärken und dazugehörige Messlehre

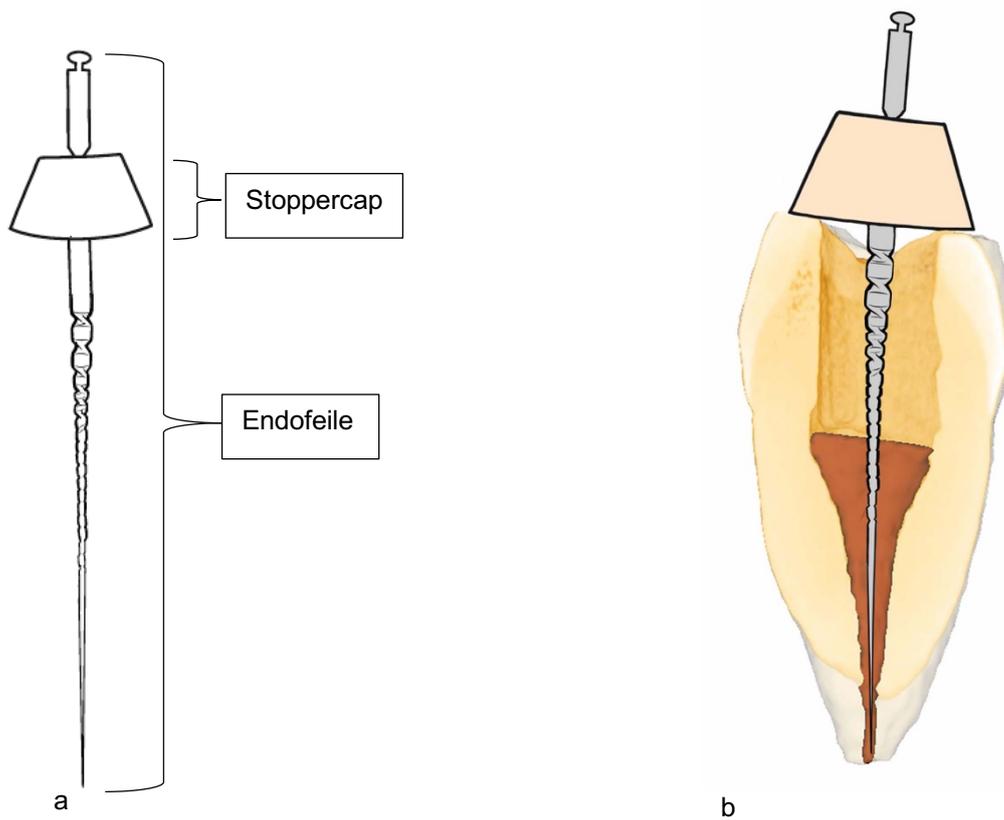


Abbildung 3: Stoppercap a) schematischer Sitz auf der Endofeile, b) eindeutig reproduzierbarer Sitz bündig auf der Zahnkrone

Die Reproduzierbarkeit ist dadurch höher, die Arbeitslänge kann sehr exakt eingestellt werden und auch das Einhalten der Arbeitslänge sollte damit sichergestellt werden.

Auch mögliche Fehlerquellen beim indirekten Arbeiten, sowie beim Arbeiten mit Hilfsmitteln wie Operationsmikroskop und Lupenbrille könnten eliminiert werden, da die Stoppercap immer einen festen, einheitlichen Sitz auf der Zahnkrone gewährleisten sollte und somit auch taktil, ohne Sicht gearbeitet werden kann.

Die Untersucherin war an der Entwicklung der Stoppercap nicht beteiligt.

1.4.3. Apexlokatoren

Auf dem Markt gibt es zur Bestimmung der Arbeitslänge sogenannte Apexlokatoren, mit denen die Lage der apikalen Konstriktion elektronisch ermittelt werden kann.

Die ersten Apexlokatoren zur Bestimmung der Wurzelkanallänge nutzten Gleichstrom und maßen den Widerstand zwischen dem Desmodont und der Mundschleimhaut. Eine Elektrode wurde von der Endfeile im Wurzelkanal gebildet, die Gegenelektrode von einem Lippenclip, der an der Mundschleimhaut anliegt. Dieses Messverfahren wurde erstmalig von Cluster im Jahre 1918 beschrieben (Cluster, 1918). Das Verfahren wurde 1942 von Suzuki weiterentwickelt, der bestimmte, dass der elektrische Widerstand zwischen dem Desmodont und der Mundschleimhaut, unabhängig von Zahnart und Wurzelkanalanatomie, konstant ist (Suzuki, 1942). Sunada (1962) bestimmte den konstanten Widerstand mit $6,5 \text{ k}\Omega$ und entwickelte darauf aufbauend eine Methode zur Bestimmung der Wurzelkanallänge. Mit diesen Geräten konnte die Lage des apikalen Foramens bestimmt werden, jedoch waren sie stark von der Umgebungssituation abhängig. Reste von Spülflüssigkeit oder Gewebeflüssigkeit sorgten dafür, dass der Stromkreislauf zu früh geschlossen wurde und so eine verkürzte Arbeitslänge ermittelt wurde (McDonald & Hovland, 1990). Trotz intensiver Trocknung des Wurzelkanals bewirkte Restfeuchte außerdem eine Polarisierung an der Instrumentenspitze und somit einen instabilen Stromkreislauf.

Eine Weiterentwicklung zur Vermeidung der Polarisierung der Instrumentenspitze war die Verwendung von Wechselstrom. Als Messgröße diente nicht mehr der elektrische Widerstand, sondern die Impedanz des Wechselstromkreises. Ermittelt wurde die Gesamtimpedanz, die sich aus der Elektrodenimpedanz und der Gewebeimpedanz zusammensetzte. Die Spülflüssigkeit beeinflusste die Messungen somit weiterhin und eine intensive Kanaltrocknung war weiterhin erforderlich. Diese Apexlokatoren bestimmten nur das apikale Foramen als Kontaktstelle mit dem Desmodont und nicht die apikale Konstriktion.

Im Jahre 1987 widerlegte Huang das Vorliegen eines konstanten Gewebewiderstandes von 6,5 k Ω , wie von Sunada beschrieben (Huang, 1987). Auf dieser Grundlage wurde im Folgenden der Schwerpunkt auf die Verwendung der Elektrodenimpedanz als Messgröße gelegt. Durch den Einsatz von zwei verschiedenen Wechselstromfrequenzen kann die Elektrodenimpedanz aus der Gesamtimpedanz berechnet werden, da die Elektrodenimpedanz stärker von der Wechselstromfrequenz abhängig ist als die Gewebeimpedanz (Differenzverfahren). Die Elektrodenimpedanz erreicht an der apikalen Konstriktion ihr Maximum, da als elektrisch leitende Querschnittsfläche nur noch die Endofeilenspitze zur Verfügung steht. Bei diesem Verfahren wurde der Einfluss von elektrisch leitenden Flüssigkeiten im Kanalsystem ebenfalls eliminiert.

Moderne Apexlokatoren ermitteln eine relative Impedanz. Sie messen und vergleichen relative Impedanzunterschiede hoch- und niedrigfrequenter Wechselströme, sodass mit ihnen sowohl die apikale Konstriktion, die engste Stelle des Wurzelkanals, als auch das apikale Foramen, als Kontaktstelle zum Desmodont, bestimmt werden kann (Kobayashi & Suda, 1994). An der apikalen Konstriktion erreicht die Impedanz aufgrund der kleinsten Querschnittsfläche, ihren höchsten Wert. Außerhalb des Wurzelkanals fehlt die Isolation durch das umliegende Dentin und die Querschnittsfläche ist besonders groß, was in einer niedrigen Impedanz resultiert.

Metallene Kronen oder verbliebene Karies führen zu Kurzschlussströmen und damit zu Fehlmessungen bei allen Messsystemen, woran bei unklaren Messergebnissen gedacht werden sollte (McDonald & Hovland, 1990).

1.4.4. Endomotor mit integriertem Apexlokatoren

Eine Weiterentwicklung der Apexlokatoren sind Endomotoren mit im Handstück integriertem Apexlokator, wie z.B. die Endomotoren VDW. Gold RECIPROC und MORITA Tri Auto ZX2, die schon während der Aufbereitung die Wurzelkanallänge bestimmen. Nach Angaben der Hersteller soll bei

1. Einleitung

eingeschalteter automatischer Stopp-Funktion das Instrument stoppen, sobald der Apex erreicht ist (Gebrauchsanweisung VDW. Gold RECIPROC). Es ist nicht bekannt, ob bei diesem Verfahren die apikale Konstriktion sicher erhalten bleibt.

Diese Funktion würde ohne das vorherige Bestimmen der Arbeitslänge auskommen, was eine Zeitersparnis während der Behandlung wäre. Außerdem würde das automatische Stoppen am Apex dem Behandler ein Sicherheitsgefühl während der Aufbereitung und bezüglich des Beibehaltens der Arbeitslänge geben. Unsicherheit in diesem Bereich wurde vor allem von unerfahrenen Behandlern als relevantes Problem beschrieben (Hanafi, 2020). Da sich die apikale Konstriktion unter Verwendung von Handfeilen mit elektronischen Apexlokatoren sehr genau bestimmen lässt (Connert et al., 2018), sollten auch sehr präzise Werte während einer maschinellen Aufbereitung mit der automatischen Stopp-Funktion erzielt werden können.

1.5. Fragestellung und Ziel der Untersuchung

In der Endodontie spielt die Einhaltung der Arbeitslänge für die Prognose des Zahnes eine entscheidende Rolle. Eine retrospektive Studie, die sich mit dem Überleben des Zahnes abhängig von der Ausdehnung der Wurzelkanalfüllung beschäftigt hat, zeigte Unterfüllungen in 12,3 % und Überfüllungen in 10,1 % der Fälle (Lee et al., 2012). In einer Computertomographieanalyse zu Ausführungsfehlern bei endodontischen Behandlungen wurden 6,6 % Überfüllungen und 38 % Unterfüllungen beschrieben (Nascimento et al., 2018). In einer Metaanalyse von Kojima et al. (2004) werden 33,8 % Unterfüllungen und 26,5 % Überfüllungen berichtet, wobei 85,5 % der Unterfüllungen und 70,8 % der Überfüllungen trotzdem als erfolgreich definiert wurden, da die peridontale Entzündung ausheilte bzw. rückläufig war.

Ng et al. (2008) zeigten in einer Metaanalyse, dass bei einer zu kurzen Abfüllung des Wurzelkanals, >2 mm vom radiologischen Apex entfernt, die Erfolgsrate der Therapie bei 76,8 % liegt. Erfolgt die Abfüllung über den

radiologischen Apex hinaus, sinkt die Erfolgsrate der Therapie auf 65,8 %. Bei Abfüllungen im Bereich von 2 mm koronal des radiologischen Apex liegt die odds ratio eines Therapieerfolges bei 2,34 (95% CI: 1,87, 2,93) im Vergleich mit zu lang abgefüllten Wurzelkanälen (Ng et al., 2008).

Es ist davon auszugehen, dass einer Überfüllung eine Überinstrumentierung vorausgegangen ist. Eine analoge Schlussfolgerung ist bei der Unterfüllung nicht so eindeutig zu treffen.

ElAyouti et al. (2001) zeigten, dass es bei 51 % der untersuchten Prämolaren mit rein radiografisch bestimmter Arbeitslänge zu Überinstrumentierungen kam. Dies zeigt, dass die Einhaltung der Arbeitslänge bei endodontischen Aufbereitungen ein Kriterium darstellt, welches nicht zufriedenstellend erfüllt wird.

Aktuell liegen noch keine Studien zur Frage vor, ob die vordefinierte Arbeitslänge, während einer endodontischen Aufbereitung mit einem Mehrfeilensystem über alle Schritte hinweg exakt eingehalten werden kann und welche Faktoren die Einhaltung der Arbeitslänge beeinflussen.

Ziel dieser Studie ist daher zu klären, inwieweit die Arbeitslänge während einer endodontischen Aufbereitung unter Verwendung des Silikonstoppers und der innovativen Stoppercap mit Handfeilen und rotierenden Instrumenten unter, an den klinischen Alltag angelehnten, Laborbedingungen eingehalten werden kann. Außerdem soll geprüft werden, ob mit der automatischen Stopp-Funktion im Handstück des Endomotors die Präzision in der endodontischen Behandlung erhöht werden kann.

2. Material und Methoden

2.1. Erstellung eines 3D-Zahnmodells

Für die Untersuchungen wurden sechs verschiedene im 3D-Verfahren mit Kunststoff gedruckte ein- und zweiwurzelige Prämolaren verwendet. Die Druckvorlagen basierten auf Mikro-CT-Scans humaner extrahierter Zähne mit abgeschlossenem Wurzelwachstum.

Die Auswahl wurde, aufgrund ihrer weniger komplexen Kanalanatomie, auf Prämolaren beschränkt.

Bei der Selektion der Zähne wurde darauf geachtet, dass die anatomischen Strukturen gut darstellbar waren und dass sie nur ein singuläres gut sichtbares Foramen aufwiesen. Es wurden nur Zähne ausgewählt, die schon trepaniert waren, da die Ausführung der Trepanation für die Untersuchung nicht relevant war (Abb. 4).

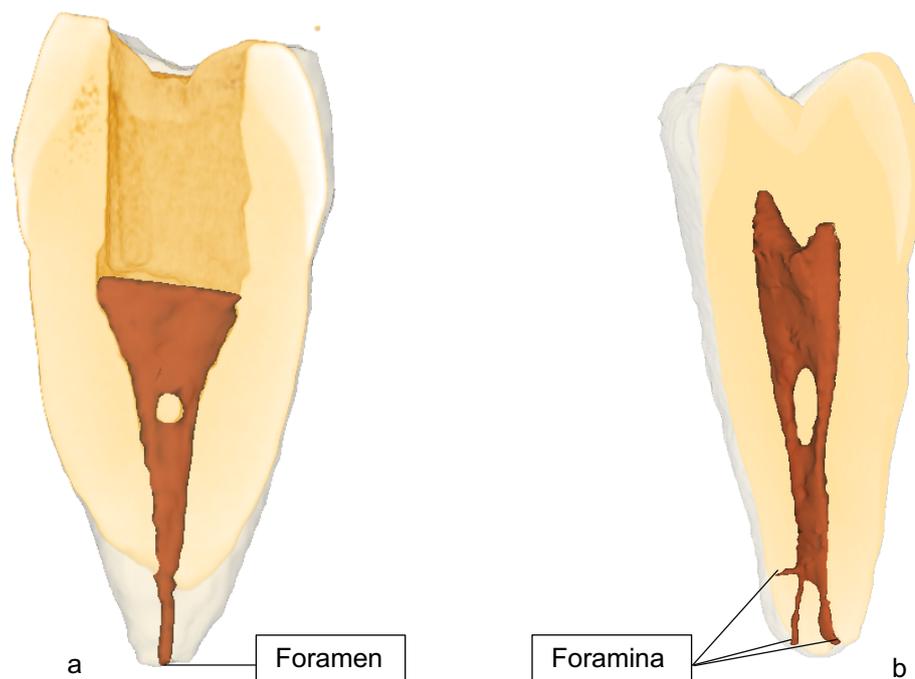


Abbildung 4: Grafische Darstellung der 3D-Rekonstruktion eines verwendeten Zahnmodells (angeschnitten) mit einem Foramen (a) im Vergleich zu einem mit mehreren Foramina (b), das ausgeschlossen wurde

Des Weiteren sollte der koronale Referenzpunkt gut zu definieren sein und die Wurzelkanäle sollten keine starken Krümmungen aufweisen.

Ein gut definierbarer, reproduzierbarer koronaler Referenzpunkt ist für das Einhalten der definierten Arbeitslänge entscheidend, da bereits minimale Abweichungen zu einer Verlängerung oder Verkürzung der Arbeitslänge führen (Abb. 5).

Aus allen Mikro-CT-Scans, die diese Kriterien aufwiesen, wurden zufällig sechs verschiedene Zahnanatomien für die Untersuchungen ausgewählt.

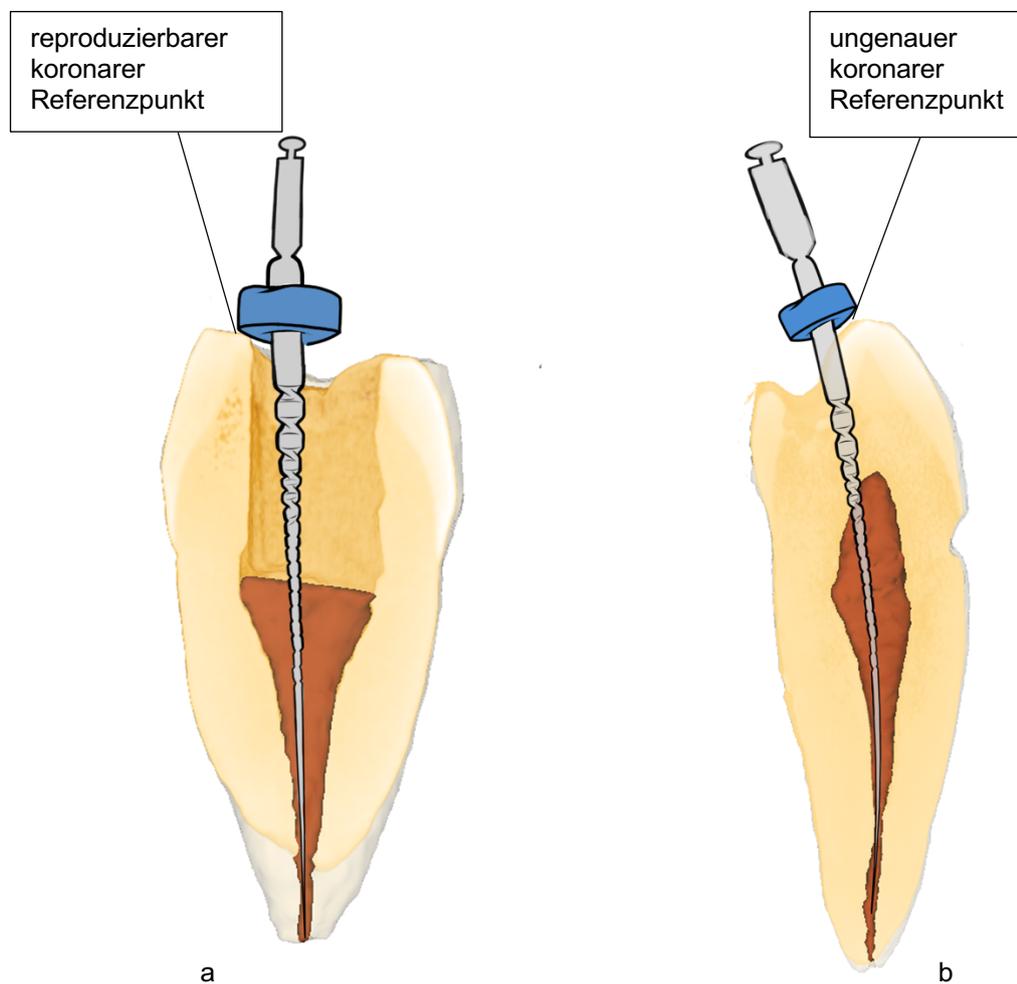


Abbildung 5: Vergleich zwischen einem gut reproduzierbaren koronalen Referenzpunkt (a) und einem schwierigeren (b), da es hier beim Verwenden des Silikonstoppers (blau) aufgrund des schrägen Höckers zu einem schiefen Aufliegen kommt, die Zähne sind angeschnitten dargestellt

2. Material und Methoden

Mit dem Programm 3D Slicer (3D Slicer Version 4.3.2, <https://www.slicer.org>) wurden die Mikro-CT-Scans bearbeitet. Zur Reduktion der Dateigröße wurde jeweils nur jeder vierte Schnitt eines Scans verwendet, anschließend wurde segmentiert.

Fehlerhaft markierte Graustufen wurden händisch korrigiert.

Die Kanal Anatomie wurde während des Vorgehens nicht verändert.

Das so entstandene 3D-Modell wurde in einer vorläufigen STL-Datei für die weitere Bearbeitung gespeichert.

Diese STL-Datei wurde in das Programm Meshmixer (Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA) importiert. Hier wurde die Oberfläche der 3D-Zähne geglättet und damit nicht-relevante Details entfernt

Mit dem Programm Autodesk123D (Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA) wurden die 3D-Zähne vor dem Druck, zur besseren Sichtbarkeit des Wurzelkanals, in der Längsachse virtuell halbiert. Der Kanal wurde hierbei nicht eröffnet. Der Zahn erhielt zu diesem Zweck eine durchsichtige Struktur.

Zur Orientierung im Raum wurde nahe an dem Zahn eine virtuelle Hilfsbox geschaffen. Entlang des Wurzelkanals konnte daraufhin mit dem Cursor am Bildschirm eine Schnittebene gezeichnet werden.

Nach Entfernung der Hilfsbox wurde aus der individuell gezeichneten Schnittfläche ein virtuelles Objekt erstellt.

Dieses Objekt, welches dem Verlauf des Wurzelkanals anlag, wurde von dem Zahnmodell subtrahiert, sodass eine angeschnittene Wurzeloberfläche entstand. Die Durchsichtigkeit wurde hierdurch wieder aufgehoben.

Im unteren Wurzel Drittel wurde auf der angeschnittenen Fläche in den Datensätzen eine 0,25 mm breite Kalibrierungsreferenz als Maßstab hinzugefügt. Hierzu wurde eine Box mit den Maßen 1 cm / 1,5 cm / 0,25 cm erzeugt und in das Zahnmodell hineingeschoben.

Es wurde darauf geachtet, dass die Box den Wurzelkanal nicht tangiert.

Die beiden Objekte (Zahn und kleine Box) wurden durch Addition verbunden (Abb. 6), so entstanden jeweils die endgültigen virtuellen Zahnmodelle und die STL-Dateien für den 3D-Druck.

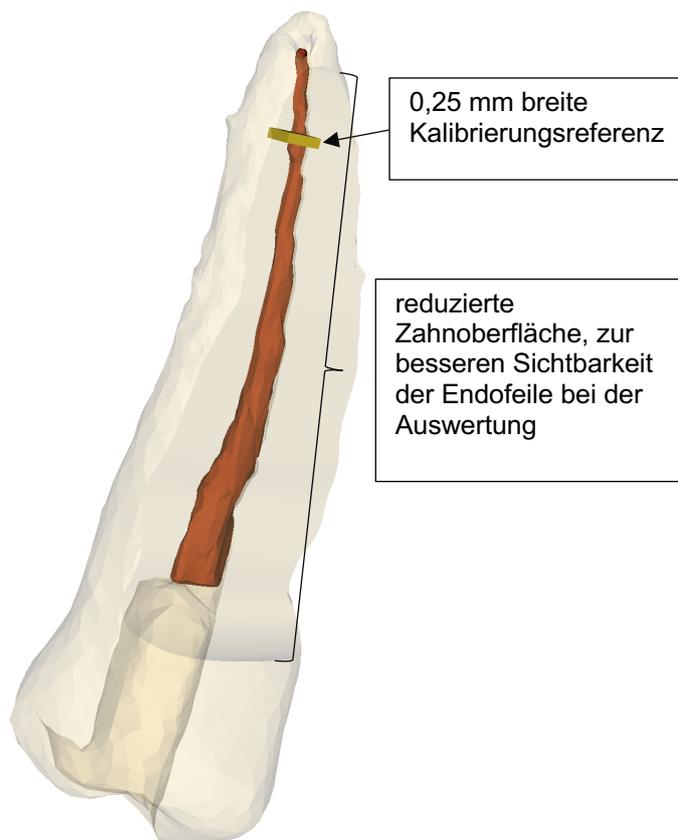


Abbildung 6: fertiges 3D-Zahnmodell mit Kalibrierungsreferenz gelb, Pulpa rot dargestellt

Der Druck erfolgte mit einem OBJET 30 Orthodesk (Stratasys GmbH, Rheinmünster) in klarem oder opakem Kunststoff mit einer Sichtstärke von etwa 30 μm (Bio-Compatible MED610/MED620, Stratasys GmbH, Rheinmünster).

Nach dem Druck wurden die Zähne in Wasser gelagert und anschließend das Stützmaterial entfernt. Bis zur weiteren Verwendung wurden die Zähne trocken gelagert.

Zur besseren Sichtbarkeit wurde die 0,25 mm breite Kalibrierungsreferenz mit einem handelsüblichen wasserfesten Folienstift schwarz nachgezogen.

2.2. Aufbereitungsmaterial

Zur Handaufbereitung der Wurzelkanäle wurde eine Stahlfeile (Kerr-Feile) der ISO Größe 15/.02 (VDW GmbH, München) verwendet. Die anschließende maschinelle, rotierende Aufbereitung erfolgte mit dem Endomotor VDW. Gold RECIPROC und vollrotierenden Mtwo Nickel-Titan Feilen der ISO Größe 15-30 (VDW GmbH, München) die aufeinanderfolgend verwendet wurden.

Die ISO Größe definiert den Durchmesser der Endofeilenspitzen (ISO 15 = 0,15 mm Durchmesser an der Spitze). Das Mtwo Endofeilensystem ist ein rotierend arbeitendes System, bei dem die Endofeilengrößen aufeinander aufbauen. Es werden in Fünferschritten farbcodierte Endofeilen der ISO Größe 10-50 und zusätzlich ISO Größe 60 angeboten. Für besondere Anforderungen, wie z.B. breite Kanäle oder Revisionen, sind Sondergrößen verfügbar. Die Endofeilen sind konisch geformt. Die zunehmende Konizität (10/.04, 15/.05, 20/.06, 25/.06) soll für stabile Endofeilen und einen effektiven Substanzabtrag sorgen. Die Endofeile der ISO Größe 30 hat eine Konizität von 5 %, ab ISO Größe 35 bleibt die Konizität bei 4 %, sodass substanzschonend gearbeitet werden kann. Eine Konizität von 5 % sagt aus, dass der Durchmesser der Endofeile pro 1 mm Entfernung von der Feilenspitze, um 0,05 mm zunimmt. Bei den Versuchen zur Überprüfung der automatischen Stopp-Funktion wurde außerdem der Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 (J. Morita Europe GmbH, Dietzenbach) mit Nickel-Titan Feilen der ISO Größe 5-30 eingesetzt.

Während der Aufbereitung wurde mit Wasser gespült. Für die Versuche mit der automatischen Stopp-Funktion wurde 0,9 %ige NaCl-Lösung als ein leitendes Milieu (Fresenius Kabi Deutschland GmbH, Bad Homburg) verwendet.

Zusätzlich zu den standardmäßigen Silikonstoppers der Endofeilen wurde eine innovative Stoppercap getestet (Leihgabe Dr. ElAyouti, nicht publiziert). Diese Stoppercaps liegen in sieben verschiedenen, untereinander kombinierbaren Stärken (0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm) vor.

Die Aufbereitungen wurden mit einer Canon EOS 760 D mit Ultrasonic 100 mm gefilmt. Die Auflösung betrug 1920 x 1080 Bildpunkten und es wurden 30 Bilder pro Sekunde aufgenommen (Abb. 7).

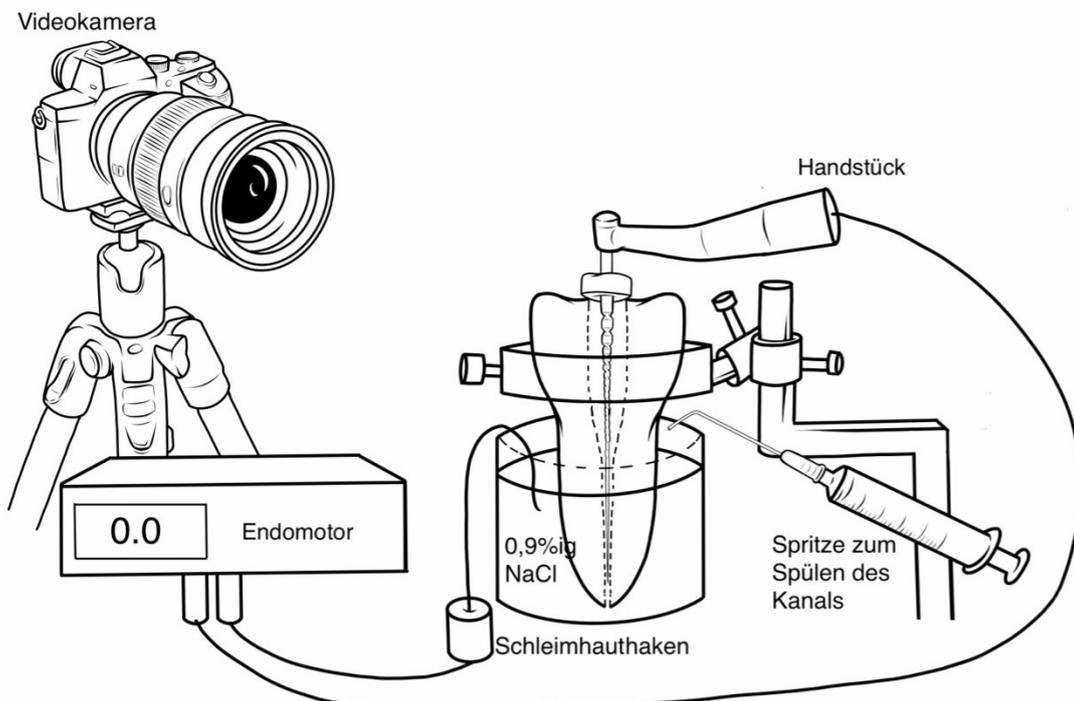


Abbildung 7: schematischer Versuchsaufbau

2. Material und Methoden

Bei der Verwendung des Silikonstoppers wurde ein Mundspiegel eingesetzt, um das Arbeiten in schwerzugänglichen Kieferbereichen zu simulieren, in denen die Auflage des Stoppers auf dem koronalen Referenzpunkt nur im Spiegel sichtbar ist.

Das verwendete Operationsmikroskop (Möller-Wedel International, Wedel) wurde mit einer 2,6fachen bis 15,5fachen Vergrößerung verwendet, die Lupenbrille (starMed, Grafing) hatte eine Vergrößerung von 2,7x.

Es wurde eine dentale Maillefer Messlehre (Dentsply Sirona, Bensheim) zum Ausmessen der jeweiligen Arbeitslänge genutzt.

2.3. Gerätebeschreibung

Beide verwendeten Endomotoren bieten verschiedene Einstellmöglichkeiten zur Anpassung an die vorgefundene individuelle Situation.

Der Endomotor VDW. Gold RECIPROC bietet neben der rechtsdrehenden rotierenden Aufbereitung die Möglichkeit mit einem speziellen linksdrehenden Endofeilensystem reziprok zu arbeiten. Dies bedeutet, dass eine Teilrotation nach links ausgeführt wird, auf die eine kleinere Rechtsrotation folgt. Dieser Zyklus läuft etwa 10-mal pro Sekunde ab. Durch die Rückrotation wird der Wurzelkanal gereinigt und abgetragenes Material nach koronal befördert, was besonders bei gekrümmten Kanälen von Vorteil ist und das Risiko einer Endofeilenfraktur reduziert. Bei komplizierten Wurzelkanal-Anatomien kann zur Vermeidung von Perforationen oder Stufenbildung das Drehmoment des Endomotors reduziert werden (ANA-Funktion). Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden diese Funktionen nicht genutzt und ausschließlich mit vollrotierenden linksschneidenden Endofeilen gearbeitet.

Bei dem Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 kann eine Funktion genutzt werden, die der Handaufbereitung entsprechend der Balanced-force-Technik nachempfunden ist (Optimal Glide Path-Funktion, OGP). Hierbei rotiert die

Endofeile ebenfalls abwechselnd rechts und links. Diese Funktion wurde bei den Aufbereitungen nicht genutzt, da sie besonders für gekrümmte oder enge Wurzelkanäle geeignet ist. Bei den hier vorliegenden geraden Kanälen wurde rein rotierend aufbereitet.

Beide Geräte verfügen über eine automatische Begrenzung des maximalen Drehmoments, um Endofeilenfrakturen zu verhindern. Beim Endomotor VDW. Gold RECIPROC wird zusätzlich das Drehmoment an die im Winkelstück eingespannte Endofeile angepasst, wenn in der Bedieneinheit die entsprechende Endofeile ausgewählt wurde.

Beide Endomotoren verfügen über einen integrierten Apexlokator, was die Längenkontrolle während der Aufbereitung erleichtern soll.

Der Endomotor VDW. Gold RECIPROC hat eine Digitalanzeige zur optischen Längenkontrolle, die acht LED-Stufen umfasst. Die ersten drei LEDs leuchten in der Farbe Blau und stellen den koronalen Kanalabschnitt dar. Darauf folgen drei grüne LEDs und eine orange LED. Diese vier LEDs spiegeln den apikale Kanalabschnitt wider, wobei das Aufleuchten der dritten grünen LED den optimalen Endpunkt der Endofeilenspitze darstellt. Die orange LED sollte in den meisten Fällen der Lage des Foramen apikale entsprechen. Beim Aufleuchten der darauffolgenden roten LED wurde mit der Endofeilenspitze das Foramen apikale überschritten. Zusätzlich zur optischen Längenkontrolle gibt die Bedieneinheit des Endomotors VDW. Gold RECIPROC akustisches Feedback über den Feilenvorschub mit einem in der Frequenz zunehmenden Signalton. Die optische Längenkontrolle und das akustische Feedback sollten synchron zum beobachteten Feilenvorschub sein.

Der kabellose Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 gibt die Position der Endofeile im Wurzelkanal ebenfalls über eine Digitalanzeige wieder. Die Skalierung verläuft in den Stufen 3, 2, 1, 0,5, Ap. Laut Hersteller soll die Position 0,5 der apikalen Konstriktion entsprechen und somit die optimale Arbeitslänge darstellen. Synchron zum Feilenvorschub gibt der Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 ebenfalls akustisches Feedback in Form eines frequenzansteigenden Signaltons.

Bei allen Aufbereitungen, ausgenommen der Versuche zur Überprüfung der automatischen Stopp-Funktion, war die automatische Stopp-Funktion am VDW. Gold RECIPROC Motor ausgeschaltet. Die feilenspezifische Drehmomentkontrolle wurde entsprechend der Gebrauchsanweisung genutzt. Als Drehgeschwindigkeit wurde 280 rpm gewählt. Die Automatic Stopp Reverse Funktion (ASR) war aktiviert, sodass die Endofeile bei Übersteigen des Drehmomentes zurück rotiert.

Bei den Versuchen zur Überprüfung der automatischen Stopp-Funktion war diese im Menü aktiviert und die Endofeile sollte automatisch bei Erreichen des Apex stoppen.

Beim Morita Tri Auto ZX2 war die Optimum Torque Reverse Funktion (OTR) eingeschaltet, sodass die Endofeile bei Übersteigen des voreingestellten Drehmoments zurück rotiert, um einen Endofeilenfraktur zu vermeiden. Die Drehgeschwindigkeit betrug 300 r/min. Bei diesem Gerät besteht die Möglichkeit verschiedene Abstände bis zum Apex oder den Apex selbst (Einstellung Ap) auszuwählen, an dem die Endofeile stoppen soll. In allen Versuchen wurde die Einstellung Ap gewählt, um eine Vergleichbarkeit zum Endomotor VDW. Gold RECIPROC zu gewährleisten und weil für die Auswertung das Foramen am Apex als Endpunkt gewählt wurde.

2.4. Festlegung der Arbeitslänge je Zahntyp

Die exakte Arbeitslänge wurde am freien Zahn unter dem Operationsmikroskop bestimmt. Hierzu wurde eine Kerr-Feile ISO Größe 15/.02 in den Wurzelkanal eingebracht und dem Wurzelkanalverlauf folgend durch das Foramen vorgeschoben. Die Feilenlänge wurde entsprechend der angenommenen Zahnlänge gewählt. Zur Auswahl standen Kerr-Feilen der Länge 21, 25 oder 31 mm. Die Kerr-Feile wurde dann zurückgezogen, sodass die Endofeilenspitze bündig mit dem Foramen war.

So wurde, anders als bei der Patientenversorgung üblich, als apikaler Referenzpunkt, aus Gründen der besseren Bestimmbarkeit, das apikale Foramen und nicht die apikale Konstriktion gewählt.

Die Kerr-Feile blieb durch den inneren Widerstand im Kanal fixiert, sodass der Silikonstopper auf einem koronalen Referenzpunkt positioniert werden konnte.

Die Kerr-Feile wurde aus dem Kanal entnommen und der Abstand vom Silikonstopper zur Endfeilenspitze an der Messlehre abgelesen und notiert.

Die Arbeitslänge für die jeweiligen Aufbereitungen des Wurzelkanals für diesen Zahntyp war so definiert.

Für die Versuche mit den Stoppercaps wurde die Arbeitslänge direkt unter dem Operationsmikroskop durch sukzessives Aufstecken verschiedener Stoppercapstärken festgelegt, sodass die Feilenspitze der Kerr-Feile ISO Größe 15/.02 bündig mit dem Foramen war. Da die Stoppercaps koronal auf vielen Punkten aufliegen, ist die Bestimmung eines singulären koronalen Referenzpunktes nicht notwendig und eine sichere Reposition während der Aufbereitung gewährleistet (Abb. 8).

2. Material und Methoden

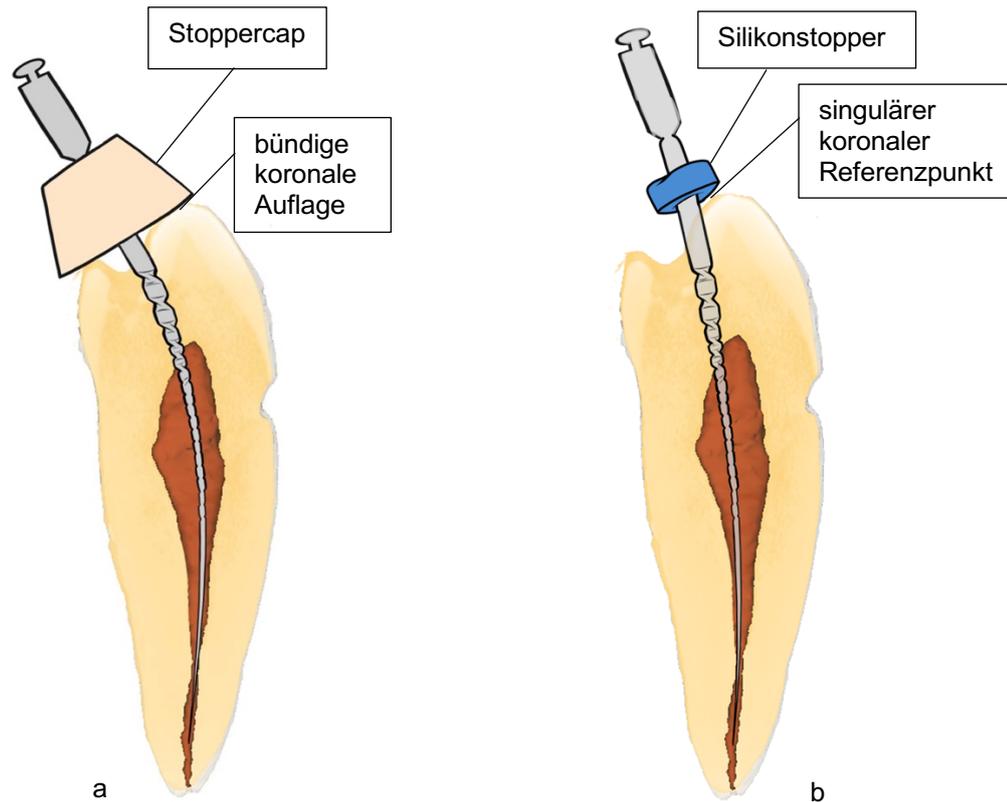


Abbildung 8: Stoppercap (a) und Silikonstopper (b) im Vergleich an einem schwierigen koronalen Referenzpunkt, Zähne angeschnitten dargestellt

2.5. Untersuchungsmethode

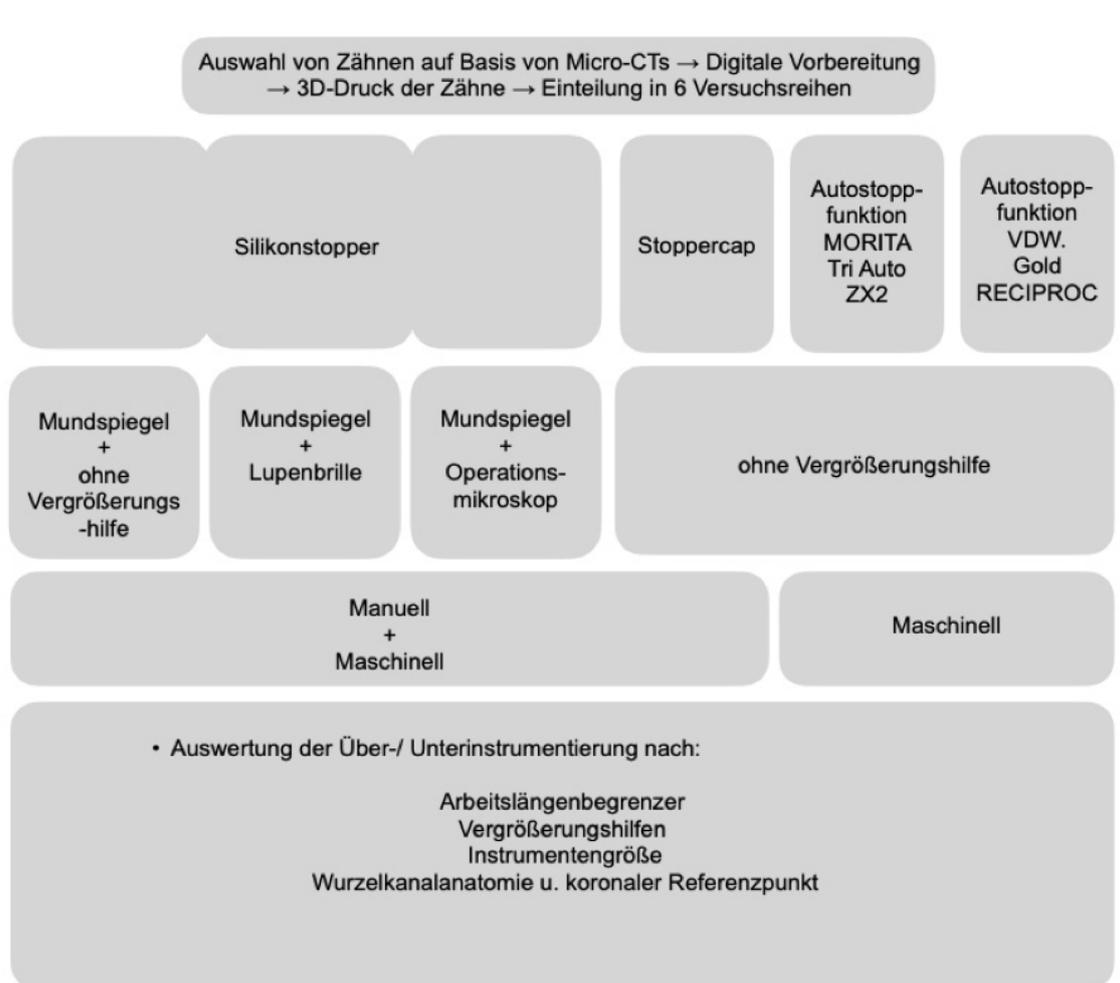
Der zu untersuchende Zahn wurde für die Aufbereitung in einer speziell gefertigten Halterung befestigt. Die Halterung ermöglicht durch einen asymmetrisch geformten Rahmen und einen beweglichen, asymmetrisch geformten Stempel die exakte individuelle Positionierung des Zahnmodells. Die Zahnwurzel befand sich zur Erhöhung des Kontrastes vor einem orangefarbenen Hintergrund.

Die Sicht auf die äußere Zahnwurzel war, wie bei der Patientenbehandlung, während der Aufbereitungen für den Behandler verdeckt. Damit war, trotz teilweise verwendetem transparentem 3D-Zahn, eine zusätzliche äußere visuelle Längenkontrolle durch den Untersucher ausgeschossen.

Alle Aufbereitungen wurden mit einer Spiegelreflex-Systemkamera aufgenommen. Der Fokus war auf das apikale Foramen eingestellt. Für den Untersucher war während der Aufbereitung die Videoaufnahme nicht einsehbar.

Um den klinischen Bezug zu erhöhen, wurden unterschiedliche Szenarien simuliert. So ergaben sich pro Zahn sechs Versuchsreihen:

Tabelle 1: Flowchart Versuchsablauf



Für jede Versuchsreihe wurde ein neuer Zahn des gleichen Zahntyps verwendet, insgesamt 36 Zähne.

2.5.1. Aufbereitung mit dem Silikonstopper und der Stoppercap

Die Aufbereitung des Wurzelkanalsystems erfolgte beginnend mit einer Kerr-Feile ISO Größe 15/.02. Anschließend folgte die schrittweise maschinelle Aufbereitung mit rotierenden Endofeilen der Größen 15/.05, 20/.06, 25/.06, 30/.05.

In dieser Studie ist eine Aufbereitung definiert, als Verwendung aller für die Methodik festgelegten Endofeilen. Ein Aufbereitungsschritt ist hier der Einsatz einer Endofeile bis zum Erreichen der vordefinierten Arbeitslänge.

Bevor eine Endofeile in den Wurzelkanal eingebracht wurde, wurde der Silikonstopper auf der Endofeile auf die, für den Zahntypen vorab bestimmte Arbeitslänge eingestellt. Hierzu wurde eine Messlehre genutzt. Die Endofeilenspitze zeigte hierbei auf die Oberkante der entsprechenden mm-Markierung und der Silikonstopper schloss mit seiner Unterkante bündig an der Messlehre ab.

Bei den Untersuchungen unter Verwendung der Lupenbrille wurde der Silikonstopper unter Sicht durch die Lupenbrille, mit Hilfe der Messlehre, auf die vordefinierte Arbeitslänge eingestellt.

Zum Einstellen der Arbeitslänge, unter Verwendung der Stoppercap, wurden entsprechend viele Stoppercaps auf die Endofeile aufgeschoben, bis die ausgewählte Endofeilenlänge (21, 25, 31 mm) so weit reduziert wurde, bis die Arbeitslänge erreicht war. Die richtige Einstellung der Arbeitslänge wurde ebenfalls mit der Messlehre kontrolliert. Die Spitze der Endofeile musste hierbei die Oberkante der mm-Markierung an der Messlehre erreichen.

Die Länge der Kerr- bzw. Endofeilen (21, 25, 31 mm) wurde passend zur bestimmten Arbeitslänge ausgewählt. Mehrheitlich wurde mit einer 25 mm langen Endofeile gearbeitet.

Mit der Handfeile Kerr ISO Größe 15/.02 wurde mit der Balanced-force-Technik bis zum Erreichend der eingestellten Arbeitslänge vorgearbeitet. Bei der anschließenden maschinellen Aufbereitung wurde die Endofeile rotierend in den Wurzelkanal eingebracht und unter zügigen Auf- und Abwärtsbewegungen mit leichtem apikalen Druck bis auf die voreingestellte Arbeitslänge bewegt.

Trotz der praxisnahen dynamischen Aufbereitung wurde exakt auf die Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge geachtet.

Zwischen den Aufbereitungsschritten und bei Bedarf wurde der Zahn mit H₂O gespült, sodass keine Späne den Wurzelkanal verblocken konnte.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Versuchsaufbau für die Untersuchungen unter indirekter Sicht durch einen Mundspiegel (Abb. 9). Es ist deutlich zu sehen, dass die Auflage des Silikonstoppers auf dem koronalen Referenzpunkt nicht in der direkten Aufsicht, sondern nur im Mundspiegel zu erkennen ist.

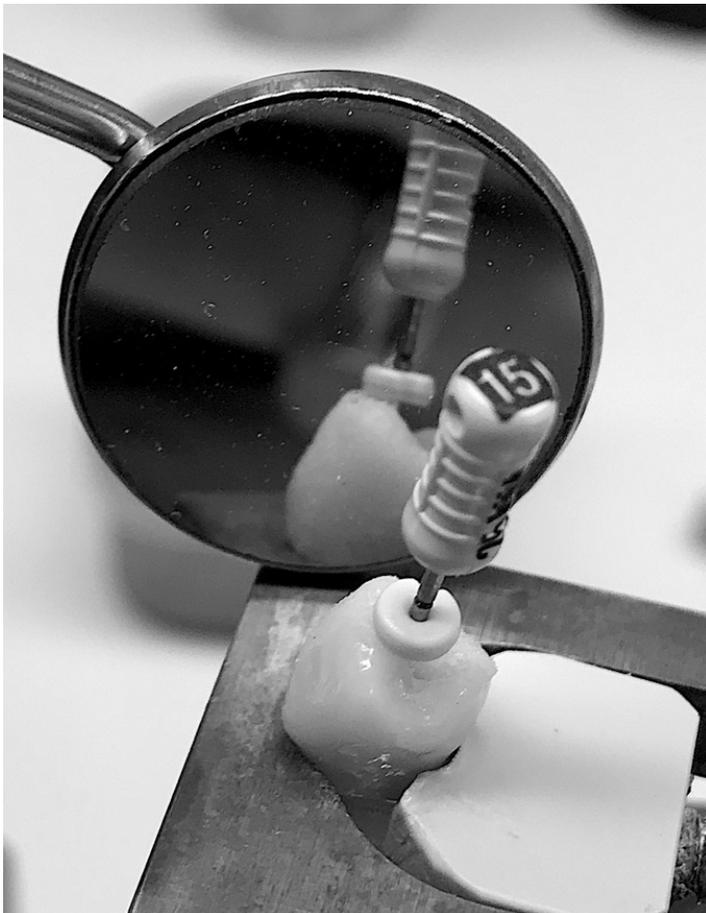


Abbildung 9: Zahnmodell in Haltevorrichtung eingespannt, Endfeile mit Silikonstopper in Wurzelkanal eingeführt, die Auflage des Silikonstoppers auf dem Referenzpunkt ist nur durch den Mundspiegel erkennbar

2.5.2. Aufbereitung unter Verwendung der automatischen Stopp-Funktion

Bei den Versuchen unter Verwendung der automatischen Stopp-Funktion wurden Latex-Handschuhe (Omnident, Rodgau) zur elektrischen Isolation getragen.

Die Zahnwurzel ragte in eine Küvette, deren Hinterwand aus Kontrastgründen mit oranger Folie beklebt war. Die Küvette war mit 0,9 %iger NaCl-Lösung gefüllt, in die auch der Lippenclip als Gegenelektrode eintauchte.

0,9 %ige NaCl-Lösung simuliert das physiologische Milieu der Mundhöhle und der Lippenclip stellt die elektrische Verbindung zum VDW. Gold RECIPROC bzw. zum MORITA Tri Auto ZX2 zur Messung der Arbeitslänge mit dem Apexlokator her. Auf die vorherige Bestimmung der Arbeitslänge, das Markieren der Arbeitslänge mittels eines Silikonstoppers und die Handaufbereitung mit der Kerr-Feile ISO 15/.02 wurde bei diesen Versuchsansätzen verzichtet, da die Geräte automatisch am Apex stoppen sollten und durch eine vorherige Handaufbereitung keine unbeabsichtigte Veränderung am Apex hervorgerufen werden sollte. Es wurde direkt mit der schrittweisen maschinellen Aufbereitung mit rotierenden Endfeilen der Größen 15/.05, 20/.06, 25/.06, 30/.05 gestartet. Die Endfeile wurde rotierend in den Wurzelkanal eingeführt und unter zügigen Auf- und Abbewegungen mit leichtem Druck nach apikal bewegt. Kam es zum Verblocken des Kanales durch Materialspäne, so wurde mit 0,9 %iger NaCl-Lösung gespült, um die Verblockung aufzulösen und um das physiologische Umgebungsmilieu aufrecht zu erhalten.

Stoppte der Endomotor automatisch, um das Erreichen des Foramen apikale anzuzeigen, so wurde unter Betätigen des Fußschalters bzw. des Knopfes am Handstück, der Motor wieder gestartet und die Endfeile rotierend aus dem Kanal entfernt, analog der Vorgehensweise im klinischen Alltag.

Anschließend wurde der Kanal umfangreich gespült und die nächste Endfeile rotierend eingeführt. Diese Vorgänge wurden bis zur letzten Endfeile (30/.05) wiederholt.

2.6. Messmethode

In den Videosequenzen wurde an einem 24“ HD-Monitor (2408WFPb, Dell, Round Rock, TX, USA) der maximale Vortrieb der Endfeilenspitze (E) ermittelt und als Standbild festgehalten. Die Standbilder wurden in PowerPoint 97–2003 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) importiert.

Die exakte Lage des Foramens wurde am jeweiligen 3D-gedruckten Zahn festgelegt. Hierzu wurde eine Kerr-Feile ISO Größe 15/.02 in den Kanal eingeführt und über das Foramen hinaus vorgeschoben, um so die Lage des Foramens eindeutig zu bestätigen. Anhand von sichtbaren Merkmalen (Einziehungen, Ausstülpungen) auf der Wurzeloberfläche wurde die Lage des Foramens auf der Aufnahme identifiziert. Wichtig war hierbei, dass sich bei der Festlegung der Lage des Foramens der Zahn in der gleichen Position befand, wie er auf der Aufnahme fixiert war.

War das Foramen (F) bei einer Messung nicht eindeutig auf der Aufnahme zu erkennen, so wurde an einer Aufnahme desselben Zahnes der gleichen Versuchsreihe, die Lage des Foramens bestimmt. Die Wurzelspitze wurde daraufhin mit dem Cursor am Bildschirm umrandet, das Foramen markiert und dies dann durch Überlagerung auf die Aufnahme ohne erkennbares Foramen übertragen (Abb. 10).

Bei 3-12facher Vergrößerung wurde in den Standbildern am Bildschirm der Abstand der Endfeilenspitze zum Foramen (A) mit Hilfe der Software-integrierten Messfunktion ermittelt. Ebenso wurde die Breite der Kalibrierungsreferenz B (0,25 mm) bestimmt. Mit der Formel $\frac{0,25 \times A}{B}$ wurden die Bildschirmmessungen auf das reale Maß für den Abstand der Feilenspitzen zum Foramen umgerechnet.

Alle Messungen wurden einmal durchgeführt.

Messwerte wurden mit negativen Vorzeichen notiert, wenn der maximale Vortrieb der Feilenspitze koronal vom Foramen lag. Messwerte, bei denen der maximale Vortrieb der Feilenspitze apikal vom Foramen lag, wurden als positive Werte notiert.

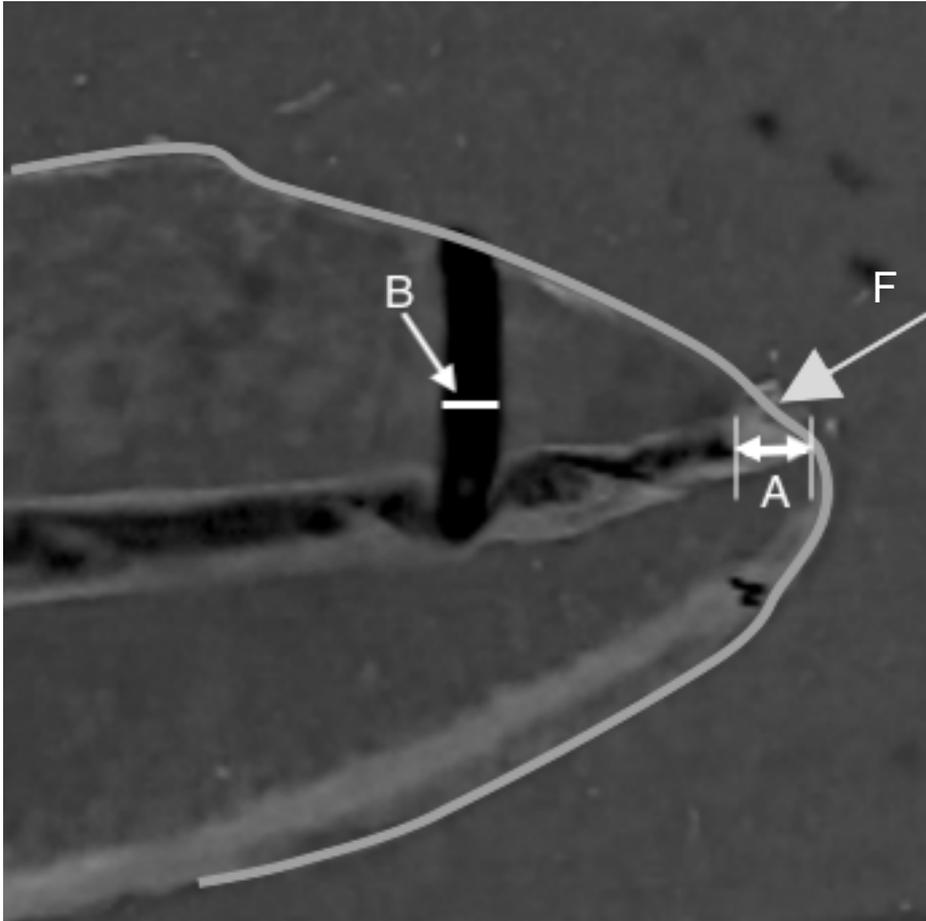


Abbildung 10: Erläuterung der Messmethode, A: Abstand der Endfeilenspitze zum Foramen, B: Breite der Kalibrierungsreferenz, F: Foramen

2.7. Auswertung

Die Messwerte wurden in einer Excel Tabelle (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) gesammelt. Für die Auswertung wurde die Excel Tabelle in das Statistikprogramm JMP von SAS-Institute übertragen. Ein Datenscreening und eine Fehleranalyse wurden durchgeführt und auffällige Messwerte anhand der Originalaufnahmen kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert.

Als Unterinstrumentierung wurden alle Messwerte gewertet, bei denen die Endfeilenspitze mehr als 0,25 mm koronal vom Foramen entfernt lag.

Als Überinstrumentierung wurden alle Messwerte gewertet, bei denen die Endfeilenspitze mehr als 0,25 mm apikal vom Foramen entfernt lag.

Es wurden insgesamt 200 Arbeitslängenbestimmungen an sechs Zähnen mit sieben Wurzelkanälen durchgeführt.

Bei zwei Zähnen lagen koronal zwei Kanaleingänge vor, die sich im mittleren Wurzelbereich zu einem Kanal verbanden und in einem Foramen endeten. In diesen Fällen wurde der Hauptkanal ausgewertet. Bei einer Methode (automatische Stopp-Funktion, VDW. Gold RECIPROC) wurde auch der Nebenkanal gemessen und in die Auswertung aufgenommen.

Bei der Überprüfung der automatischen Stopp-Funktion wurde in elf Fällen (neunmal beim Endomotor MORITA Tri Auto ZX2, zweimal beim Endomotor VDW. Gold RECIPROC) beobachtet, dass die Endfeile nach Erreichen des maximalen Vortriebs und vor dem Stoppen zurückrotierte. In diesen Fällen wurde der maximale Vortrieb und nicht die Position an der die Endfeile stoppte, in die Auswertung aufgenommen.

Bei einer maschinellen Aufbereitung ohne Vergrößerungshilfe mit einer Nickel-Titan Feile der ISO-Größe 15/.05 wurde nach Erreichen der geplanten Arbeitslänge beim Entfernen der Endfeile aus dem Wurzelkanal überinstrumentiert. Der Endomotor rotierte in Arbeitsrichtung, wodurch sich die Endfeile über das Foramen hinaus vorschob. Die Endposition der Endfeile nach dem selbstständigen Vortrieb wurde in die Auswertung übernommen. Zehnmal (vier Werte beim Operationsmikroskop, zwei Werte ohne Vergrößerungshilfe, zwei Werte unter Verwendung der Lupenbrille und zwei Werte beim Verwenden der Stoppercap) wurde eine zu große Endfeilengröße (45/.04 statt 15/.05, 50/.04 statt 20/.06) für die Aufbereitung genutzt. Diese Werte wurden aus der Auswertung herausgenommen.

Somit wurden 190 Messwerte von Aufbereitungsschritten aus 43 Aufbereitungen in die weitere Auswertung übernommen.

28 Untersuchungen wurden mit einer Stahlfeile (Kerr-Feile) der ISO Größe 15/.02 durchgeführt, 38 Untersuchungen mit einer Nickel-Titan Feile der ISO-Größe 15/.05 und 20/.06 und die Nickel-Titan Feilen der ISO-Größe 25/.06 und 30/.05 wurden jeweils 43-mal verwendet.

2. Material und Methoden

Die Daten wurden zusammengefasst in Form von deskriptiven Statistiken wiedergegeben.

Nach Lage des Mittelwertes und des Medians wurden die Messungen auf Genauigkeit geprüft.

Die Präzision wurde über die Streuung (range), die IQR (interquartil range) und den Bereich, der 80 % der Messwerte enthält, bewertet.

Dies wurde auch für folgende Untergruppen beschrieben:

- der Einfluss der Arbeitslängenbegrenzung (Silikonstopper, Stoppercap und automatische Stopp-Funktion),
- der Vergrößerungshilfe (ohne Vergrößerung, Lupenbrille und Operationsmikroskop) und
- Einfluss der Instrumentengröße

Vergrößerungshilfen wurden nur im Zusammenhang mit dem Silikonstopper eingesetzt, deshalb wurde die Analyse auf diese Gruppe begrenzt (n = 97).

In einem zweiten Schritt wurde eine Kontingenzanalyse mit einem Chi²-Test für alle Untergruppen durchgeführt.

Hierfür wurden Werte zwischen -0,25 mm und +0,25 mm als „AL eingehalten“ bewertet. Werte außerhalb dieser Range wurden als „AL nicht eingehalten“ bezeichnet.

Obwohl es sich in diesen Versuchen um sechs Prämolaren handelte, wurde der Einfluss der Zahnanatomie auf die Einhaltung der Arbeitslänge ebenfalls mit einer Kontingenzanalyse und einem Chi²-Test geprüft.

Zeigten sich im Chi²-Test signifikante Unterschiede, so wurde für alle Paare ein Tukey-Kramer-HSD-Test durchgeführt.

Um zu vermeiden, dass sich die positiven Werte der Überinstrumentierung und die negativen Werte der Unterinstrumentierung in den statistischen Analysen gegenseitig ausgleichen, wurden bei allen Berechnungen absolute Werte verwendet.

2.7.1. Betrachtung der Aufbereitungen

Zur Beurteilung der Aufbereitungen ist es notwendig die Ergebnisse mehrerer Aufbereitungsschritte zu kombinieren. Im Falle des Silikonstoppers und der Stoppercap wurden für eine Aufbereitung fünf Endofeilen verwendet, für die Aufbereitung mit den automatischen Stopp-Funktionen der Endomotoren waren es vier.

Die Aufbereitungen wurden als „AL eingehalten“ bewertet, wenn in keinem Schritt überinstrumentiert und mit der letzten Endofeile die korrekte Arbeitslänge erreicht wurde (Foramen $\pm 0,25$ mm). Alle Aufbereitungen in denen überinstrumentiert oder die korrekte Arbeitslänge mit der letzten Endofeile nicht erreicht wurde, wurden als „AL nicht eingehalten“ gewertet.

Die Aufbereitungen wurden als Kontingenztafel dargestellt und die Unterschiede zwischen den Aufbereitungen auf Signifikanz mit Fisher`s exact Test überprüft (PAST Version 2.17c, 2001).

Als Fehler erster Art wurde bei allen statistischen Auswertungen $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Diagramme wurden mit JMP oder Excel erstellt.

3. Ergebnisse

3.1. Ergebnisse der Einzelmessungen

Das Einhalten der vorbestimmten Arbeitslänge war unabhängig von der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes, sowie der verwendeten Instrumentengröße oder dem Einsatz einer Vergrößerungshilfe. Nur die Arbeitslängenbegrenzer hatten einen signifikanten Einfluss auf das Einhalten der vorbestimmten Arbeitslänge.

Im Folgenden ist die Analyse der Daten detailliert dargestellt.

3.1.1. Deskriptive Statistik der Einzelmessungen

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der 190 Einzelmessungen.

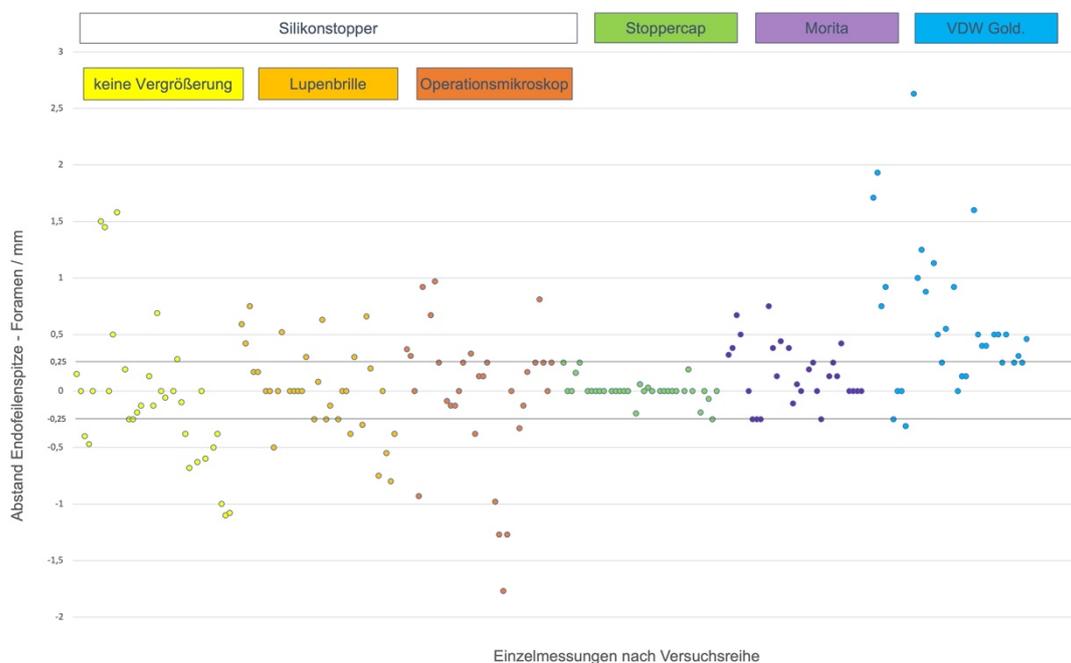


Abbildung 11: Darstellung der 190 Messwerte, die horizontalen Linien markieren den Zielbereich (Foramen $\pm 0,25$ mm), die Farbzunordnung entspricht dem Versuchsablauf darüber, Stoppercap, Morita und VDW Gold wurden ohne Vergrößerungshilfe genutzt

Der Median der Messwerte lag bei 0 mm, der Mittelwert bei 0,12 mm, das Maximum bei 2,63 mm und das Minimum bei -1,77 mm, d.h. die Messwerte erstrecken sich über eine Range von 4,4 mm. Die Lage des Mittelwertes über 0 mm deutet auf eine verstärkte Überinstrumentierung hin.

Die maximale Überinstrumentierung von 2,63 mm wurde bei der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC mit einer Nickel-Titan Feile der ISO-Größe 15/.05 beobachtet.

Die maximale Unterinstrumentierung von -1,77 mm erfolgte bei einem Aufbereitungsschritt unter dem Operationsmikroskop mit einer Nickel-Titan Feile der ISO-Größe 20/.06

3.1.2. Häufigkeitsverteilung der Einzelmessungen

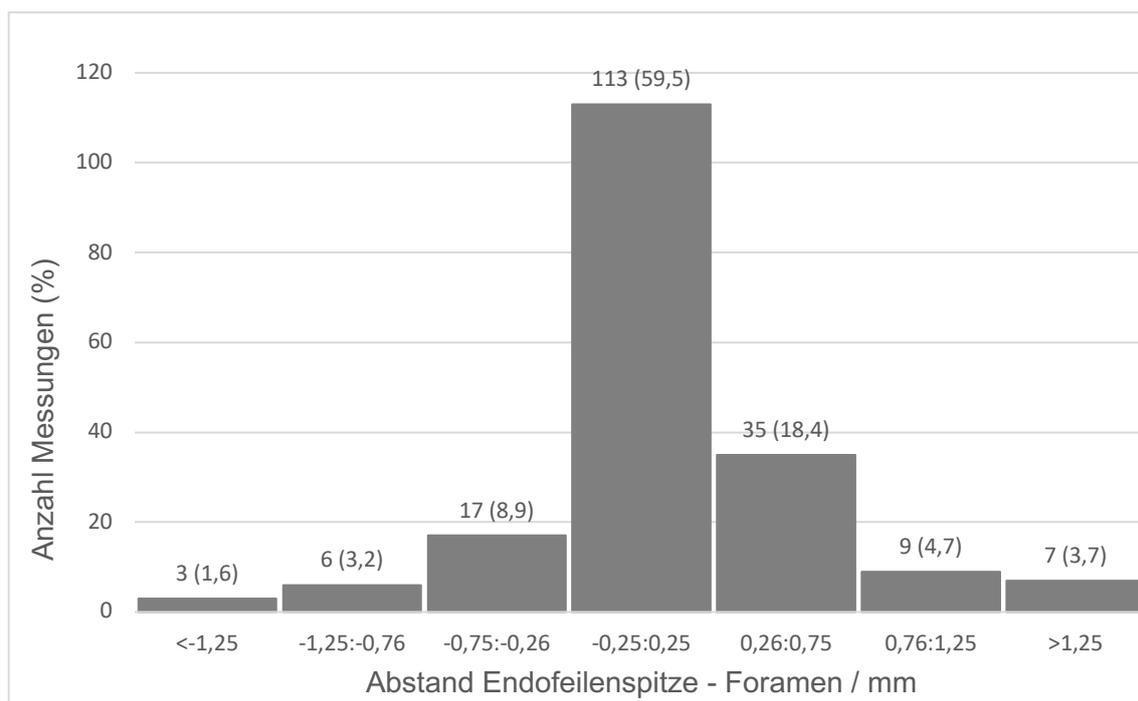


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Einzelmessungen in absoluten Werten und Prozentwerten in ()

3. Ergebnisse

Abbildung 12 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Einzelmessungen.

Die Verteilung ähnelt einer Normalverteilung mit einem deutlichen Gipfel im Zielbereich.

Von den 190 auswertbaren Messungen befanden sich 113 (59,5 %) im Zielbereich der Arbeitslänge (Foramen $\pm 0,25$ mm).

51 Messungen (26,8 %) erfüllten die Definition der Überinstrumentierung.

26 Messungen (13,7 %) entsprachen einer Unterinstrumentierung.

3.2. Differenzierung nach Untergruppen

3.2.1. Untergruppe Arbeitslängenbegrenzer

Eine Boxplotanalyse der Messwerte, differenziert nach den Untergruppen der Arbeitslängenbegrenzung, ist in Abbildung 13 sowie Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengefasst.

Die IQR (Interquartilabstand, interquartil range), in der sich 50 % der Messwerte befinden, ergibt sich durch das 25 % und 75 % Quantil. Zwischen dem 10 % und dem 90 % Quantil liegen 80 % der Messwerte. Beide Bereiche sind ein Maß für die Streuung der Messwerte und damit für die Präzision der Messung. Messwerte außerhalb der 1,5fachen IQR wurden bei den Berechnungen nicht ausgeschlossen.

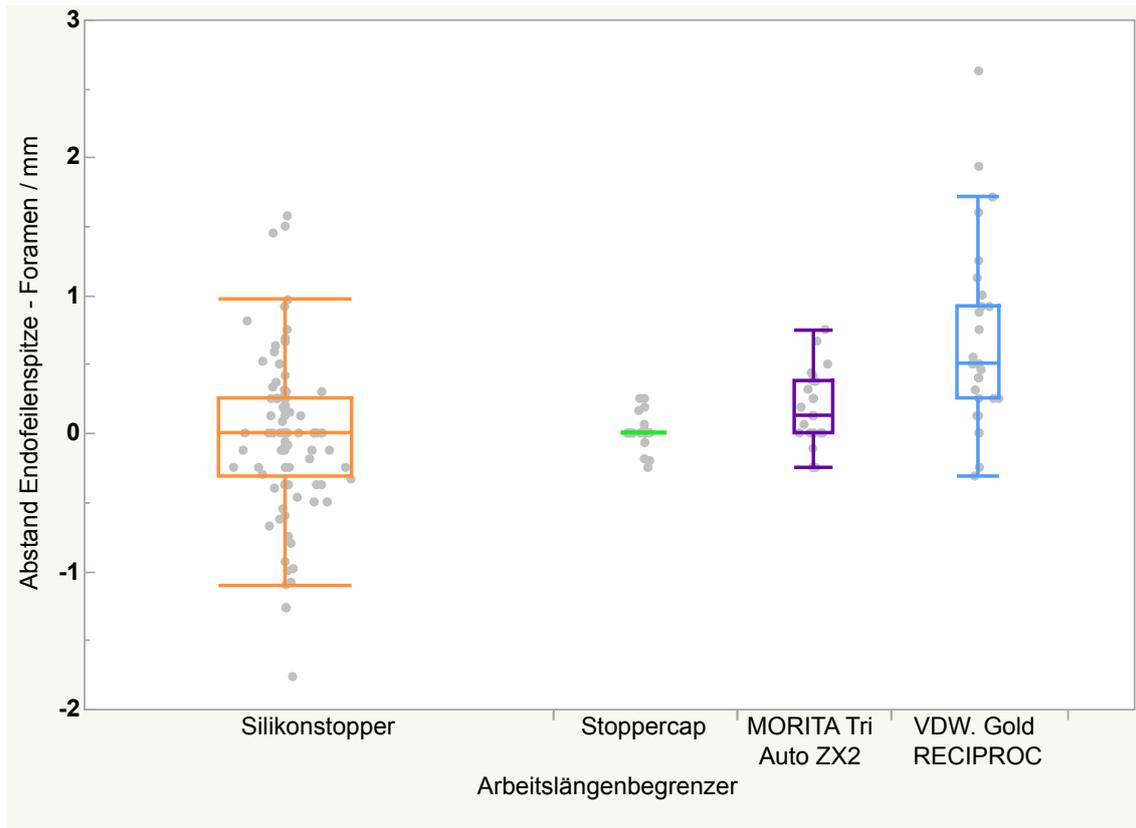


Abbildung 13: Boxplot Vergleich der Arbeitslängenbegrenzer

Tabelle 2: Quantile Arbeitslängenbegrenzer

Arbeitslängen- begrenzer	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
Silikonstopper	-1,77	-0,76	-0,32	0	0,25	0,66	1,58
Stoppercap	-0,25	-0,14	0	0	0	0,18	0,25
MORITA Tri Auto ZX2	-0,25	-0,25	0	0,13	0,38	0,52	0,75
VDW. Gold RECIPROC	-0,31	0	0,25	0,5	0,92	1,68	2,63

3. Ergebnisse

Tabelle 3: Zusammenstellung der Mittelwerte, Standardabweichungen und Konfidenzintervalle differenziert nach Arbeitslängenbegrenzer

Arbeitslängen- begrenzer	Anzahl	Mittelwert	Std.- Abw.	Std.- Mittelwert	95% Konfidenz- intervall
Silikonstopper	97	-0,028	0,562	0,057	-0,141 – 0,085
Stoppercap	33	0,007	0,102	0,018	-0,029 – 0,043
MORITA Tri Auto ZX2	28	0,151	0,271	0,051	0,046 – 0,256
VDW. Gold RECIPROC	32	0,625	0,650	0,115	0,391 – 0,859

97 Messungen erfolgten mit dem Silikonstopper, 33 mit der innovativen Stoppercap, 28 mit der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 und 32 mit der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC.

Bei der Verwendung des Silikonstoppers liegt der Median bei 0 mm. Die maximale Unterinstrumentierung lag bei -1,77 mm. Im Maximum wurde das Foramen 1,58 mm überschritten. Sowohl das Minimum als auch das Maximum liegen außerhalb der 1,5fachen IQR.

Die IQR beträgt 0,567 mm, die gesamte Range 3,34 mm.

80 % der Messwerte befinden sich in einem Bereich von 1,42 mm um den Median. 25 Messwerte (25 %) entsprachen einer Unterinstrumentierung, 21 Messwerte (22 %) entsprachen einer Überinstrumentierung.

Bei der Nutzung der innovativen Stoppercap beträgt der Median 0 mm. Der Abstand zum Foramen im Minimum -0,25 mm, maximal wurde das Foramen 0,25 mm überschritten. Daraus ergibt sich eine Range von 0,5 mm, die IQR beträgt 0 mm. In einem Bereich von 0,32 mm liegen 80 % der

Messwerte um den Median. Bei allen Messwerten (100 %) wurde die vordefinierte Arbeitslänge eingehalten.

Beim Verwenden der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 wurde ein Median von 0,13 mm erreicht und maximal -0,25 mm unterinstrumentiert. Maximal wurde das Foramen 0,75 mm überschritten. Dies ergibt eine Range von 1 mm, einer IRQ von 0,38 mm und 80 % der Messwerte liegen in einem Bereich von 0,77 mm um den Median. Es wurden keine Unterinstrumentierungen beobachtet, neun Messwerte (32 %) stellten eine Überinstrumentierung dar.

Mit der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC liegt der Median bei 0,5 mm. Maximal wurde -0,31 mm unterinstrumentiert, sowie das Foramen um 2,63 mm überschritten. Hierbei ergibt sich eine Range von 2,94 mm, ein IQR von 1,17 mm und in einem Bereich von 1,86 mm um den Median liegen 80 % der Messwerte. Ein Messwert (3 %) lag im Bereich der Unterinstrumentierung, 21 Messwerte (66 %) waren Überinstrumentierungen.

Die Daten zeigen, dass das Einhalten der Arbeitslänge mit der Stoppercap sehr genau und hochpräzise ist. Sowohl der Median als auch die IQR liegen bei 0 mm, kein Messwert lag außerhalb des Zielbereiches.

Der Silikonstopper ist mit einem Median bei 0 mm ebenfalls genau, mit einer IQR von 0,57 mm aber weniger präzise.

Beim Verwenden der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 zeigte sich mit einem Median von 0,13 mm eine, im Rahmen dieser Untersuchung ausreichende Genauigkeit (< 0,25 mm) und mit einer IQR von 0,38 mm eine höhere Präzision als mit dem Silikonstopper.

Bei der Verwendung der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC lässt der Median von 0,5 mm auf eine deutliche Überinstrumentierung und eine IQR von 1,17 mm auf eine niedrigere Präzision im Vergleich zu den anderen Arbeitslängenbegrenzern schließen.

3. Ergebnisse

3.2.2. Untergruppe Vergrößerungshilfen

Da Vergrößerungshilfen nur im Zusammenhang mit dem Silikonstopper eingesetzt wurden, wurde die Analyse auf die Gruppe begrenzt, bei der der Silikonstopper zum Einsatz kam (n = 97).

Die Messwerte, differenziert nach den Untergruppen der Vergrößerungshilfen, sind in Abbildung 14 und Tabelle 4 zusammengefasst.

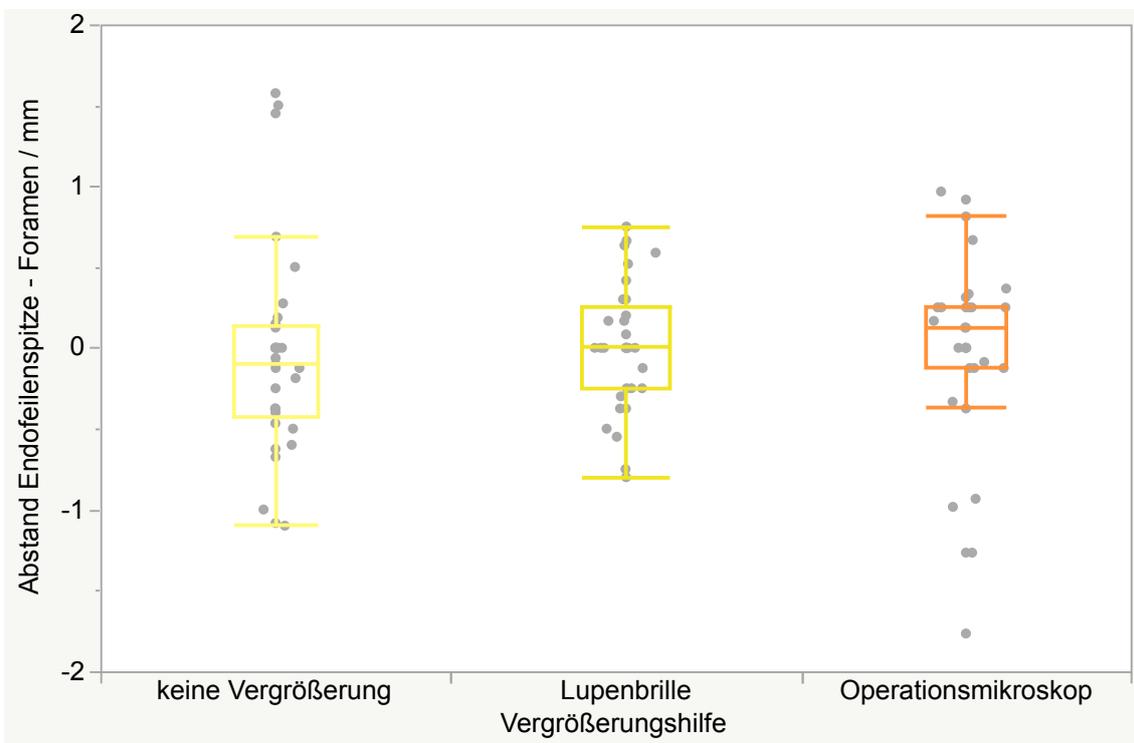


Abbildung 14: Boxplot Vergleich der Vergrößerungshilfen

Tabelle 4: Quantile Vergrößerungshilfen

Vergrößerungshilfe	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
keine Vergrößerung	-1,1	-	-	-0,1	0,14	1,15	1,58
		0,87	0,43				
Lupenbrille	-0,8	-	-	0	0,25	0,62	0,75
		0,53	0,25				
Operationsmikroskop	-1,78	-	-	0,13	0,25	0,78	0,97
		1,21	0,13				

33 Untersuchungen erfolgten ohne eine Vergrößerungshilfe, 33 mit Lupenbrille und 31 mit dem Operationsmikroskop.

Ohne Vergrößerungshilfe liegt der Median bei -0,1 mm. Es ergibt sich eine Range von 2,68 mm und eine IQR 0,57 mm. 80 % der Messwerte liegen in einem Bereich von 2,02 mm.

Mit der Lupenbrille liegt der Median bei 0 mm und es wird eine Range von 1,55 mm beobachtet. Die IQR ist mit der Lupenbrille 0,5 mm. 80 % der Messwerte liegen in einem Bereich von 1,15 mm.

Unter Verwendung des Operationsmikroskops liegt der Median von 0,13 mm noch im Zielbereich ($< 0,25$ mm). Die Range beträgt 2,66 mm und 80 % der Messwerte liegen in einem Bereich von 1,99 mm, die IQR beträgt 0,38 mm.

Aufgrund eines Medians von 0 mm, dem kleinsten Bereich, in dem 80 % der Messwerte liegen und der fehlenden Messwerte außerhalb der 1,5fachen IQR, erscheint die Lupenbrille in der Analyse und der graphischen Darstellung mit hoher Genauigkeit und geringster Streuung.

Bei den Aufbereitungen unter dem Operationsmikroskop ließ sich die Arbeitslänge weniger genau (Median = 0,13 mm) einhalten, die Präzision war, gemessen an der IQR, jedoch besser als bei der Lupenbrille. Der Bereich, in dem sich 80 % der Messwerte befinden, war jedoch deutlich größer.

3. Ergebnisse

Wurde keine Vergrößerungshilfe verwendet, ließ sich die Arbeitslänge genauer einhalten als bei der Verwendung des Operationsmikroskops, die Präzision war, gemessen an der IQR, mit 0,57 mm jedoch schlechter. Der Bereich, in dem sich 80 % der Messwerte befinden, ist mit dem des Operationsmikroskops vergleichbar.

3.2.3. Untergruppe Instrumentengröße

Die Messwerte, differenziert nach den Untergruppen Instrumentengröße, sind in Abbildung 15 und Tabelle 5 zusammengefasst.

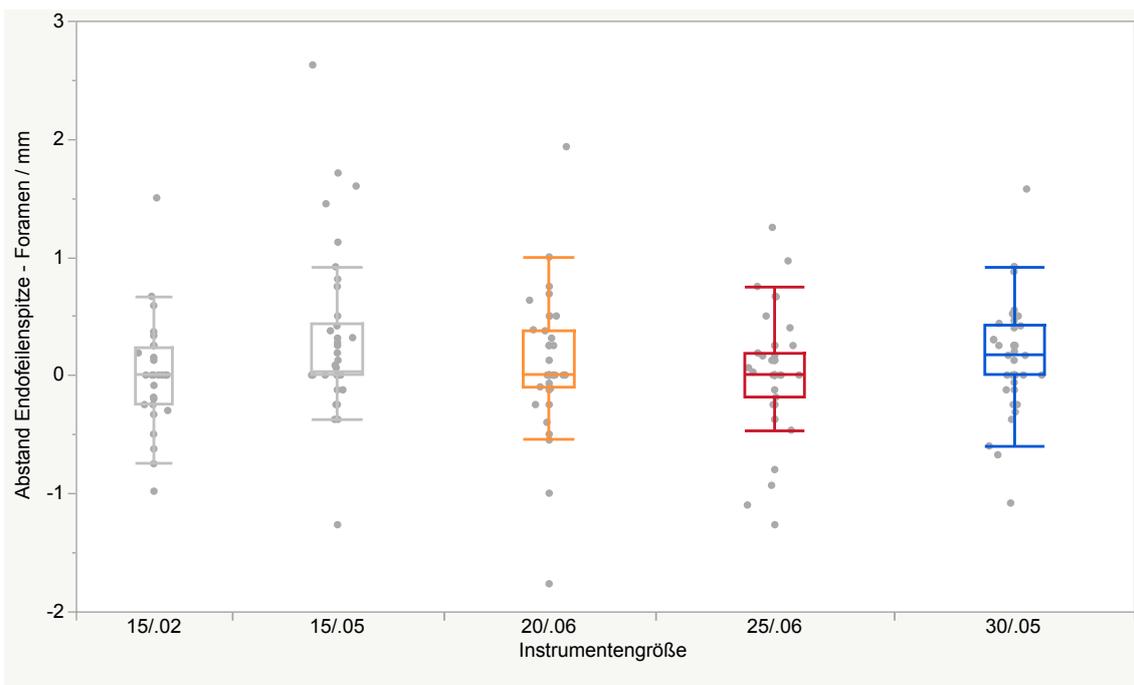


Abbildung 15: Boxplot Vergleich der Instrumentengröße

Tabelle 5: Quantile Instrumentengröße

Instrumenten- größe	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
15/.02	-0,98	-0,64	-0,25	0	0,23	0,60	1,5
15/.05	-1,27	-0,27	0	0,03	0,44	1,47	2,63
20/.06	-1,77	-0,51	-0,10	0	0,38	0,69	1,93
25/.06	-1,27	-0,67	-0,19	0	0,19	0,67	1,25
30/.05	-1,08	-0,35	0	0,17	0,42	0,75	1,58

Für die Untersuchungen wurde die Kerrfeile der ISO Größe 15/.02 28-mal verwendet. Die Nickel-Titan Feilen der ISO Größe 15/.05 und 20/.06 wurden jeweils 38-mal verwendet und die Nickel-Titan Feilen der ISO Größe 25/.06 und 30/.05 jeweils 43-mal.

Bei allen verwendeten Instrumentengrößen lag der Median der Messwerte jeweils im Bereich des Foramens $\pm 0,25$ mm. Auch die IQR war in allen Gruppen kleiner als 0,5 mm, jedoch lagen die Ranges zwischen 2,48 mm und 3,90 mm.

Hieraus ergibt sich für alle Messwerte, differenziert nach den verwendeten Endfeilen, eine gute Genauigkeit und eine vergleichbare Präzision.

3.3. Statistische Analyse der Einzelmessungen

3.3.1. Kontingenzanalyse

Für die Durchführung der Kontingenzanalysen zum Erkennen signifikanter Unterschiede zwischen den Untergruppen wurden die Messwerte in einer nominalen Skala in „AL eingehalten“ und „AL nicht eingehalten“ unterteilt.

3. Ergebnisse

Für die Auswertung wurden Werte zwischen -0,25 mm und +0,25 mm rund um das Foramen als „AL eingehalten“ bewertet. Werte außerhalb dieser Range wurden als „AL nicht eingehalten“ bewertet.

3.3.2. Analyse des Einflusses der Arbeitslängenbegrenzer

Das Verteilungsdiagramm der Arbeitslängenbegrenzer zeigt Abbildung 16.

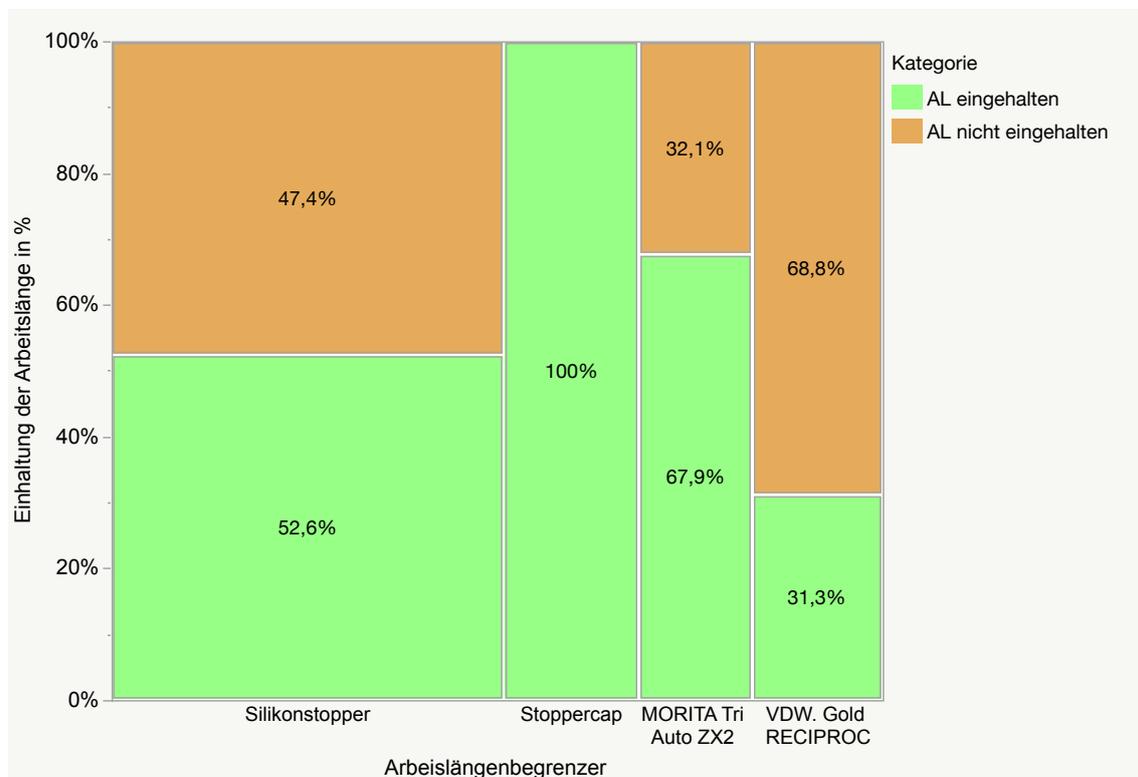


Abbildung 16: Verteilungsdiagramm Arbeitslängenbegrenzer, die Breite der Balken basiert auf der Anzahl der Messwerte

Anschließend wurde ein Chi²-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ durchgeführt.

Die Kontingenztafel ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Kontingenztabelle Arbeitslängenbegrenzer

Häufigkeiten n	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Silikonstopper	51 52,6 %	46 47,4 %	97 51,0 %
Stoppercap	33 100 %	0 0 %	33 17,4 %
MORITA Tri Auto ZX2	19 67,9 %	9 32,1 %	28 14,7 %
VDW. Gold	10 31,3 %	22 68,8 %	32 16,9 %
RECIPROC			
Summe	113 59,5 %	77 40,5 %	190 100 %
n	Freiheitsgrade	Chi ²	p
190	3	35,793	< 0,0001

Das Ergebnis des Chi²-Tests zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den Arbeitslängenbegrenzern ($Chi^2(3) = 35,793, p < 0,0001$).

3. Ergebnisse

3.3.3. Analyse des Einflusses der Vergrößerungshilfe

Das Verteilungsdiagramm des Einflusses der Vergrößerungshilfen in der Untergruppe mit dem Silikonstopper als Arbeitslängenbegrenzer zeigt Abbildung 17.

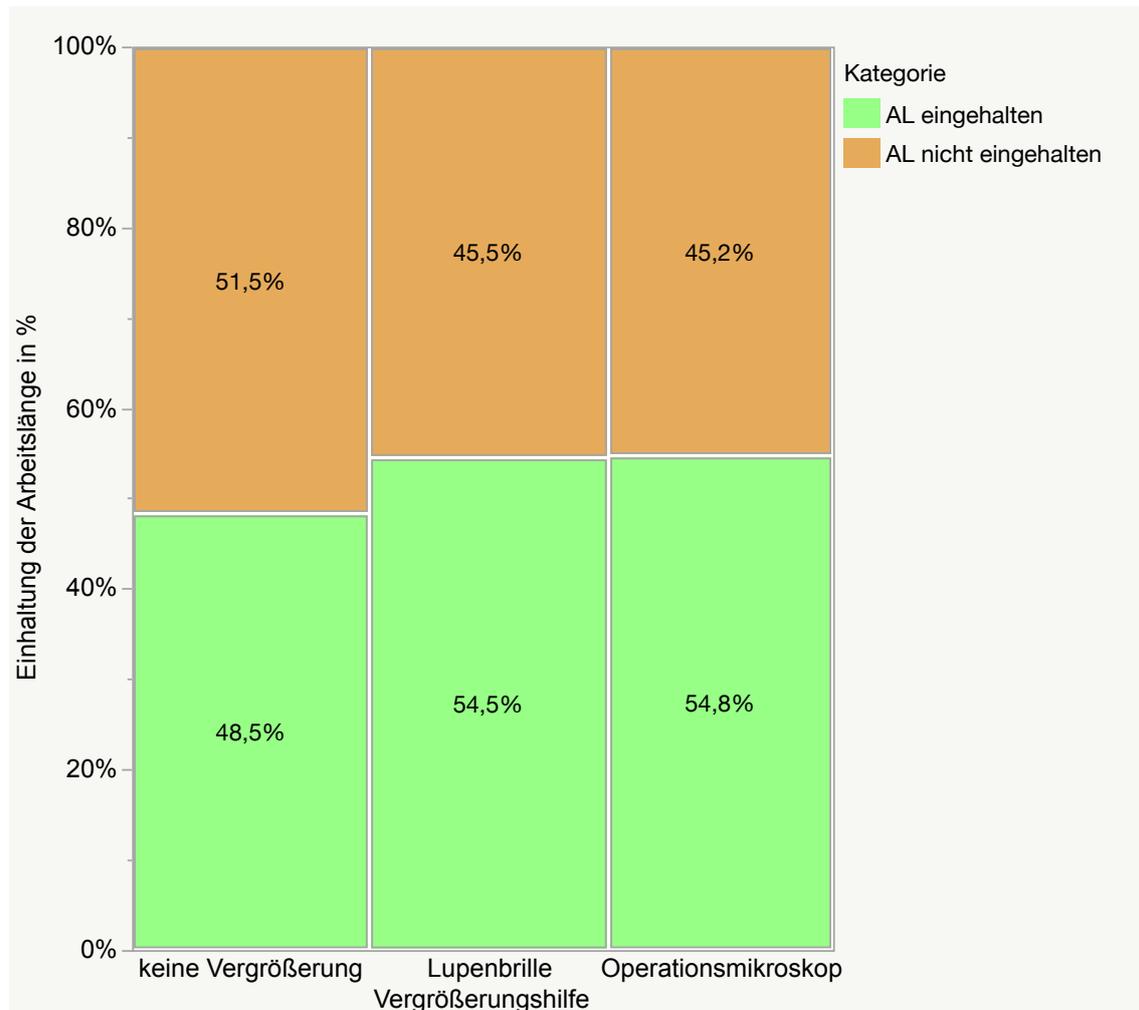


Abbildung 17: Verteilungsdiagramm Vergrößerungshilfen

Die Kontingenztabelle ist in Tabelle 7 wiedergegeben.

Tabelle 7: Kontingenztafel Vergrößerungshilfe

Häufigkeiten n	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Keine Vergrößerung	16 48,5 %	17 51,5 %	33 34 %
Lupenbrille	18 54,6 %	15 45,5 %	33 34 %
Operationsmikroskop	17 54,8 %	14 45,1 %	31 32 %
n	Freiheitsgrade	Chi ²	p
97	2	0,337	0,8451

Das Ergebnis des Chi²-Tests zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Vergrößerungshilfen ($Chi^2(2) = 0,337$, $p = 0,8451$).

3. Ergebnisse

3.3.4. Analyse des Einflusses der Instrumentengröße

Das Verteilungsdiagramm des Einflusses der Instrumentengrößen zeigt
Abbildung 18.

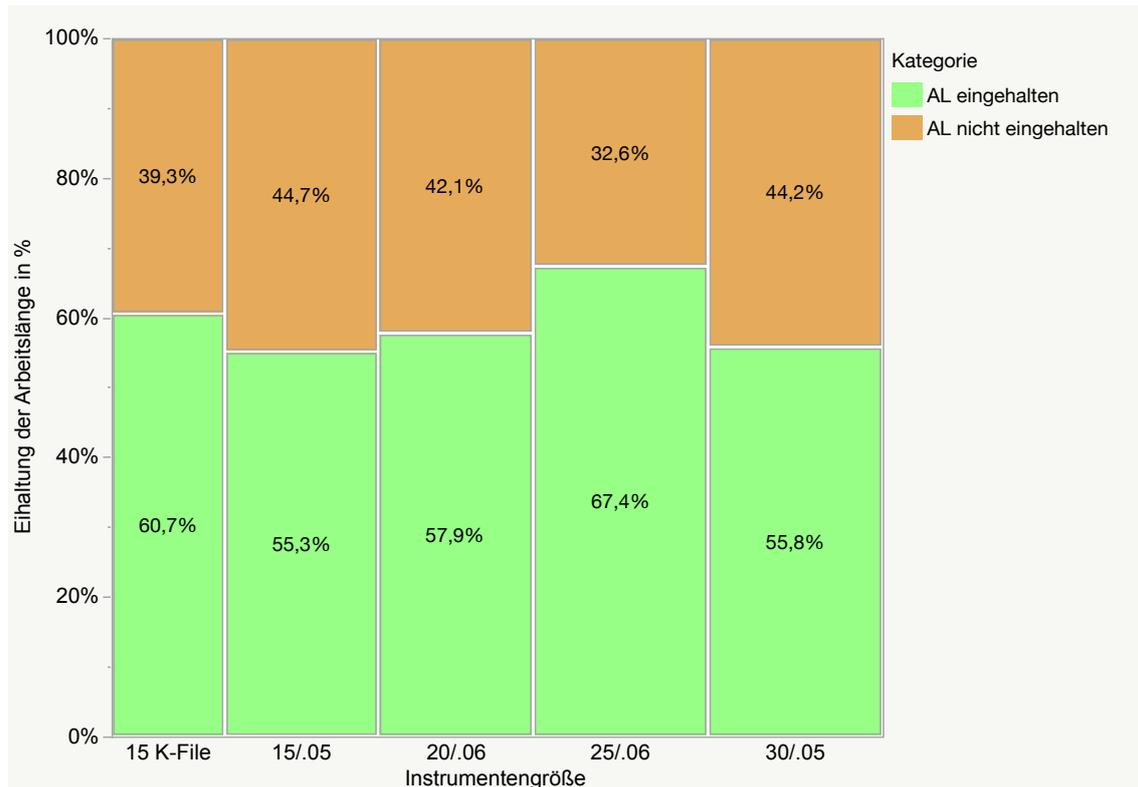


Abbildung 18: Verteilungsdiagramm Einfluss der Instrumentengröße, die Breite der Balken basiert auf der Anzahl der Messwerte

Die Kontingenztabelle ist in Tabelle 8 wiedergegeben.

Tabelle 8: Kontingenztabelle Instrumentengrößen

Häufigkeiten n	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
15/.02	17 60,7 %	11 39,3 %	28 14,7 %
15/.05	21 55,3 %	17 44,7 %	38 20 %
20/.06	22 57,9 %	16 42,1 %	38 20 %
25/.06	29 67,4 %	14 32,6 %	43 22,6 %
30/.05	24 55,8 %	19 44,2 %	43 22,6 %
Summe	113 59,5 %	77 40,5 %	190 100 %
n	Freiheitsgrade	Chi ²	p
190	4	1,708	0,7892

Die Zielwerterreichung war mit den unterschiedlichen Instrumentengrößen annähernd gleich. Ein signifikanter Einfluss der Instrumentengrößen auf die Einhaltung der Arbeitslänge wurde nicht beobachtet ($Chi^2 (4) = 1,733$, $p = 0,7892$).

3. Ergebnisse

3.3.5. Analyse des Einflusses der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes

Das Verteilungsdiagramm des Einflusses der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes wurde unter Differenzierung der verschiedenen Zahntypen untersucht und ist in Abbildung 19 dargestellt.

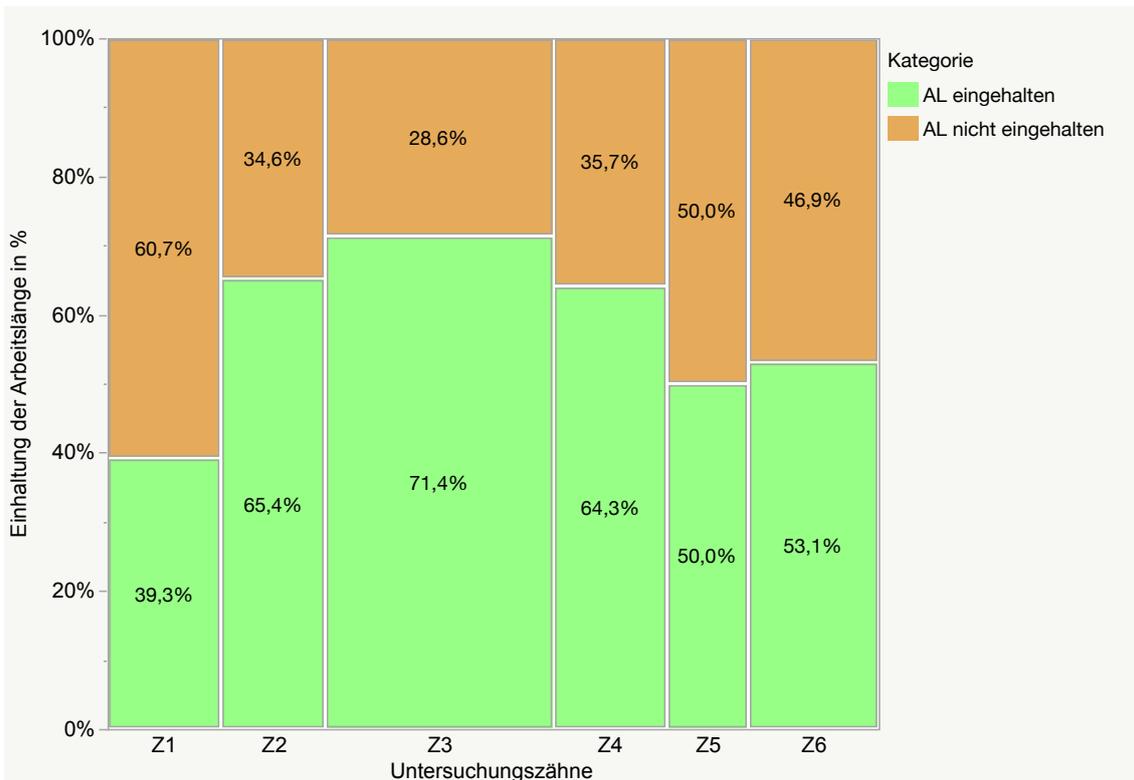


Abbildung 19: Verteilungsdiagramm Wurzelanatomie und koronaler Referenzpunkt, die Breite der Balken basiert auf der Anzahl der Messwerte, bei Z3 handelte es sich um einen zweiwurzeligen Zahn

Die Kontingenztabelle ist in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tabelle 9: Kontingenztabelle Einfluss der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes

Häufigkeiten n	AI eingehalten	AI nicht eingehalten	Summe
Z1	11 39,3 %	27 60,7 %	28 14,7 %
Z2	17 65,4 %	9 34,6 %	26 13,7 %
Z3	40 71,4 %	16 28,6 %	56 29,5 %
Z4	18 64,3 %	10 35,7 %	28 14,7 %
Z5	10 50%	10 50 %	20 10,5 %
Z6	17 53,1 %	15 46,9 %	32 16,8 %
Summe	113 59,5 %	77 40,5 %	190 100 %
n	Freiheitsgrade	Chi ²	p
190	5	9,98	0,0758

Der Chi²-Test zeigt, dass die Unterschiede zwischen den verwendeten Zahntypen im Bereich der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes keinen Einfluss auf die Einhaltung der Arbeitslänge haben.

Obwohl in der Grafik (Abb. 19) Unterschiede im Ausmaß der Zielerreichung bei den unterschiedlichen Zahntypen erkennbar sind, werden diese im Chi²- Test nicht als signifikant bestätigt ($Chi^2 (5) = 5,002, p = 0,0390$).

3.4. Tukey-Kramer-HSD-Test

Da sich in der Kontingenzanalyse bei den Arbeitslängenbegrenzern ein signifikanter Unterschied im Einhalten der Arbeitslänge zeigte, wurde für diese Untergruppe post hoc ein Vergleich der Arbeitslängenbegrenzer mittels Tukey-Kramer-HSD-Test durchgeführt.

In JMP wurden Vergleiche aller Paare mittels Tukey-Kramer-HSD-Test ausgeführt, um herauszufinden, zwischen welchen Paaren der Arbeitslängenbegrenzer ein signifikanter Unterschied besteht.

Für diese statistische Analyse wurden alle Messwerte in absolute Werte umgewandelt, da der Tukey-Kramer-HSD-Test auf dem Vergleich von Mittelwertdifferenzen basiert.

Die nicht-absoluten Mittelwerte würden durch die unterschiedlichen Vorzeichen für Über- und Unterinstrumentierung positiv verfälscht. Durch die Verwendung absoluter Werte werden vorhandene Unterschiede verstärkt dargestellt.

Tukey-Kramer-HSD-Test wurde als Verfahren gewählt, da es bei unterschiedlichen Stichprobengrößen angewendet werden kann und als post hoc Verfahren geeignet ist.

Als falsch positiv wurde für alle Tests $\alpha = 0,05$ angenommen.

3.4.1. Analyse der Arbeitslängenbegrenzer mittels Tukey-Kramer-HSD-Test

Das Ergebnis des Tukey-Kramer-HSD-Tests der Arbeitslängenbegrenzer zeigen Tabelle 10 und 11.

Tabelle 10: Liste der homogenen Gruppen nach Tukey-Kramer-HSD-Test

Arbeitslängenbegrenzer, die nicht über den gleichen Buchstaben verbunden sind, unterscheiden sich signifikant

Arbeitslängen- begrenzer			Mittelwert
VDW. Gold	A		0,6605
RECIPROC			
Silikonstopper		B	0,3891
MORITA Tri Auto		B	0,2307
ZX2			
Stoppercap			
		C	0,0498

3. Ergebnisse

Tabelle 11: Liste der sortieren Differenzen nach Tukey-Kramer-HSD-Test

Arbeits- längen- begrenzer	Arbeits- längen- begrenzer	Differenz	Std.- Fehler diff.	95 % Konfidenz- intervall	p-Wert
VDW. Gold RECIPROC	Stopper- cap	0,6107	0,0974	0,3582 - 0,8631	<0,0001
VDW. Gold RECIPROC	MORITA Tri Auto ZX2	0,4298	0,1016	0,1665 - 0,6932	0,0002
Silikon- stopper	Stopper- cap	0,3392	0,0791	0,1342 - 0,5443	0,0002
VDW. Gold RECIPROC	Silikon- stopper	0,2714	0,0800	0,0640 - 0,4789	0,0047
MORITA Tri Auto ZX2	Stopper- cap	0,1808	0,1009	-0,0806 - 0,4423	0,2800
Silikon- stopper	MORITA Tri Auto ZX2	0,1584	0,0842	-0,0599 - 0,3767	0,2396

Die niedrigste mittlere Abweichung von der vorbestimmten Arbeitslänge zeigt mit 0,05 mm die Stoppercap. Mit der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 lag die mittlere Abweichung bei 0,23 mm, mit dem konventionellen Silikonstopper bei 0,39 mm. Eine mittlere Abweichung von 0,66 mm wurde mit der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC beobachtet.

Die mittlere Arbeitslängenabweichung der Stoppercap unterscheidet sich damit signifikant von der des Silikonstoppers ($p = 0,0002$) und der der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC ($p < 0,0001$).

Die mittlere Abweichung, die mit der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 erzielt wurde, unterscheidet sich nicht signifikant von der mit der Stoppercap oder dem Silikonstopper erzielten Arbeitslängenabweichung.

Die Abweichung der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 war jedoch signifikant ($p = 0,0002$) gegenüber der Arbeitslängenabweichung der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC.

Der Silikonstopper unterscheidet sich auch signifikant von der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC ($p = 0,047$).

3.5. Zusammenfassung der Einzelmessungen

Wie die Datenanalyse zeigt, hatten nur die Arbeitslängenbegrenzer einen signifikanten Einfluss auf das Einhalten der vorbestimmten Arbeitslänge. Dieses Ergebnis war unabhängig von der Wurzelanatomie und des koronalen Referenzpunktes, sowie der verwendeten Instrumentengröße oder dem Einsatz einer Vergrößerungshilfe.

Im Vergleich der Arbeitslängenbegrenzer zeigte die Stoppercap im Tukey-Kramer-HSD-Test signifikante Unterschiede im Vergleich zum Silikonstopper und der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC. Ebenso zeigte die automatische Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 und der Silikonstopper einen signifikanten Unterschied zu der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC.

3. Ergebnisse

3.6. Analyse der Aufbereitungen

Die 190 Arbeitslängenmessungen verteilten sich auf 43 endodontische Aufbereitungen (Abb. 20).



Abbildung 20: Verteilung Abstand Endofeilenspitze – Foramen pro Aufbereitung, der Bereich zwischen den schwarzen Linien markiert den Zielbereich, zusammenhängende Linien stellen eine Aufbereitung dar, die Zuordnung der Farben entspricht dem Versuchsablauf darüber, Stoppercap, Morita und VDW Gold wurden ohne Vergrößerungshilfe genutzt

Die Wahrscheinlichkeit für das exakte Einhalten der Arbeitslänge in einem Arbeitsschritt, liegt entsprechend der beobachteten Häufigkeitsverteilung bei durchschnittlich 60 % (s. 3.1.2).

Bei dem hier untersuchten Feilensystem (vollrotierende Mtwo Nickel- Feilen) ist es notwendig den Zahn schrittweise mit mehreren Endfeilen aufzubereiten. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für das exakte Einhalten der Arbeitslänge in einer endodontischen Aufbereitung, mit der Anzahl der verwendeten Endfeilen, sinkt.

In einer Kontingenzanalyse wurde analysiert, ob statistisch signifikante Unterschiede in den Aufbereitungen mit den verschiedenen Arbeitslängenbegrenzern auftraten.

Der Silikonstopper wurde bei 21 Aufbereitungen eingesetzt, die Stoppercap und die automatische Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 bei sieben und die automatische Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC bei acht Aufbereitungen

Abbildung 21 zeigt die Kontingenztafel für die Aufbereitungen mit den verschiedenen Arbeitslängenbegrenzern.

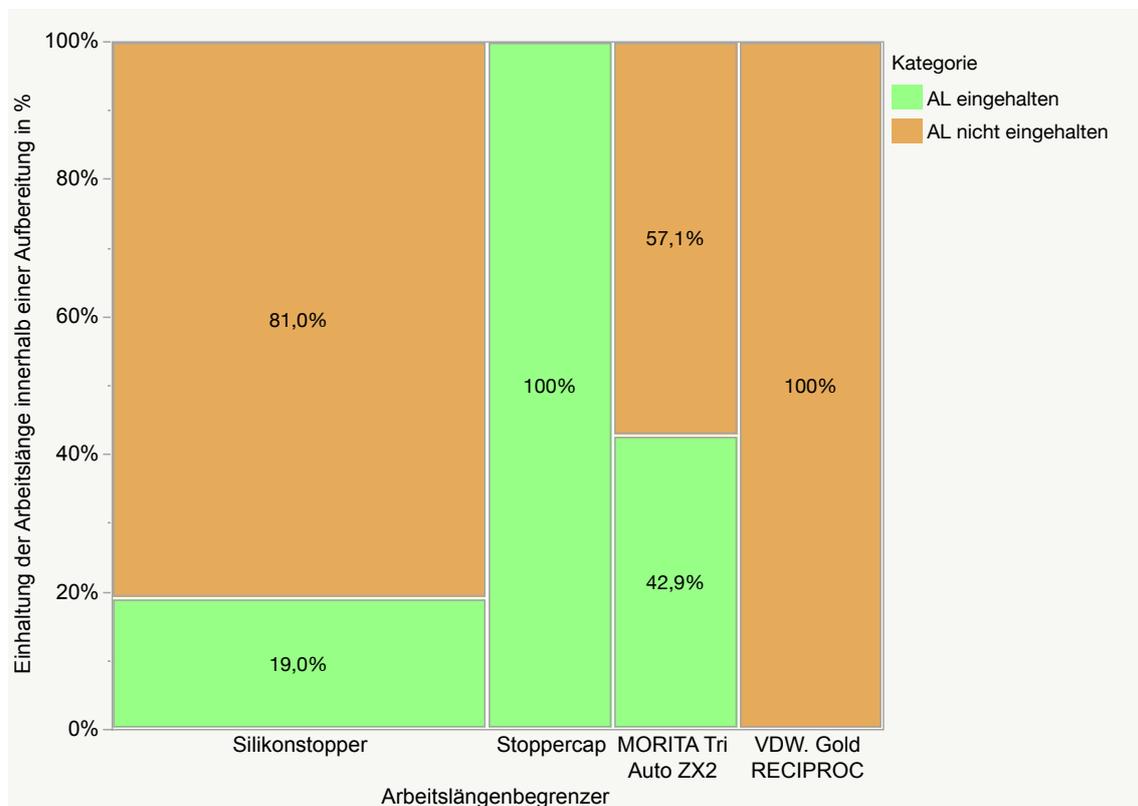


Abbildung 21: Verteilungsdiagramm Aufbereitungen nach Arbeitslängenbegrenzern, die Breite der Balken entspricht der Anzahl der Aufbereitungen

3. Ergebnisse

Tabelle 12: Kontingenztabelle Aufbereitungen nach Arbeitslängenbegrenzern

Häufigkeiten n	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Silikonstopper	4 19,1 %	17 81 %	21 48,8 %
Stoppercap	7 100 %	0 0 %	7 16,3 %
MORITA Tri Auto ZX2	3 42,9 %	4 57,1 %	7 16,3 %
VDW. Gold RECIPROC	0 0 %	8 100 %	8 18,6 %
Summe	14 32,6 %	29 67,5 %	43 100 %
n	Freiheitsgrade	Chi ²	p nach Fisher`s exact Test
43	3	20,446	< 0,0001

Der Silikonstopper hatte eine ca. 19 %ige Erfolgsrate, mit Verwendung der Stoppercap wurden 100 % der Aufbereitungen als „AL eingehalten“ bewertet. Bei der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 wurden 42 % der Aufbereitungen als „AL eingehalten“ betrachtet, während mit der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC keine Aufbereitung erzielt werden konnte, die als „AL eingehalten“ definiert war. Der Fisher`s exact Test zeigt, dass die Unterschiede in den Gruppen der Arbeitslängenbegrenzern signifikant sind ($p < 0,0001$).

Um herauszufinden mit welchem Arbeitslängenbegrenzer ein signifikanter Unterschied bei den Aufbereitungen erzielt werden konnte, wurde eine paarweise Kontingenzanalyse mit Fisher`s exact Test durchgeführt. Die Kontingenztabelle hierzu zeigen Tabelle 13- 18.

Tabelle 13: Kontingenztabelle Silikonstopper vs. Stoppercap

	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Silikonstopper	4	17	21
Stoppercap	7	0	7
Summe	11	17	28
n	Chi ²	p nach Fisher`s exact Test	
28	14,424	= 0,0003	

Tabelle 14: Kontingenztabelle Stoppercap vs. MORITA Tri Auto ZX2

	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Stoppercap	7	0	7
MORITA Tri Auto ZX2	3	4	7
Summe	10	4	14
n	Chi ²	p nach Fisher`s exact Test	
14	5,6	= 0,0699	

3. Ergebnisse

Tabelle 15: Kontingenztabelle MORITA Tri Auto ZX2 vs. VDW. Gold

	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
MORITA Tri Auto ZX2	3	4	7
VDW. Gold RECIPROC	0	8	8
Summe	3	12	15
n	Chi ²	p nach Fisher`s exact Test	
15	4,286	= 0,0769	

Tabelle 16: Kontingenztabelle Stoppercap vs. VDW. Gold RECIPROC

	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Stoppercap	7	0	7
VDW. Gold RECIPROC	0	8	8
Summe	7	8	15
n	Chi ²	p nach Fisher`s exact Test	
15	15	= 0,0002	

Tabelle 17: Kontingenztabelle Silikonstopper vs. MORITA Tri Auto ZX2

	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Silikonstopper	4	17	21
MORITA Tri Auto ZX2	3	4	7
Summe	7	21	28
n	Chi ²	p nach Fisher`s exact Test	
28	1,5873	= 0,3183	

Tabelle 18: Kontingenztabelle Silikonstopper vs. VDW. Gold RECIPROC

	AL eingehalten	AL nicht eingehalten	Summe
Silikonstopper	4	17	21
VDW. Gold RECIPROC	0	8	8
Summe	4	25	29
n	Chi ²	p nach Fisher`s exact Test	
29	1,7676	= 0,5520	

Im paarweisen Vergleich zeigt sich in Fisher`s exact Test ein signifikanter Unterschied nur zwischen der Stoppercap und dem Silikonstopper ($p = 0,0003$), sowie zwischen der Stoppercap und der automatischen Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC ($p = 0,0002$). Alle anderen Paarungen waren nicht signifikant unterschiedlich.

4. Diskussion

4.1. Diskussion von Material und Methode

Die vorliegenden Untersuchungen wurden als *in vitro*-Studie durchgeführt, um zu überprüfen, ob unter Laborbedingungen, die an den Praxisalltag angelehnt waren, die Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge bei endodontischen Aufbereitungen möglich ist.

Die gewählten Bedingungen boten ein optimales Sichtfeld, einen unbehinderten Zugang zum Untersuchungsobjekt, keine Beeinträchtigung durch die Gegebenheiten einer Mundhöhle und somit die Möglichkeit der Konzentration rein auf die Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge.

Die Verwendung von 3D-gedruckten Zähnen ermöglichte darüber hinaus die exakte Bestimmung der Arbeitslänge direkt im Wurzelkanal, wie sie sonst nur an extrahierten Zähnen möglich gewesen wäre. Damit wurde der Fehler, der sich aus radiologischen Arbeitslängenbestimmungen ergibt (ElAyouti & Löst, 2006), eliminiert.

Abweichungen von der vordefinierten Arbeitslänge lassen sich damit nur noch auf Faktoren im Zusammenhang mit der Aufbereitung zurückführen.

Auch der Vergleich verschiedener Szenarien unter standardisierten Ausgangsbedingungen, wie z.B. die Wurzelkanalanatomie, Trepanationsöffnung oder Referenzpunkte ist nur mit 3D-gedruckten Zähnen möglich.

Bei dem verwendeten Kunststoff handelt es sich um ein in Medizin und Zahnmedizin eingesetztes Produkt. Er kann eventuell gegenüber Dentin abweichende Eigenschaften aufweisen, was jedoch keinen Einfluss auf die hier durchgeführten Längenbestimmungen haben sollte.

Die Wahl der Endomotoren fiel auf den VDW. Gold RECIPROC als in den Praxen meist verwendeter Endomotor, sowie auf den Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 als neuestes Produkt der Morita Familie, dessen Apexlokator DentaPort ZX der aktuelle Goldstandard ist.

Die Geräte wurden gemäß der Herstellerangaben verwendet. Bei der Überprüfung der automatischen Stopp-Funktion wurde am Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 die Einstellung verändert, sodass das Foramen und nicht, wie voreingestellt, die apikale Konstriktion als Endpunkt ausgewählt wurde.

Am Endomotor VDW. Gold RECIPROC konnten keine Einstellungsveränderungen hinsichtlich des apikalen Endpunktes vorgenommen werden. Laut Gebrauchsanweisung stoppt der Endomotor, sobald der Apex erreicht wird (Gebrauchsanweisung VDW. Gold RECIPROC). Ob hiermit die apikale Konstriktion oder das Foramen apikale gemeint ist, wird nicht spezifiziert.

Die Aufbereitung war in der Durchführung am Praxisalltag orientiert. Es wurde auf ein sorgfältiges Arbeiten geachtet, jedoch wurde, wie im klinischen Alltag, dynamisch aufbereitet, wobei eine, nur unter Laborbedingungen einzuhaltende, extreme Genauigkeit nicht angestrebt werden sollte.

In klinischen Studien und im klinischen Alltag werden $\pm 0,50$ mm als Abweichung von der gemessenen Arbeitslänge akzeptiert. Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um *in vitro* Untersuchungen handelt, wurde ein schärferer Grenzwert von $\pm 0,25$ mm gewählt. Connert et al. (2018) konnten bei der Untersuchung elektronischer Apexlokatoren zeigen, dass ein kleineres Toleranzintervall die Unterscheidbarkeit zwischen verschiedenen Methoden erhöht. Auch im Hinblick auf die Lage der apikalen Konstriktion, die im Mittel nur 0,2 mm vom Foramen apikale entfernt liegt, ist ein enger Toleranzbereich von $\pm 0,25$ mm für den Erhalt der apikalen Konstriktion im Verlauf einer endodontischen Behandlung sinnvoll.

Es wurde das Mtwo Endofeilensystem mit mehreren aufsteigenden Endofeilengrößen genutzt, sodass bei jeder Endofeile der Stopper neu eingestellt werden musste. Hierbei auftretende Fehler, würden sich unabhängig voneinander auf die Einzelmessungen auswirken.

4. Diskussion

Es wurde mit H₂O gespült, da bei der Aufbereitung ohne die Verwendung der automatischen Stopp-Funktion, kein physiologisches Milieu benötigt wurde. Bei der Überprüfung der automatischen Stopp-Funktion wurde 0,9 %ige NaCl-Lösung als Umgebungsmedium verwendet, da das physiologische Milieu der Mundhöhle für die Funktion der endometrischen Messungen simuliert werden musste. Zum Aufrechterhalten des konstanten Milieus wurde, um ein Verblocken des Kanals zu verhindern, ebenfalls mit 0,9 %ige NaCl-Lösung gespült. Ein gewebeauflösender Effekt wurde nicht benötigt, sodass auf die Verwendung von Natriumhypochlorit, wie im klinischen Alltag üblich, verzichtet wurde. Tchorz et al. (2013) beschreiben, dass die elektrometrische Längenmessung in 0,9 %ige NaCl-Lösung exakte Messergebnisse liefert.

Eine Studie von Erdemir et al. (2007), in der der Einfluss von verschiedenen Spülflüssigkeiten auf die automatische Stopp-Funktion überprüft wurde, ergab, dass bei der Verwendung von 0,9 %ige NaCl-Lösung die automatische Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX, das Vorgängermodell des in dieser Arbeit verwendeten Endomotors, früher auslöste, als bei der Verwendung anderer Flüssigkeiten, wie z.B. Natriumhypochlorit, Wasserstoffperoxid oder Chlorhexidin. Diese Untersuchung wurde im physiologischen Milieu der Patienten an zur Extraktion vorgesehenen Zähnen durchgeführt (Erdemir et al., 2007).

Ein frühzeitiges Stoppen bei Verwendung der automatischen Stopp-Funktion und 0,9 %ige NaCl-Lösung als Spüllösung, wie von Erdemir et al. beschrieben, hätte zu vermehrter Unterinstrumentierung geführt. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit nicht festgestellt werden.

Die in der Praxis oft notwendige Behandlung mit Hilfe eines Mundspiegels wurde beim Einsatz des Silikonstoppers simuliert. Eine Beeinträchtigung durch die indirekte Sicht auf die Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge wurde nicht quantifiziert, sie würde sich aber in dem Ergebnis der Einzelmessung niederschlagen.

Lupenbrille und Operationsmikroskop wurden, wie in den Wissenschaftlichen Stellungnahmen für endodontische Behandlungen empfohlen, eingesetzt

(Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 2004).

Somit wurden alle, im Praxisalltag verwendeten, optischen Unterstützungshilfen zur Einhaltung der Arbeitslänge genutzt.

Jede Aufbereitung wurde mit einer Videokamera festgehalten. Bisherige Untersuchungen (z.B. Roderjan, 2009; de Vasconcelos et al., 2015; Bernardes et al., 2017; Christofzik et al., 2017; Klemz et al., 2021) haben mit verschiedenen Methoden nur den Endpunkt der Endofeilenspitze ermittelt und diesen auf Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge bewertet. Hierzu wird die Endofeile nach dem Erreichen der gewünschten Arbeitslänge mit Kunststoff oder anderen Materialien im Wurzelkanal fixiert. Anschließend wird die Zahnwurzel aufgefräst, bis die Endofeilenspitze im Wurzelkanal sichtbar wird und der Abstand bis zum gewünschten Endpunkt bestimmt werden kann. Bei diesem Verfahren kann es zu ungewollten Veränderungen der maximalen Arbeitslänge kommen. Dieser Fehler kann bei der Videoanalyse ausgeschlossen werden.

Das Mittel der Videoaufnahme wurde auch gewählt, um zu sehen, ob es während des dynamischen Prozesses der Aufbereitung zu Über- oder Unterinstrumentierung kommen kann, auch wenn die Lage der Endofeilenspitze am Ende der Aufbereitung die vordefinierte Arbeitslänge aufweist.

Bei der Verwendung der automatischen Stopp-Funktion beider Endomotoren wurde beobachtet, dass die Endofeile z.T. nach einer Überinstrumentierung zurückrotierte und dann erst der Endomotor stoppte. Beim Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 ist die Rückrotation am Stoppunkt eine integrierte Funktion (OAS-Funktion, Optimum Apical Stop), die eine Blockierung und eine Abtrennung der Endofeile verhindern soll (Broschüre MORITA Tri Auto ZX2). Obwohl es sich um eine Schutzfunktion handelt, führt die Rückrotation zu einer Reduktion der maximal erreichten Arbeitslänge.

Dies hätte ohne Analyse des Videomaterials nicht festgestellt werden können und die dokumentierte Messung über die Lage der Endofeilenspitze wäre kürzer ausgefallen. Diese Beobachtung kann eventuell Unterschiede der hier vorgestellten Messungen zu anderen Untersuchungen der automatischen

Stopp-Funktion erklären, die zum Teil ein sehr exaktes Einhalten der Arbeitslänge beschreiben (Roderjan, 2009; de Vasconcelos et al., 2015; Bernardes et al., 2017; Christofzik et al., 2017; Klemz et al., 2021).

Die Videoanalyse erlaubt es darüber hinaus eine endodontische Aufbereitung an einem Zahn durchzuführen und jeden einzelnen Aufbereitungsschritt zu beurteilen. Dies bedeutet zum einen eine höhere Praxisnähe, zum anderen hätten sich Abhängigkeiten zwischen den Einzelschritten bemerkbar machen können.

Es bestand z.B. die Möglichkeit, dass eine einmalige Überinstrumentierung mit einer früh eingesetzten Endofeile (z.B. 15/.05) die Wahrscheinlichkeit für Überinstrumentierung mit danach eingesetzten Endofeilen (z.B. 20/.06, 25/.05 oder 30/.05) erhöht. Derartige Abhängigkeiten wurden weder in der Darstellung der Prozeduren (Abb. 20), noch in der statistischen Auswertung zum Einfluss der Endofeilengröße auf die Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge beobachtet (Abb. 18).

Die digitale Auswertung an HD-Monitoren und die Software-integrierte Messfunktion ermöglicht eine sehr exakte Durchführung der Messungen. Die in dem 3D-Zahnmodell integrierte 0,25 mm breite Kalibrierungsreferenz, deren Sichtbarkeit zusätzlich mit einem Folienstift optisch verstärkt wurde, bot einen internen Maßstab. Hiermit konnten jegliche Veränderungen durch digitale Vergrößerungen umgerechnet werden, sodass hierdurch aufgetretene Fehler heraus gerechnet wurden.

4.1.1. Rolle des Behandlers

Um interindividuelle Unterschiede in der Durchführung und der Beurteilung der Versuche zu vermeiden, was zu einer weiteren Variablen geführt hätte, wurden alle Aufbereitungen von einer Studierenden durchgeführt und beurteilt. Sowohl Baumann und Roth (1999) als auch Gluskin et al. (2001) haben gezeigt, dass es bei der maschinellen Aufbereitung keinen Unterschied zwischen Studierenden und erfahrenden Behandlern gibt.

Die Verblindung wurde bis zum Abschluss aller Versuchsreihen aufrechterhalten, sodass eine Lernkurve ausgeschlossen werden kann. Unabhängig davon könnte ein Spezialist auf dem Gebiet der Endodontie wahrscheinlich auch mit dem Silikonstopper etwas bessere Ergebnisse erzielen. Bei der Nutzung der automatischen Stopp-Funktion in den Handstücken erscheint dies unwahrscheinlich.

Es könnten in einem weiteren Versuchsansatz Aufbereitungen von Spezialisten, Generalisten und Studierenden in Bezug auf das Einhalten der vordefinierten Arbeitslänge unter Einsatz verschiedener Arbeitslängenbegrenzer miteinander verglichen werden.

4.2. Diskussion der Ergebnisse

4.2.1. Rolle der Arbeitslängenbegrenzer

In 59,5 % der einzelnen Aufbereitungsschritte konnte die vorbestimmte Arbeitslänge +/- 0,25 mm eingehalten werden.

In insgesamt 26,8 % der einzelnen Aufbereitungsschritte wurde überinstrumentiert, d.h. es wurde die vordefinierte Arbeitslänge um mehr als 0,25 mm überschritten. ElAyouti et al. (2001), haben in 51 % der Fälle Überinstrumentierungen in Prämolaren beobachtet, deutlich mehr als in Molaren oder Inzisivi. Der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Untersuchungen ist die Bestimmung der Arbeitslänge. Während bei ElAyouti et al. das radiologische Bild herangezogen wurde, was durch die zweidimensionale Darstellung zu Fehlern in der Arbeitslängenbestimmung führt, wurde in der vorliegenden Arbeit die Arbeitslänge sehr exakt direkt im Wurzelkanal bestimmt.

Unterinstrumentierungen, d.h. das Nichterreichen der vorbestimmten Arbeitslänge um mehr als 0,25 mm wurde in 13 % der Fälle beobachtet.

Demnach konnte, trotz optimierter Laborbedingungen, die vorbestimmte Arbeitslänge in 39,8 % der einzelnen Aufbereitungsschritte nicht eingehalten werden.

Dieser hohe Prozentsatz an Abweichungen von der vorbestimmten Arbeitslänge kann zum Teil die von Nascimento et al. (2018) beschriebene Über- und Unterfüllung von 58 % der in dieser Studie nachuntersuchten endodontisch vorbehandelten Prämolaren erklären.

Da die Arbeitslänge in der vorliegenden Arbeit direkt im Wurzelkanal bestimmt wurde, entfallen alle Fehlerquellen, die mit der radiologischen Arbeitslängenbestimmung in Zusammenhang stehen. Die Daten sprechen vielmehr dafür, dass die zuvor exakt bestimmte Arbeitslänge während der Aufbereitung nicht durchgängig eingehalten werden kann.

Als wichtigster Faktor kommt hierfür der Arbeitslängenbegrenzer in Frage. Die vorliegende Untersuchung zeigte signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Arbeitslängenbegrenzern.

Während mit dem Silikonstopper nur in 52,6 % der Fälle die vordefinierte Arbeitslänge eingehalten werden konnte, zeigten sich mit der innovativen Stoppercap weder Über- noch Unterinstrumentierungen. Dieser Unterschied war signifikant (Tukey-Kramer HSD, $p = 0,0002$).

Details zu der innovativen Stoppercap wurden noch nicht publiziert. Das Fehlen von sowohl Über- als auch Unterinstrumentierungen spricht für ihre zukünftige Weiterentwicklung.

Beim Einstellen eines Silikonstoppers unter Verwendung einer Messlehre muss mit einem Fehler in der Arbeitslänge von 0,4 mm gerechnet werden (ElAyouti & Löst, 2006). Die Skalierung der Messlehre und die Auflösung des menschlichen Auges lassen kein genaueres Einstellen zu.

Die Stoppercap füllt den Abstand zwischen dem Endofeilengriff und dem Beginn der Arbeitslänge komplett aus. Die Arbeitslänge kann durch eine Kombination verschiedener Stoppercaps auf 0,25 mm exakt fest eingestellt werden.

Ein Verrutschen oder Abkippen und eine dadurch bedingte Verlängerung der Arbeitslänge ist, im Gegensatz zum konventionellen Silikonstopper, nicht

möglich. Das Material, aus dem die Stoppercaps gefertigt wurden, ist nicht komprimierbar. Daher kann die voreingestellte Arbeitslänge nicht durch erhöhten Druck überschritten werden. Zudem haben die Stoppercaps einen deutlich größeren Durchmesser als die Silikonstopper, was ein unbeabsichtigtes Abtrutschen in die Trepanationsöffnung verhindert. Da die Stoppercaps bündig auf der gesamten Zahnkrone aufliegen, ist es nicht notwendig einen singulären Referenzpunkt zu wählen.

Ein singulärer Referenzpunkt birgt immer die Gefahr ihn im Verlauf der Aufbereitung nicht reproduzieren zu können, vor allem bei der Verwendung eines Mehrfeilensystemes und wenn mehrere Tage zwischen den verschiedenen Sitzungen liegen oder auch verschiedene Behandler involviert sind. ElAyouti et al. (2002) haben bei wiederholten Messungen mit Apexlokatoren, die sehr exakt die Wurzelkanallänge bestimmen können, eine Differenz in den Messungen von bis zu 0,3 mm festgestellt. Um so schwieriger ist es, einen singulären Referenzpunkt mehrfach exakt mit einem Silikonstopper zu reproduzieren.

Die Faktoren, durch die unter Verwendung der Stoppercap Überinstrumentierungen verhindert werden können, scheinen sich auch positiv auf Unterinstrumentierungen auszuwirken. Die fest eingestellte Arbeitslänge und der bündige Sitz auf der Zahnkrone ermöglichen die Ausnutzung der vollen Arbeitslänge bei jedem Arbeitsschritt.

Der Silikonstopper konnte diese Sicherheit scheinbar nicht vermitteln, sodass in dieser Untersuchung in ca. 30 % der Messungen, bei denen der Silikonstopper als Arbeitslängenbegrenzer eingesetzt wurde, Unterinstrumentierungen auftraten.

Neben dem exakten Einhalten der Arbeitslänge bietet die Stoppercap die Möglichkeit, auf indirektes Arbeiten durch einen Mundspiegel zu verzichten, da ein bündiger Sitz auf der Zahnkrone immer gewährleistet ist, was den Arbeitsprozess vereinfacht.

Auch kann auf den Gebrauch von Vergrößerungshilfen zum Einhalten der Arbeitslänge verzichtet werden. Um jedoch Details im Wurzelkanal zu identifizieren, ist deren Einsatz weiterhin sinnvoll.

Die Handhabung der Stoppercap war einfach und sicher.

Nachteilig ist, dass die exakte Einstellung der Arbeitslänge durch die Kombination von verschiedenen Stoppercaps zeitaufwändiger ist als das Einstellen eines Silikonstoppers.

Durch die Größe der Stoppercap ist die Sicht in den Wurzelkanal während der Aufbereitung behindert.

Bei der Überprüfung der automatischen Stopp-Funktion der verwendeten Endomotoren zeigte sich mit 67,9 % (MORITA Tri Auto ZX2) bzw. 31,3 % (VDW. Gold RECIPROC) korrekt eingehaltener vordefinierter Arbeitslängen ein nicht zufriedenstellendes Ergebnis. Der Unterschied zwischen den Endomotoren war signifikant (Tukey-Kramer HSD, $p = 0,0002$). Besonders problematisch ist, dass es sich fast ausschließlich um Überinstrumentierungen handelte (s. Abb. 11 und Abb. 20). Dies entspricht früheren Untersuchungen von Roderjan (2009) der ebenfalls mit vergleichbaren Endomotoren und der automatischen Stopp-Funktion die gewünschte Zielregion, in diesem Fall die apikale Konstriktion, in 76 % der Fälle (VDW. Gold RECIPROC) bzw. in 72 % (Morita, DentaPort ZX) um mehr als 0,25 mm überschritten hat.

Im Gegensatz dazu, beschreibt Christofzik et al. (2017) eine Erfolgsquote mit der automatischen Stopp-Funktion vom Endomotor VDW. Gold RECIPROC von 100 % in einem Zielbereich +0,25 mm. Auch hier war als Zielbereich wieder die apikale Konstriktion gewählt. Jedoch wird in der Publikation die automatische Stopp-Funktion, als der Punkt auf der Anzeige definiert, an dem das dritte grüne LED-Licht aufleuchtet. Dies ist jedoch laut der Gebrauchsanweisung vom VDW. Gold RECIPROC Endomotor ein Punkt koronal von dem Punkt, an dem der Endomotor automatisch stoppt (Christofzik et al., 2017; Gebrauchsanweisung VDW. Gold RECIPROC). Ebenso nur an der LED-Anzeige und nicht an dem automatischen Stopp des Endomotor haben sich de Vasconcelos et al. (2015) bei ihren Untersuchungen mit dem Endomotor VDW. Gold RECIPROC orientiert. Sie beschreiben eine 100 %ige Einhaltung

der Arbeitslänge bei einem Referenzbereich von $\pm 0,5$ mm um das apikale Foramen.

Klemz et al. (2021) beschreiben für den Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 eine Erfolgsquote von über 90 % für das Einhalten der Arbeitslänge.

Hierbei ist zu beachten, dass der automatische apikale Stopp auf 0,5 und nicht auf Ap, was dem apikalen Foramen entsprechen würde, eingestellt war. Die durchgeführten Messungen erfolgten aber in Relation zum apikalen Foramen (Klemz et al., 2021).

Die automatische Stopp-Funktion des Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 und des Endomotor VDW. Gold RECIPROC wurden auch von Bernardes et al. (2021) untersucht. Bei diesen Untersuchungen stoppten die verwendeten Endomotoren in über 95 % der Fälle in einem Bereich $\pm 0,5$ mm vom apikalen Foramen entfernt. Der Arbeit ist nicht zu entnehmen, wie viele Werte in einem Bereich von $\pm 0,25$ mm vom apikalen Foramen entfernt liegen. Die Ergebnisse sind insofern nicht mit den Ergebnissen dieser Untersuchung vergleichbar, da zum einen das Foramen auf 200 μ m aufgeweitet wurde, was eine Modifikation der natürlichen Verhältnisse darstellt und eventuell die Erkennung des Foramens durch den Endomotor erleichtert. Zum anderen wurde nur ein standardisierter Aufbereitungsschritt durchgeführt und nicht wie hier, eine praxisnahe Aufbereitung simuliert (Bernardes et al., 2021).

In der vorliegenden Arbeit wurde sich bei dem Endomotor VDW. Gold RECIPROC nicht an der LED-Anzeige orientiert und der Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 war auf Ap eingestellt. Die Untersuchungen dienten nicht einer Überprüfung der endometrischen Längenmessung, sondern einer Überprüfung der vom jeweiligen Hersteller beschriebenen automatischen Stopp-Funktion.

Aus diesem Grund erfolgte jeder Aufbereitungsschritt bis der jeweilige Endomotor durch Stoppen das Erreichen des Foramens anzeigte.

Aufgrund der sich deutlich unterscheidenden Methoden ist ein Vergleich zwischen den verschiedenen publizierten Ergebnissen und den hier vorgestellten Daten nicht sinnvoll. Es zeichnet sich aus den aufgeführten Studien jedoch ab, bei der Verwendung der automatischen Stopp-Funktion, einen Sicherheitsabstand von mindestens 0,5 mm zum gewünschten Zielpunkt

4. Diskussion

einzuhalten, um eine Überinstrumentierung zu vermeiden. Ein nach koronal verschobener Stoppunkt kann allerdings nur am Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 eingestellt werden.

Die elektrometrische Längenmessung mit Apexlokatoren ohne gleichzeitige Aufbereitung ist sehr genau und präzise (Connert et al., 2018). Im Zusammenhang mit der Aufbereitung können diese exakten Werte offensichtlich nicht in ein automatisches Stoppen des Endomotors umgesetzt werden.

Nach Roderjan (2009) könnte diese Diskrepanz auf der Trägheit des Endomotors, der engen Differenz zwischen einer Bewertung nach „AL eingehalten“ / „AL nicht eingehalten“ oder der Leitungsgeschwindigkeit während der Messung von der Instrumentenspitze zum Endomotor beruhen. Hinzu kommt wahrscheinlich auch der in den Endomotoren für die automatische Stopp-Funktion eingesetzte Algorithmus, über den die Hersteller keine Angaben machen.

Darüber hinaus kann möglicherweise auch ein zu hoher Druck auf das Handstück des Endomotors während der Aufbereitung durch einen unerfahrenen Behandler nicht ausgeschlossen werden.

Auch im Vergleich zur innovativen Stoppercap wurde mit dem Endomotor VDW. Gold RECIPROC die Arbeitslänge signifikant häufiger nicht eingehalten. Der Unterschied in der Einhaltung der Arbeitslänge mit dem Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 gegenüber der innovativen Stoppercap war in den hier angewandten statistischen Verfahren nicht signifikant. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass 32 % der Messergebnisse mit dem Endomotor MORITA Tri Auto ZX2 Überinstrumentierungen waren, während mit der innovativen Stoppercap keine Überinstrumentierungen auftraten. Dieser Unterschied ist klinisch von entscheidender Bedeutung für die Prognose des Zahnes.

4.2.2. Rolle der Vergrößerungshilfen

Vergrößerungshilfen ermöglichen noch optische Differenzierungen in einem Bruchteil eines Millimeters. Die Lupenbrille kommt eher im klinischen Alltag eines Generalisten zum Einsatz, das Operationsmikroskop eher bei Spezialisten für Endodontie. Beide Bereiche wurden in den Versuchen abgedeckt.

Der Einsatz von Lupenbrille und Operationsmikroskop dient dem genaueren Einstellen des Silikonstoppers mit Hilfe einer Messlehre auf der Endofeile und auch während der Aufbereitung dient die Vergrößerungshilfe einem genaueren Positionieren des Silikonstoppers auf dem koronalen Referenzpunkt.

Vor allem mit dem Operationsmikroskop können darüber hinaus Strukturen innerhalb des Wurzelkanals erkannt werden, die dem Spezialisten zur Orientierung dienen. Ob dies für die korrekte Einhaltung der Arbeitslänge relevant ist, ist nicht bekannt und an den 3D-gedruckten Zähnen nicht zu überprüfen.

Im Vergleich zu den Aufbereitungen ohne Vergrößerungshilfe zeigten die Vergrößerungshilfen keinen signifikanten Vorteil in der Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge ($\chi^2 (2) = 0,337, p = 0,8451$). Bezogen auf die Einhaltung einer vordefinierten Arbeitslänge ist der Vorteil einer Vergrößerungshilfe in der endodontischen Aufbereitung, wenn überhaupt vorhanden, nur gering.

Dies spricht nicht gegen den Einsatz von Vergrößerungshilfen bei der endodontischen Aufbereitung, um z.B. kleine Details im Wurzelkanal zu erkennen.

4.2.3. Rolle der Instrumentengrößen

Durch das Verwenden des Mtwo Endofeilensystems, welches mehrere Endofeilengrößen umfasst, konnte überprüft werden, ob ein kleinerer oder größerer Durchmesser vermehrt zu Über- und Unterinstrumentierung führt. Es

ist denkbar, dass ein kleinerer Durchmesser verstärkt zu Überinstrumentierungen führt, während ein größerer Durchmesser eher zu Unterinstrumentierung verleitet. Die Kontingenzanalyse ergab jedoch keinen signifikanten Unterschied in der Einhaltung der Arbeitslänge zwischen den verschiedenen Endfeilengrößen. Auch eine Tendenz war nicht zu erkennen. Darüber hinaus kann, da die Feilengrößen schrittweise zunehmend eingesetzt werden, ein Rückschluss auf den zeitlichen Verlauf gemacht werden. Eine Endfeile der Größe 15/.05 wird immer zu Beginn der Aufbereitung genutzt. Zu diesem Zeitpunkt könnte der Behandler noch aufmerksamer und ruhiger agieren, was zu genauerem Einhalten der vordefinierten Arbeitslänge führen könnte. Die Verwendung einer Endfeile der Größen 25/.06 oder 30/.05 erfolgt erst gegen Ende einer Aufbereitung, was die korrekte Einhaltung der Arbeitslänge beeinflussen könnte.

Da kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Instrumentengrößen festgestellt werden konnte, kann auch ein Einfluss der Behandlungszeit auf die Arbeitslängeneinhaltung über den Zeitraum einer Aufbereitung ausgeschlossen werden.

4.2.4. Wurzelanatomie und koronaler Referenzpunkt

Unveränderbare Faktoren stellen die Wurzelanatomie und der koronale Referenzpunkt dar.

In der vorliegenden Arbeit wurden Prämolaren, aufgrund der beobachteten Häufigkeit von Überinstrumentierungen und aufgrund der einfachen Wurzelanatomie gewählt (ElAyouti et al., 2001).

Aus den zur Verfügung stehenden Zähnen wurden Prämolaren selektiert, die gerade Wurzelkanäle und einen deutlichen koronalen Referenzpunkt aufwiesen.

Die Zähne waren schon trepaniert, damit bei jeder Aufbereitung die gleiche Trepanationsöffnung vorlag und dieser Schritt die Längenmessung nicht beeinflusst.

Diese vermeintlich einfachen Ausgangsbedingungen könnten zu eventuell weniger exaktem Arbeiten verführen. Gleichzeitig sollte die vorbestimmte Arbeitslänge aber auch leichter während der Aufbereitung eingehalten werden können.

Um die Wurzelanatomie und den koronalen Referenzpunkt als beeinflussende Faktoren bei der Einhaltung der Arbeitslänge auszuschließen, wurde eine Kontingenzanalyse durchgeführt. Es sind Unterschiede zwischen den einzelnen Zahntypen erkennbar, die jedoch nicht signifikant sind (Chi^2 , $p = 0,0758$).

Ein Verfälschen der Ergebnisse zur Einhaltung der Arbeitslängen durch unterschiedliche Wurzelanatomien oder koronale Referenzpunkte ist damit ausgeschlossen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nur selektierte Prämolaren verwendet wurden. Rückschlüsse auf Prämolaren mit komplizierterer Anatomie oder andere Arten von Zähnen können nicht gezogen werden.

Die in diesen Versuchen gewählten optimierten Bedingungen herrschen im Praxisalltag nicht vor. Hier muss mit der vorgefundenen individuellen Anatomie umgegangen werden, sodass die Ergebnisse im Einzelfall anders ausfallen können.

4.2.5 Schlussfolgerung aus den Einzelmessungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Arbeitslängenbegrenzers einen entscheidenden Einfluss auf die Einhaltung der vorbestimmten Arbeitslänge während der endodontischen Aufbereitung hat. Dies ist unabhängig von der Verwendung einer Vergrößerungshilfe, der verwendeten Instrumentengröße, dem Zeitpunkt während der Aufbereitung und der Wurzelanatomie sowie des koronalen Referenzpunktes.

Mit der innovativen Stoppercap kam es, auch bei einer unerfahrenen Untersucherin, weder zu Über- noch zu Unterinstrumentierungen.

4.3. Diskussion der Aufbereitungen

Nach den Ergebnissen der Einzelmessungen ist die Stoppercap besser geeignet, vorbestimmte Arbeitslängen einzuhalten, als dies mit den anderen untersuchten Arbeitslängenbegrenzern möglich war.

Da es sich bei dem verwendeten Endofeilensystem um ein Mehrfeilensystem handelt, musste die Frage untersucht werden, ob sich die positiven Einzelergebnisse auf die gesamte Aufbereitung übertragen lassen.

Die Kombination mehrere Schritte bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für das exakte Einhalten der Arbeitslänge in einer endodontischen Aufbereitung sinkt.

Bei der in dieser Arbeit erzielten Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse, liegt die Wahrscheinlichkeit die Arbeitslänge nicht zu überschreiten, d.h. sie einzuhalten oder koronal der eingestellten Arbeitslänge zu bleiben, pro Aufbereitungsschritt bei ca. 73 %. Die Wahrscheinlichkeit mit der letzten Endofeile den Zielbereich exakt zu erreichen, liegt bei 60 %. Dies bedeutet bei fünf Schritten, wie für Silikonstopper und Stoppercap durchgeführt, dass sich eine Wahrscheinlichkeit von ca. 17 % für eine erfolgreiche Aufbereitung ergibt ($p = 0,73^4 \times 0,6$).

Für die automatische Stopp-Funktion der verwendeten Endomotoren, für die nur vier Endofeilen genutzt wurden, liegt die Wahrscheinlichkeit für einen Aufbereitungserfolg bei ca. 23 % ($p = 0,73^3 \times 0,6$).

Der Silikonstopper liegt mit 19 % Aufbereitungen die als „AL eingehalten“ bewertet wurden im erwarteten Bereich von ca. 17 %. Die Stoppercap übertrifft mit 100 % den erwarteten Wert deutlich.

Bei den automatischen Stopp-Funktionen sind 23 % Erfolgsrate erwartet gewesen, damit liegt die automatische Stopp-Funktion des Endomotors MORITA Tri Auto ZX2 mit ca. 42 % deutlich über den Erwartungen, die automatische Stopp-Funktion des Endomotors VDW. Gold RECIPROC hat mit 0 % den erwarteten Wert nicht erfüllt.

Die beschriebenen Nachteile der Stoppercap, wie eingeschränkte Sicht in den Wurzelkanal während der Aufbereitung und zeitaufwändigeres Einstellen der vordefinierten Arbeitslänge durch die Verwendung mehrerer Stoppercaps, lassen sich umgehen, in dem die ersten Aufbereitungsschritte mit einem

Silikonstopper und einem ausreichenden Sicherheitsabstand in der Arbeitslänge durchgeführt werden. Nur bei der Verwendung der letzten Endofeile kommt die Stoppercap mit einer exakt eingestellten Arbeitslänge zum Einsatz, um im letzten Arbeitsschritt die optimale Arbeitslänge für das weitere Procedere zu erzielen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die vordefinierte Arbeitslänge auch unter optimalen Arbeitsbedingungen im Labor mit den konventionellen Arbeitslängenbegrenzern nicht in ausreichendem Maße eingehalten werden kann. Dies sollte in die weitere Diskussion über die Bedeutung der apikalen Konstriktion, dem eigentlichen Endpunkt einer Wurzelkanalfüllung einfließen, da, wie hier gezeigt, nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Abweichung in der Einhaltung der Arbeitslänge größer ist als die apikale Konstriktion selbst. Es ist davon auszugehen, dass unter realen Bedingungen in der Mundhöhle eines Patienten die Abweichungen noch gravierender ausfallen würden. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass ein erfahrener Untersucher auch bessere Ergebnisse hätte erzielen können.

Die im Zusammenhang mit der Ermittlung der Arbeitslänge auftretenden Fehlerquellen bleiben in der Praxis aber erhalten, unabhängig davon, dass die innovative Stoppercap die dauerhafte Einhaltung der Arbeitslänge über den gesamten Verlauf einer endodontischen Behandlung auch für unerfahrene Behandler ermöglichen könnte.

5. Zusammenfassung

Für den Erfolg der endodontischen Behandlung ist die Einhaltung der Arbeitslänge, neben dem Zustand der Pulpa, ein entscheidender Faktor. Besonders Überinstrumentierungen und Überfüllungen wirken sich ungünstig auf die Prognose des Zahnes aus.

In der Realität werden bis zu 10 % Überfüllungen und bis zu 38 % Unterfüllungen beobachtet, wie prognostische Studien gezeigt haben. Somit ist die Einhaltung der vordefinierten Arbeitslänge in der zahnärztlichen Praxis eine Herausforderung bei der Wurzelkanalbehandlung.

Diese Studie beschäftigte sich deshalb mit dem Einfluss verschiedener Arbeitslängenbegrenzer auf das Einhalten der vordefinierten Arbeitslänge. Neben dem konventionellen Silikonstopper wurden auch elektronische Arbeitslängenbegrenzer und eine neu entwickelte Stoppercap untersucht.

Hierzu wurden auf Basis von Mikro-CTs humaner extrahierter Prämolaren im 3D-Druck Modelle erstellt. So wurden identische Zahnanatomien und identische Bedingungen für die Testgruppen hergestellt.

In sechs Versuchsreihen (insgesamt n=190) wurde, unter an den klinischen Alltag angelehnten Bedingungen, endodontische Aufbereitungen mit unterschiedlichen Arbeitslängenbegrenzern (Silikonstopper, innovative Stoppercap und automatische Stopp-Funktion der Endomotoren) sowie weiteren Hilfsmitteln (Lupenbrille, Operationsmikroskop) in vitro durchgeführt. Es kam ein rotierendes Mehrfeilensystem zum Einsatz.

Messfehler in dem gesamten Wurzelkanalbehandlungsprozess wurden mittels Videoaufnahmen dokumentiert und für jedes Instrument und jeden Arbeitslängenbegrenzer ausgewertet. In den Videoaufnahmen wurde der maximale Vortrieb der Endofeilenspitze während jedes Aufbereitungsschritts bestimmt. Folgende Ergebnisse wurden in dieser Studie erzielt:

- Die Wahl des Arbeitslängenbegrenzers hat einen entscheidenden Einfluss auf das exakte Einhalten der Arbeitslänge.

- Mit dem konventionellen Silikonstopper konnte die Arbeitslänge nur in ca. 50 % der Aufbereitungsschritte eingehalten werden.
- Entgegen der genauen Messungen der Apexlokatoren blieben die Ergebnisse der integrierten automatischen Stopp-Funktion der zwei untersuchten Endomotoren hinter den Erwartungen zurück. Beim einen war jede Aufbereitung fehlerhaft, beim anderen war jede zweite Aufbereitung ungenau.
- Die innovative Stoppercap ermöglichte ein sehr exaktes Einstellen und Einhalten der Arbeitslänge in 100 % der Aufbereitungsschritte. Dies galt auch für alle Aufbereitung.
- Der Einsatz einer Vergrößerungshilfe, die Endofeilengröße, die Wurzelkanalanatomie und der koronale Referenzpunkt sowie der zeitliche Verlauf einer Aufbereitung hatten keinen Einfluss auf das Einhalten der Arbeitslänge.

Mit Hilfe der in diesem Kontext erstmals eingesetzten Videoanalyse, konnten, trotz optimierter Laborbedingungen, vermehrt Über- und Unterinstrumentierungen beobachtet werden. Dies erlaubt den Rückschluss, dass der konventionelle Silikonstopper für die Einhaltung der Arbeitslänge nicht zu empfehlen ist.

Die hier untersuchten automatischen Stopp-Funktionen der Endomotoren sind momentan noch nicht ausreichend, um ausschließlich mit ihnen die Arbeitslänge einzuhalten. Hier besteht Potential für Weiterentwicklungen. Die innovative Stoppercap bietet eine alternative Möglichkeit die Arbeitslänge exakt einzuhalten, zusätzlich entfällt die dauerhafte Kontrolle des Referenzpunktes, was im Praxisalltag eine endodontische Aufbereitung erleichtert.

6. Literaturverzeichnis

Bartols, A., Bormann, C., Werner, L., Schienle, M., Walther, W., & Dörfer, C. E. (2020). A retrospective assessment of different endodontic treatment protocols. *PeerJ*, 8, e8495.

BEMA 2019—Einheitlicher Bewertungsmaßstab für zahnärztliche Leistungen gemäß § 87 Abs. 2 und 2d SGB V. Erhältlich unter URL: <https://www.kzbv.de/bema-20190701.download.e93d2503f317c299adec27949fa783c8.pdf> [Abgerufen 23.08. 2020].

Bernardes, R. A., Feitosa, A. P. O. P., Bramante, C. M., Vivan, R. R., Piasecki, L., Duarte, M. A. H. & de Vasconcelos, B. C. (2021). Evaluation of foramen locating accuracy of an endodontic motor integrated with electronic foramen employing optimal glide path kinematics. *Clinical Oral Investigations*, 1-6.

Broschüre MORITA Tri Auto ZX2, Stand 06.04.2018

Buck, R. A., Cai, J., Eleazer, P. D., Staat, R. H. & Hurst, H. E. (2001). Detoxification of endotoxin by endodontic irrigants and calcium hydroxide. *Journal of endodontics*, 27(5), 325-327.

Castellucci, A. (2004). A brief history of endodontics. *Endodontics. Prato, Italy*, 2-5.

Christofzik, D. W., Bartols, A., Khaled, M., Größner-Schreiber, B. & Dörfer, C. E. (2017). The accuracy of the auto-stop function of different endodontic devices in detecting the apical constriction. *BMC oral health*, 17(1), 1-5.

Custer, L. E. (1918). Exact methods of locating the apical foramen. *The Journal of the National Dental Association*, 5(8), 815-819.

Connert, T., Judenhofer, M. S., Hülber-J, M., Schell, S., Mannheim, J. G., Pichler, B. J., ... & ElAyouti, A. (2018). Evaluation of the accuracy of nine electronic apex locators by using Micro-CT. *International endodontic journal*, 51(2), 223-232.

Coolidge, E. D. (1960). Past and present concepts in endodontics. *The Journal of the American Dental Association*, 61(6), 676-688.

Cruse, W. P. & Bellizzi, R. (1980). A historic review of endodontics, 1689-1963, part 2. *Journal of endodontics*, 6(4), 532-535.

de Vasconcelos, B. C., Frota, L. M. A., de Abreu Souza, T., Bernardes, R. A. & Duarte, M. A. H. (2015). Evaluation of the maintenance of the apical limit during instrumentation with hybrid equipment in rotary and reciprocating modes. *Journal of endodontics*, 41(5), 682-685.

DGZMK Wissenschaftliche Stellungnahme Zahnärztliche Eingriffe und Endokarditis-Prophylaxe (1999)
 URL: https://secure.owidi.de/documents/10165/1935870/Zahnaerztliche_Eingriffe_und_Endokarditis-Phophylaxe.pdf/79a017fc-4b44-492b-9a74-416453ae5f47
 [Abgerufen 23.10. 2021].

DGZMK – Endokarditis-Prophylaxe nur noch bei Hochrisikopatienten (2007)
 URL: <https://www.zm-online.de/archiv/2007/20/zahnmedizin/endokarditis-prophylaxe-nur-noch-bei-hochrisikopatienten/>
 [Abgerufen 23.10. 2021].

DGZMK, Stellungnahme (2004). Die Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge. *Dtsch Zahnärztl*, (59), 605.

DUMMER, P. M., McGINN, J. H. & REES, D. G. (1984). The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen. *International Endodontic Journal*, 17(4), 192-198.

EIAyouti, A., Hülber-J, M., Judenhofer, M. S., Connert, T., Mannheim, J. G., Löst, C., ... & von Ohle, C. (2014). Apical constriction: location and dimensions in molars—a micro-computed tomography study. *Journal of endodontics*, 40(8), 1095-1099.

EIAyouti, A., & Löst, C. (2006). A simple mounting model for consistent determination of the accuracy and repeatability of apex locators. *International endodontic journal*, 39(2), 108-112.

EIAyouti, A. & Löst, C. (2012). Endometrie–elektrische Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge. *Zahnmedizin up2date*, 6(03), 251-262.

EIAyouti, A., Weiger, R. & Löst, C. (2001). Frequency of overinstrumentation with an acceptable radiographic working length. *Journal of endodontics*, 27(1), 49-52.

EIAyouti, A., Weiger, R. & Löst, C. (2002). The ability of root ZX apex locator to reduce the frequency of overestimated radiographic working length. *Journal of endodontics*, 28(2), 116-119.

Erdemir, A., Eldeniz, A. U., Ari, H., Belli, S. & Esener, T. (2007). The influence of irrigating solutions on the accuracy of the electronic apex locator facility in the Tri Auto ZX handpiece. *International endodontic journal*, 40(5), 391-397.

Gebrauchsanweisung VDW Gold Reciproc

Habib, G., Lancellotti, P., Antunes, M. J., Bongiorno, M. G., Casalta, J. P., Del Zotti, F., ... & Zamorano, J. L. (2015). 2015 ESC guidelines for the management of infective endocarditis: the task force for the management of infective endocarditis of the European Society of Cardiology (ESC) endorsed by: European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS), the European Association of Nuclear Medicine (EANM). *European heart journal*, 36(44), 3075-3128.

Hanafi, A., Donnermeyer, D., Schäfer, E., & Bürklein, S. (2020). Perception of a modular 3D print model in undergraduate endodontic education. *International Endodontic Journal*.

Huang, L. (1987). An experimental study of the principle of electronic root canal measurement. *Journal of endodontics*, 13(2), 60-64.

Kim, E., Marmo, M., Lee, C. Y., Oh, N. S., & Kim, I. K. (2008). An in vivo comparison of working length determination by only root-ZX apex locator versus combining root-ZX apex locator with radiographs using a new impression technique. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 105(4), e79-e83.

Klemz, A. A., Cruz, A. T. G., Piasecki, L., Carneiro, E., Westphalen, V. P. D., & da Silva Neto, U. X. (2021). Accuracy of electronic apical functions of a new integrated motor compared to the visual control of the working length—an ex vivo study. *Clinical Oral Investigations*, 25, 231-236.

Kobayashi, C. & Suda, H. (1994). New electronic canal measuring device based on the ratio method. *Journal of Endodontics*, 20(3), 111-114.

Kojima, K., Inamoto, K., Nagamatsu, K., Hara, A., Nakata, K., Morita, I., ... & Nakamura, H. (2004). Success rate of endodontic treatment of teeth with vital and nonvital pulps. A meta-analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 97(1), 95-99.

Lee, A. H. C., Cheung, G. S. P. & Wong, M. C. M. (2012). Long-term outcome of primary non-surgical root canal treatment. *Clinical oral investigations*, 16(6), 1607-1617.

KZBV Statistik, Über die KZVen mit den Primär- und Ersatzkassen abgerechnete Füllungen, Extraktionen, Wurzelkanalfüllungen 1970 – 2018, KZBV Jahrbuch 2019, 102

McDonald, N. J. & Hovland, E. J. (1990). An evaluation of the apex locator Endocater. *Journal of endodontics*, 16(1), 5-8.

Nair, P. N. R. (2006). On the causes of persistent apical periodontitis: a review. *International endodontic journal*, 39(4), 249-281.

Nascimento, E. H. L., Gaêta-Araujo, H., Andrade, M. F. S. & Freitas, D. Q. (2018). Prevalence of technical errors and periapical lesions in a sample of endodontically treated teeth: a CBCT analysis. *Clinical oral investigations*, 22(7), 2495-2503.

Ng, Y. L., Mann, V., Rahbaran, S., Lewsey, J. & Gulabivala, K. (2008). Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature—Part 2. Influence of clinical factors. *International endodontic journal*, 41(1), 6-31.

Ng, Y. L., Mann, V. & Gulabivala, K. (2010). Tooth survival following non-surgical root canal treatment: a systematic review of the literature. *International endodontic journal*, 43(3), 171-189.

- Okell, C. C. & Elliott, T. S. (1935). Bacteraemia and oral sepsis with special reference to the aetiology of subacute endocarditis. *Lancet*, 869-72.
- PAST Version 2.17c, Hammer O., Harper, D.A.T. and Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1):9pp
- Pizzo, G., Guiglia, R., Russo, L. L. & Campisi, G. (2010). Dentistry and internal medicine: from the focal infection theory to the periodontal medicine concept. *European journal of internal medicine*, 21(6), 496-502.
- Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung Konsenspapier der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie. *Endodontie* 2004; 13/3: 271–284
- Reis, L. C., Rôças, I. N., Siqueira Jr, J. F., de Uzeda, M., Lacerda, V. S., Domingues, R. M., ... & Saraiva, R. M. (2016). Bacteremia after endodontic procedures in patients with heart disease: culture and molecular analyses. *Journal of endodontics*, 42(8), 1181-1185.
- Richtlinien des Gemeinsamen Bundesausschusses gemäß § 91 Abs. 6 SGB V Stand 2019, KZV-Handbuch, Band 1, Register 7
- Ricucci, D. & Langeland, K. (1998). Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 2. A histological study. *International endodontic journal*, 31(6), 394-409.
- Roderjan, M. C. (2009). *In vitro Untersuchung dreier Endodontiegeräte zur maschinellen Aufbereitung mit integrierter Apexlokalisation* (Doctoral dissertation, Staats-und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky).
- Saunders, W. P. & Saunders, E. M. (1997). Conventional endodontics and the operating microscope. *Dental Clinics of North America*, 41(3), 415-428.
- Schaeffer, M. A., White, R. R. & Walton, R. E. (2005). Determining the optimal obturation length: a meta-analysis of literature. *Journal of endodontics*, 31(4), 271-274.
- Sunada, I. (1962). New method for measuring the length of the root canal. *Journal of dental research*, 41(2), 375-387.
- Suzuki, K. (1942). Experimental study on iontophoresis. *Jpn J Stomatology*, 16, 411-429.
- Tchorz, J. P., Hellwig, E. & Altenburger, M. J. (2013). Teaching model for artificial teeth and endodontic apex locators. *Journal of dental education*, 77(5), 626-629.

6. Literaturverzeichnis

Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 2004, Die Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge
URL:

[https://secure.owidi.de/documents/10165/1936443/Die Bestimmung der endodontischen Arbeitslaenge.pdf/6c96b5c5-2724-409f-b4bd-41d49360ecfd](https://secure.owidi.de/documents/10165/1936443/Die_Bestimmung_der_endodontischen_Arbeitslaenge.pdf/6c96b5c5-2724-409f-b4bd-41d49360ecfd)

[Abgerufen 26.11. 2021].

Wissenschaftliche Stellungnahme, Deutsche Gesellschaft für Zahn-Mund-und Kieferheilkunde, 2007, Good clinical practice“: Die Wurzelkanalbehandlung URL:

[https://secure.owidi.de/documents/10165/1936443/Good clinical practice Die Wurzelkanalbehandlung.pdf/aa06fab7-9710-4523-8053-e8a69216bb5f](https://secure.owidi.de/documents/10165/1936443/Good_clinical_practice_Die_Wurzelkanalbehandlung.pdf/aa06fab7-9710-4523-8053-e8a69216bb5f)

[Abgerufen 26.11. 2021]

7. Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde in der Poliklinik für Zahnerhaltung unter Betreuung von PD Dr. med. dent. Ashraf ElAyouti durchgeführt. Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit PD Dr. med. dent. Ashraf ElAyouti. Sämtliche Versuche wurden von mir eigenständig durchgeführt. Die statistische Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit von PD Dr. med. dent. Ashraf ElAyouti und mir.

Ich versichere, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren, als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 05.05.2022

Doktorandin

8. Danksagung

Mein Dank gilt besonders Herrn PD Dr. med. dent. Ashraf ElAyouti, für die Überlassung des Themas, seine Betreuung, seine Ratschläge und Anregungen während dieses Forschungsvorhabens.

Großer Dank gilt Dr. med. dent. Sophie Maier-Schell, die mir in der initialen Phase meiner wissenschaftlichen Untersuchungen als Mentorin zur Seite stand.

Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mich auf meinem Weg durch das Studium begleitet und unterstützt haben.

Danken möchte ich außerdem Dr. med. dent. Luise Hofmann, die alle meine formalen Fragen bezüglich der Bearbeitung meiner Dissertation beantworten konnte.